



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ
ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΣΥΣΤΟΛΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΠΟΛΤΟΥ

**Σύγκριση συμπεριφοράς διάφορων τύπων τσιμέντου
και παράγοντες επιρροής**

ΕΚΠΟΝΗΣΗ : ΣΥΓΚΟΥΝΑ ΑΘΗΝΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΣΤΥΛΙΑΝΟΣ ΚΟΛΙΑΣ
ΑΝΑΠΛΗΡΩΤΗΣ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ Ε.Μ.Π

Οκτώβριος 2001

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εκπόνηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας πραγματοποιήθηκε στο διάστημα Απριλίου 2001-Οκτώβρη 2001.

Με ιδιαίτερη θερμότητα θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον Αναπληρωτή καθηγητή ΕΜΠ κ. Στυλιανό Κόλια για την καθοδήγηση και τη βοήθεια που μου προσέφερε, καθώς και την κατανόηση που επέδειξε σε όλη τη διάρκεια της διπλωματικής εργασίας.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ επίσης θα ήθελα να εκφράσω στον κ. Αναστάσιο Καραχάλιο, Διπλωματούχο Πολ. Μηχανικό, για την συνεισφορά του τόσο κατά τη διάρκεια των πειραμάτων όσο και στα ακόλουθα στάδια της παρούσας εργασίας.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το σκυρόδεμα κατά την έκθεσή του σε διάφορα περιβάλλοντα σχετικής υγρασίας και θερμοκρασίας, υφίσταται με την πάροδο του χρόνου μεταβολές όγκου λόγω ξήρανσης στον αέρα ή λόγω διύγρυνσης μέσα στο νερό. Εξαιτίας του φαινομένου της ξήρανσης παθαίνει συστολή η οποία μπορεί να οδηγήσει στη ρηγμάτωσή του. Οι ρωγμές πρέπει να αποφεύγονται όσο είναι δυνατό διότι μειώνουν την αντοχή του σκυροδέματος και μπορεί ακόμη να συμβάλουν μαζί με μια σειρά άλλων παραγόντων στην μείωση της ανθεκτικότητας της κατασκευής.

Στα πρώτα κεφάλαια (1-3) της παρούσας εργασίας, αναπτύχθηκαν θεωρητικά η συμπεριφορά, οι ιδιότητες, η αντοχή του σκυροδέματος, Κανονισμοί Τεχνολογίας του, καθώς και η συστολή αυτού ενώ στα επόμενα κεφάλαια που είναι και το κύριο μέρος της εργασίας αυτής, εξετάσθηκε η συμπεριφορά διάφορων μιγμάτων τσιμεντοπολτού που παρασκευάσθηκαν (συνολικά 72 δοκίμια, έξι (6) για κάθε μίγμα) ως προς το φαινόμενο της συστολής δύο ειδών, της αυτογενούς και της ξήρανσης. Δεν χρησιμοποιήθηκαν αδρανή για παρασκευή σκυροδέματος, δεδομένου ότι η συστολή του τσιμεντοπολτού είναι πολύ πιο έντονη από αυτή του σκυροδέματος. Ακόμη χρησιμοποιήθηκε μικρός λόγος $N/T < 0,42$ (δηλ. όχι πλήρες ενυδατωμένο τσιμέντο) ώστε τα μίγματα να παρουσιάζουν το φαινόμενο της ενδογενούς συστολής. Έγινε περιγραφή των πειραματικών διαδικασιών καθώς και ανάλυση των αποτελεσμάτων ανάλογα με τον τύπο τσιμέντου και τις επικρατούσες κάθε φορά συνθήκες (τρόπος παρασκευής, περιβάλλον εργαστηρίου) και στη συνέχεια εξήχθησαν κάποια συμπεράσματα – παρατηρήσεις σχετικά με την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων (μέσω κυρίως στατιστικής ανάλυσης) - αρκετά αξιόπιστες μετρήσεις - αλλά και για τους παράγοντες επιρροής του φαινομένου της συστολής σε τσιμεντοπολτό, κατ'επέκταση και στο σκυρόδεμα.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1	1
1.1 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	1
1.1.1 Ορισμός Σκυροδέματος	1
1.1.2 Συστατικά Σκυροδέματος	1
1.2 ΤΣΙΜΕΝΤΟ	2
1.2.1 Συστατικά Τσιμέντου	2
1.2.2 Τύποι Τσιμέντων και Κατηγορίες Αντοχής	3
1.2.2.1 Εισαγωγή	3
1.2.2.2 Γενικές αρχές – Στόχοι των νέων προτύπων	4
1.2.2.3 Τύποι και κατηγορίες τσιμέντων	4
1.2.2.4 Έναρξη ισχύος – Μεταβατική περίοδος	7
1.2.2.5 Τσιμέντο ανθεκτικό στα θειικά	7
1.2.3 Ενυδάτωση Τσιμέντου	8
1.2.4 Πήξη	10
1.3 ΑΔΡΑΝΗ ΥΛΙΚΑ	11
1.3.1 Προέλευση και Αντοχή των Αδρανών	11
1.3.2 Καθαρότητα	12
1.3.3 Κοκκομετρική Διαβάθμιση	13
1.3.4 Η Μορφή των Κόκκων	14
1.4 ΝΕΡΟ ΑΝΑΜΕΙΞΕΩΣ	15
1.5 ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	17
1.5.1 Ρευστοποιητικά	17
1.5.2 Επιβραδυντικά	18
1.5.3 Επιταχυντικά	18
1.5.4 Αερακτικά	18
1.5.5 Στεγανοποιητικά	19
1.5.6 Αντιπαγετικά	20
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2	21
2.1 Η ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ	21
2.1.1 Ορισμός Αντοχής	21
2.1.2 Είδη Αντοχής	21
2.1.3 Η Αντοχή στις Διάφορες Μορφές Καταπονήσεων	22
2.1.4 Μηχανισμός Θραύσης	24

2.1.5 Επίδραση των Συστατικών του Σκυροδέματος και Άλλων Παραγόντων στην Αντοχή	24
2.1.5.1 Τσιμέντο	24
2.1.5.2 Αδρανή	25
2.1.5.3 Νερό	25
2.1.5.4 Πρόσθετα	25
2.1.5.5 Επίδραση των μεθόδων παρασκευής	26
2.1.5.6 Επίδραση της συντήρησης και των συνθηκών δοκιμής	26
2.1.6 Ανάπτυξη της Αντοχής με το Χρόνο	27
2.1.7 Μέτρηση της Αντοχής	27
2.2 ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ	28
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	30
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	30
3.2 ΕΙΔΗ ΣΥΣΤΟΛΗΣ	30
3.2.1 Συστολή Νωπού Σκυροδέματος	31
3.2.2 Συστολή Πήξης - Αυτογενής Συστολή (ή Ενδογενής)	32
3.2.3 Συστολή Ξήρανσης	34
3.2.4 Συστολή Ενανθράκωσης	39
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4	47
4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	47
4.2 ΔΙΕΥΚΡΙΝΙΣΕΙΣ - ΟΡΙΣΜΟΙ ΕΝΝΟΙΩΝ	47
4.3 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ	48
4.3.1 Υλικά Παρασκευής Μιγμάτων	49
4.3.2 Εργαστηριακές Συνθήκες	49
4.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΩΝ	50
4.4.1 Προκαταρτικές Δοκιμές	50
4.4.2 Κύριες και Δευτερεύουσες Δοκιμές – Μετρήσεις	51
4.5 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣΤΗΚΑΝ ΜΕ ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΟΝ ΑΡΙΘΜΟ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	55
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5	56
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	56
5.2 ΚΥΡΙΕΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΠΟΛΤΟΥ	56
5.2.1 Μελέτη Διαγραμμάτων Συστολής Ξήρανσης σε Σχέση με τον Χρόνο και την Απώλεια Βάρους	56
5.2.2 Μελέτη Αντίστοιχων Διαγραμμάτων “Ενδογενούς” Συστολής	57

5.2.3 Σύγκριση Μεταξύ Συστολής Ξήρανσης - "Ένδογενούς" Συστολής	59
5.3 ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΕΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΠΟΛΤΟΥ (ΠΡΩΤΗ ΦΑΣΗ)	59
5.3.1 Μελέτη Διαγραμμάτων Συστολής Ξήρανσης σε Σχέση με τον Χρόνο και την Απώλεια Βαρους	60
5.3.2 Μελέτη Αντίστοιχων Διαγραμμάτων "Ένδογενούς" Συστολής	61
5.3.3 Σύγκριση Μεταξύ Συστολής Ξήρανσης - "Ένδογενούς" Συστολής	61
5.4 ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΕΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ (ΔΕΥΤΕΡΗ ΦΑΣΗ)	62
5.4.1 Μελέτη Διαγραμμάτων Συστολής Ξήρανσης με τον Χρόνο και την Απώλεια Βάρους.....	62
5.4.2 Μελέτη Αντίστοιχων Διαγραμμάτων "Ένδογενούς" Συστολής	63
5.4.3 Συσχέτιση Μεταξύ Συστολής Ξήρανσης - "Ένδογενούς" Συστολής	64
5.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΟΛΩΝ ΤΩΝ ΦΑΣΕΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΚΟΙΝΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6	104
6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	104
6.2 ΣΥΣΤΟΛΗ ΞΗΡΑΝΣΗΣ	105
6.2.1 Επαναληψιμότητα Μεταξύ Δοκιμών από το Ιδίο Ανάμιγμα	105
6.2.2 Στατιστική Ανάλυση των Κύριων Μετρήσεων για τα Ακάλυπτα Δοκίμια.....	107
6.2.3 Παράμετροι Που Επηρέασαν τα Αποτελέσματα των Μετρήσεων	112
6.3 ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΥΤΟΓΕΝΗΣ ΣΥΣΤΟΛΗ	112
6.3.1 Επαναληψιμότητα στα Δοκίμια Από Το Ιδίο Ανάμιγμα	112
6.3.2 Στατιστική Ανάλυση των Κύριων Μετρήσεων για τα Σφραγισμένα Δοκίμια	115
6.3.3 Παράμετροι Που Επηρέασαν τα Αποτελέσματα των Μετρήσεων	119
6.4 ΣΧΟΛΙΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΙΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΤΗΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	120
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7	122
7.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	122

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΚΑΙ ΥΛΙΚΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ

1.1 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

1.1.1. ΟΡΙΣΜΟΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Το σκυρόδεμα ορίζεται ως ένα σύνθετο δομικό υλικό, το οποίο επικρατεί στον τομέα των κατασκευών, ως άοπλο και ως οπλισμένο. Τα υλικά που το συνθέτουν είναι το τσιμέντο, το νερό, τα αδρανή και καμιά φορά και τα υλικά που ονομάζουμε πρόσθε-τα υλικά μάζας. Το τσιμέντο ενώνεται με το νερό δημιουργώντας μαζί και με τα αδρανή ένα τεχνητό σύνθετο στερεό υλικό που με την πάροδο του χρόνου αποκτά σημαντικές μηχανικές αντοχές. Έχει την ιδιότητα να διατηρεί το σχήμα και τη μορφή του ώστε να γίνεται απαραίτητο στις κατασκευές.

Παλαιότερα σπανίως, αλλά σήμερα πολύ συχνά, κατά την ανάμιξη του σκυροδέματος χρησιμοποιούνται πρόσθετα χημικά υλικά σε μικρές ποσότητες (συνήθως σε ποσοστό κατά βάρος του τσιμέντου που δεν υπερβαίνει το 2%) με τα οποία επιτυγχάνεται βελτίωση ή μεταβολή ορισμένων ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Τα υλικά αυτά ονομάζονται *χημικά πρόσθετα* ή απλώς *πρόσθετα*. Επίσης τα τελευταία χρόνια έχει διαδοθεί – ιδίως στο εξωτερικό – η ανάμιξη στερεών υλικών υπό μορφή λεπτής σκόνης σε μικρές μεν ποσότητες αλλά ικανές να αλλάξουν την ποσοστιαία σύνθεση του σκυροδέματος. Τα υλικά αυτά ονομάζονται *πρόσμικτα* σκυροδέματος και βελτιώνουν επίσης τις ιδιότητες του σκυροδέματος (πυριτική παιπάλη, ορισμένοι τύποι ιπτάμενης τέφρας ή ποζολάνες).

1.1.2 ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Όπως αναφέρθηκε πιο πάνω τα κύρια συστατικά του σκυροδέματος είναι:

- το τσιμέντο

- τα αδρανή
- το νερό

και σε ορισμένες περιπτώσεις χρησιμοποιούνται πρόσθετα υλικά που βελτιώνουν τις ιδιότητές του. Το τσιμέντο ενώνεται με το νερό σχηματίζοντας ένυδρες χημικές ενώσεις κολλοειδών διαστάσεων που στερεοποιούνται συγκολλώντας τα αδρανή υλικά μεταξύ τους προσδίδοντας συνοχή και πλαστικότητα στο μίγμα. Έτσι ο τσιμεντοπολτός περνά βαθμιαία από τη μορφή του πηγματος στη στερεαία μορφή. Αυτό γίνεται αρχικά με την αύξηση του ιξώδους του πηγματος και στη συνέχεια με τη βαθμιαία ανάπτυξη της αντοχής.

1.2 ΤΣΙΜΕΝΤΟ

Είναι βιομηχανικό κοκκώδες υλικό που όταν αναμιχθεί με νερό σχηματίζει μια σκληρυνόμενη κονία την τσιμεντοκονία. Η τσιμεντοκονία μπορεί να συνδέσει μεταξύ τους αδρανή υλικά και να σχηματίσει ένα σύνθετο στερεό σώμα. Σε αντίθεση με άλλες κονίες που είτε δεν σκληραίνουν μέσα σε νερό είτε δεν είναι σταθερές μέσα σ' αυτό και γ' αυτό λέγονται μη υδραυλικές, η τσιμεντοκονία είναι υδραυλική κονία δηλαδή πήζει, σκληραίνει και παραμένει σταθερή μέσα σε νερό. Υπάρχουν τσιμέντα πολλών τύπων, το σπουδαιότερο όμως από άποψη εφαρμογών είναι το τσιμέντο Πόρτλαντ που παράγεται από ασβεστολιθικά υλικά με αργλικές και πυριτικές προσμίξεις καθώς και οξειδίων σιδήρου. Τα υλικά αλέθονται, αναμιγνύονται και ψήνονται. Τα προϊόντα ψήσιματος, ονομάζονται κλίνκερ, και συναλέθονται με την κατάλληλη ποσότητα γύψου που ρυθμίζει το χρόνο πήξης του τσιμέντου.[1],[3]

1.2.1. ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Τα κύρια συστατικά του τσιμέντου είναι το οξείδιο ασβεστίου (CaO), οξείδιο του πυριτίου (SiO_2), οξείδιο αργιλίου (Al_2O_3) και οξείδιο

σιδήρου(Fe_2O_3). Αυτά τα τέσσερα οξειδία σχηματίζουν τις ακόλουθες ενώσεις

- Το πυριτικό τριασβέστιο $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, (C_3S) που αποτελεί και το μεγαλύτερο ποσοστό 35-55% σε μορφή ισοδιαστάτων άχρωμων κόκκων.
- Το πυριτικό διασβέστιο $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, (C_2S), σε ποσοστό 15-35%
- Το αργιλικό τριασβέστιο $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, (C_3A), σε ποσοστό 7-15%
- Το σιδηροαργιλικό τριασβέστιο $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, (C_4AF), σε ποσοστό περίπου 8%

Η ποσοστιαία αναλογία αυτών των ενώσεων εξαρτάται από τις σχετικές αναλογίες των οξειδίων μέσα στο τσιμέντο και μάλιστα μπορεί να μεταβληθεί σε μεγάλο βαθμό από πολύ μικρές μεταβολές των οξειδίων.

Εκτός από τις προηγούμενες τέσσερις ενώσεις που αποτελούν το 90% του βάρους του τσιμέντου υπάρχουν ακόμη

- Η γύψος($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) που προστίθεται σε μικρά ποσοστά για να ρυθμίσει, το χρόνο πήξεως
- Η Μαγνησία (MgO) που περιορίζεται σε ποσοστό 3-6%
- Το οξύδιο τιτανίου (TiO_2) σε ποσοστό 0,1-0,4%
- Τα αλκάλια(K_2O , Na_2O) σε ποσοστό 0,5-1,3% [1],[3]

1.2.2. ΤΥΠΟΙ ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ ΚΑΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

1.2.2.1. Εισαγωγή

Σύμφωνα με απόφαση της ΕΕ¹, από 01/04/01 τα τσιμέντα που θα κυκλοφορούν σε όλες τις χώρες κράτη μέλη θα πρέπει να είναι πιστοποιημένα, να φέρουν σήμανση CE και να είναι σύμφωνα με τα νέα Ευρωπαϊκά Πρότυπα,

- **EN 197-1 : Τσιμέντο Μέρος -1** :Σύνθεση, προδιαγραφές και κριτήρια συμμόρφωσης για κοινά τσιμέντα και
- **EN 197-2 : Τσιμέντο Μέρος – 2** :Αξιολόγηση συμμόρφωσης

τα οποία έχουν υιοθετηθεί σαν Ελληνικά Πρότυπα από τον ΕΛΟΤ².

1.2.2.2. Γενικές αρχές – στόχοι των νέων προτύπων

Το τσιμέντο, ως υλικό που διέπεται από την CPD 89/106, όπως και άλλα δομικά υλικά, θα πρέπει να πληρεί ορισμένες ελάχιστες απαιτήσεις, όσον αφορά τις ιδιότητές του και τη σταθερότητα παραγωγής του.

Στη σύνταξη των εν λόγω προτύπων συμπεριελήφθησαν και κωδικοποιήθηκαν όλα τα κοινής αποδοχής και ευρείας χρήσης τσιμέντα, που παράγονται στις χώρες μέλη, με αποτέλεσμα τη δημιουργία κοινής ορολογίας για όλους τους μελετητές - χρήστες – κατασκευαστές δομικών έργων της ΕΕ.

Η ποιότητα του τσιμέντου, σε αντίθεση με άλλα υλικά, πιστοποιείται με το αυστηρότερο σύστημα αξιολόγησης συμμόρφωσης, με ανεξάρτητη εξωτερική δειγματοληψία, από ανεξάρτητο αναγνωρισμένο φορέα πιστοποίησης.

1.2.2.3. Τύποι και κατηγορίες τσιμέντων

Κάθε χώρα παγκοσμίως παρασκευάζει τσιμέντο, χρησιμοποιώντας τις πηγές πρώτων υλών που διαθέτει. Έτσι ανάλογα με τις υπάρχουσες και χρησιμοποιούμενες πρώτες ύλες δημιουργήθηκαν οι διάφοροι τύποι τσιμέντων που παράγονται παγκοσμίως, όπως το καθαρό ή αμιγές τσιμέντο, το τσιμέντο με ποζολάνη, ιπτάμενη τέφρα - πυριτική ή ασβεστολιθική -, σκωρία υψικαμίνου, πυριτική παιπάλη, ασβεστόλιθο κλπ.

¹ Η απόφαση είναι αποτέλεσμα της εντολής M114 της ΕΕ προς την CEN και της Ευρωπαϊκής οδηγίας Δομικών Κατασκευών CPD 89/106. [4]

² Ο ΕΛΟΤ και ειδικότερα η επιτροπή ΤΕ-51 'Τσιμέντο και Δομικοί Άσβεστοί' έχουν εκδώσει τα αντίστοιχα ελληνικά πρότυπα **ΕΛΟΤ EN 197-1** και **ΕΛΟΤ EN 197-2**, τα οποία είναι διαθέσιμα από τα τέλη Οκτωβρίου 2000.

Γι' αυτό το λόγο, το πρότυπο προβλέπει μεγάλο αριθμό προϊόντων τσιμέντου (Πίνακας 2), τα οποία όμως δεν κυκλοφορούν κατ' ανάγκη σε κάθε

χώρα μέλος, λόγω των ιδιοτεροτήτων στις πρώτες ύλες και στο κλίμα αυτών.

Το πρότυπο EN 197-1 προδιαγράφει σε γενική μορφή τους εξής τύπους τσιμέντου:

Πίνακας 1: Βασικοί τύποι τσιμέντου

ΤΥΠΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
CEM I	Τσιμέντο Πόρτλαντ
CEM II	Σύνθετο Τσιμέντο Πόρτλαντ
CEM III	Σκωριοτσιμέντο
CEM IV	Ποζολανικό Τσιμέντο
CEM V	Σύνθετο τσιμέντο

Το είδος και το ποσοστό των συστατικών του τσιμέντου, τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή, σύμφωνα με το πρότυπο, καθορίζουν τους τύπους και τα 27 προϊόντα τσιμέντου.

Επίσης το πρότυπο προδιαγράφει και 6 κατηγορίες αντοχών, στις οποίες τα τσιμέντα κατατάσσονται ανάλογα με την αντοχή τους σε θλίψη σε κονίαμα πρότυπης σύνθεσης και τρόπου παρασκευής, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 196-1 *Μέθοδοι δοκιμών τσιμέντου – Μέρος 1 :*

Προσδιορισμός αντοχών.

Κάθε κατηγορία αντοχής ορίζεται από ένα κατώτερο και ένα ανώτερο όριο αντοχής. Το κατώτερο όριο αντοχής των 28 ημερών χαρακτηρίζει την συγκεκριμένη κατηγορία. Κάθε μία από τις παραπάνω περιλαμβάνει δύο υποκατηγορίες πρώιμης αντοχής N,R (Πίνακας 3). [4]

Κατηγορία αντοχής	Αντοχή στη θλίψη MPa				Αρχικός χρόνος πήξης	Διόγκωση (Διαστολή)
	Αρχική αντοχή		Τυπική αντοχή			
	2 ημ.	7 ημ.	28 ημ.		min.	mm
32,5 N	-	≥16	≥32,5	≤52,5	≥75	≤10
32,5 R	≥10	-				
42,5 N	≥10	-	≥42,5	≤62,5	≥60	
42,5 R	≥20	-				
52,5 N	≥20	-	≥52,5	—	≥45	
52,5 R	≥30	-				

Πίνακας 3 : Απαιτήσεις μηχανικές και φυσικές οριζόμενες ως χαρακτηριστικές τιμές

Η συμμόρφωση των διαφόρων τιμέντων ως προς τα όρια αντοχών είναι στατιστική και περιγράφεται στο πρότυπο.

Ο συμβολισμός των διαφόρων τιμέντων, σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1, καθορίζεται από :

- τον κύριο τύπο τσιμέντου
- το ποσοστό clinker
- τον τύπο του δεύτερου κύριου συστατικού
- την κατηγορία της αντοχής
- το επίπεδο της πρώιμης αντοχής

Οι διαφορές στις κατηγορίες αντοχών του υφιστάμενου ελληνικού κανονισμού ΠΔ 244/80 και του προτύπου ΕΛΟΤ EN 197-1 δίνονται στον παρακάτω πίνακα :

ΠΔ 244/80		ΕΛΟΤ EN 197-1	
Κατηγορία Αντοχών	ΟΡΙΑ ANTOXΩΝ	Κατηγορία Αντοχών	ΟΡΙΑ ANTOXΩΝ
	(N/mm ²)		(N/mm ²)
35	25-45	32,5	32,5-52,5
45	35-55	42,5	42,5-62,5

Πίνακας 4 : Διαφορές αντοχών ΠΔ 244/80 και ΕΛΟΤ EN 197-1

1.2.2.4. Έναρξη ισχύος – μεταβατική περίοδος

Τα πρότυπα ΕΛΟΤ EN 197-1 και ΕΛΟΤ EN 197-2 τίθενται σε ισχύ από 01/04/01 και προβλέπεται μεταβατική περίοδος 6 μηνών για την προσαρμογή του κατασκευαστικού κλάδου σε αυτά.

Στην μεταβατική περίοδο θα συνυπάρχουν τα προϊόντα τσιμέντου, που προβλέπονται από το ΠΔ 244/80 και τα νέα πρότυπα.

Παράλληλα ο Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος τροποποιείται για να συμπεριλάβει στις διατάξεις του τα νέα προϊόντα τσιμέντου και μέσα στη μεταβατική περίοδο θα πρέπει να γίνουν οι απαιτούμενες αλλαγές (συμβάσεις, τιμολόγια, μελέτες σύνθεσης, κλπ.)

1.2.2.5. Τσιμέντο ανθεκτικό στα θειικά

Για τα έργα που απαιτείται χρήση τσιμέντου ανθεκτικού στα θειικά, παραμένει σε ισχύ το ΠΔ 244/80, διότι ο τύπος αυτός δεν προβλέπεται στα νέα Ευρωπαϊκά Πρότυπα. [4]

Κατηγορίες τσιμέντων

Αναφερόμαστε σε τρεις κατηγορίες αντοχής, 35 ,45 , 55 που προσδιορίζουν την αντοχή σε θλίψη και κάμψη. Η δοκιμή γίνεται σε

πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 40x40x160 mm. Οι αναλογίες του κονιάματος είναι 1 μέρος τσιμέντου, 3 μέρη πρότυπης άμμου, και 0,5 νερό κ.β. Τα δοκίμια δοκιμάζονται πρώτα σε κάμψη και στη συνέχεια, τα δύο μισά του πρίσματος, δοκιμάζονται σε θλίψη κατά επιφάνειες 40x40 mm. Οι αντοχές προσδιορίζονται σε ηλικία 2,7 και 28 ημερών και προκύπτει κάθε φορά από τον μέσο όρο των τριών δοκιμών για την κάμψη και των έξη δοκιμών για τη θλίψη.

Για τις κατηγορίες 35, 45 και 55 ο Κανονισμός θέτει τις ακόλουθες απαιτήσεις αντοχών : [3]

Αντοχή σε θλίψη N/mm^2

Κατηγορία αντοχών	ημέρες min.	Αντοχή σε 7ημ. min.	Αντοχή σε 28 ημ.	
			min.	max.
35	-	15	25	45
45	10	-	35	55
55	15	-	45	-

1.2.3. ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Αμέσως μετά την ανάμιξη του τσιμέντου με το νερό αρχίζει μια σειρά χημικών αντιδράσεων που ονομάζεται ενυδάτωση αλλά στην πραγματικότητα δεν πρόκειται για πραγματική ενυδάτωση, δηλ. ένωση με μόρια νερού αλλά και για υδρόλυση στην οποία οφείλεται η πήξη και σκλήρυνση του τσιμέντου. Η ενυδάτωση αρχίζει με ταχύ ρυθμό από την επιφάνεια κάθε κόκκου και προχωρεί προς το εσωτερικό του με ταχύτητα επιβραδυνόμενη διότι τα προϊόντα της ενυδατώσεως εμποδίζουν τη διείσδυση του νερού στο εσωτερικό του κόκκου. Η ταχύτητα ενυδάτωσης εξαρτάται επίσης από τη χημική σύσταση του τσιμέντου αλλά και τη θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Τα προϊόντα της ενυδάτωσης του τσιμέντου κατατάσσονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες, αντίστοιχες με τα κύρια συστατικά του τσιμέντου : ενυδρίτες πυριτικού ασβεστίου και ενυδρίτες αργιλικού τριασβεστίου. Τα προϊόντα ενυδάτωσης του τσιμέντου ονομάζονται πήγμα. Ο τσιμεντοπολιτός παραμένει εργάσιμος μέχρι την αρχή της πήξης. Για τα κοινά τσιμέντα η αρχή της πήξης δεν πρέπει να εμφανίζεται πριν από μια ώρα και το τέλος της μετά από 8 ώρες. Για το σκυρόδεμα ο αντίστοιχος χρόνος μέχρι την αρχή της πήξης είναι 2-4 φορές μεγαλύτερος.

Οι παραπάνω διαχωρισμοί έχουν πρακτική μόνο αξία και χρησιμεύουν για τον καθορισμό του χρόνου κατεργασίας και του χρόνου απομάκρυνσης των ξυλοτύπων.

Από χημική όμως άποψη η εξέλιξη είναι διαφορετική χωρίς τις απότομες αυτές αλλαγές.

Κατά την διάρκεια της χημικής αντίδρασης μεταξύ των συστατικών τσιμέντου και νερού προκαλείται ελάττωση του όγκου των προϊόντων της αντίδρασης ίση με το $\frac{1}{4}$ περίπου του αρχικού όγκου του νερού. Το φαινόμενο αυτό είναι η χημική συστολή και αλλάζει για κάθε σκυρόδεμα. Δεν οφείλεται σε εξωτερικά αίτια αλλά αποκλειστικά και μόνο στις χημικές μεταβολές που συντελούνται μεταξύ τσιμέντου και νερού.

Η συστολή ενυδάτωσης όπως αλλιώς λέγεται δεν είναι σταθερή για όλα τα σκυροδέματα αλλά εξαρτάται :

- από την ποσότητα του τσιμέντου, αφού ανάλογη είναι και η ποσότητα του νερού
- από την ποιότητα του τσιμέντου, γιατί τα διάφορα συστατικά του τσιμέντου απαιτούν διαφορετική το καθένα ποσότητα νερού, οπότε κάθε μεταβολή στη σύνθεση του τσιμέντου μεταβάλλει και τη συνολική ποσότητα νερού που χρειάζεται
- από την ποσότητα του νερού αναμειγνύσας, δηλ. από τον λόγο N/T. Όσο περισσότερο είναι το νερό, τόσο η δέσμευση του τσιμέντου γίνεται πληρέστερη, ενώ όσο η ποσότητα του νερού είναι περιορισμένη, μπορεί ορισμένη ποσότητα τσιμέντου να παραμείνει αδρανής.

Οι χημικές αντιδράσεις μεταξύ τσιμέντου και νερού πραγματοποιούνται με σύγχρονη έκλυση θερμότητας. Μπορούμε με κατάλληλη σύνθεση του

τσιμέντου να ελαττώσουμε τη θερμότητα που εκλύεται ,όταν αυτό είναι απαραίτητο για την κατασκευή.

Η συνολική θερμότητα εκλύεται μέσα σε όλη τη διάρκεια της αντίδρασης. Η έκλυση γίνεται γρήγορα στην αρχή και όλο πιο αργά με την πάροδο του χρόνου.

Σημασία όμως για την κατασκευή έχει η ταχύτητα έκλυσης της θερμότητας, δηλ. η ποσότητα της θερμότητας κατά τη διάρκεια των πρώτων ημερών.

Η θερμότητα ενυδάτωσης γίνεται αισθητή , όταν πρόκειται για ογκώδη έργα από τη μάζα των οποίων δεν μπορεί εύκολα να απομακρυνθεί με κίνδυνο ανάπτυξης εφελκυστικών τάσεων ή και ρηγματώσεων από την ανομοιόμορφη κατανομή της θερμότητας και τις ανομοιόμορφες συστολοδιαστολές.

1.2.4 ΠΗΞΗ

Χαρακτηρίζεται η φάση εκείνη όπου η τσιμεντοκονία παύει πια να έχει πλαστικότητα και γίνεται ψαθυρή και εύθριπτη. Η επόμενη φάση είναι η σκλήρυνση όπου μπορούμε πια να μιλήσουμε για αντοχή του υλικού. Γενικά η πήξη αρχίζει μαζί με τις χημικές αντιδράσεις , δηλ. αμέσως μετά την ανάμιξη με νερό.

Κατά τη διάρκεια της πήξης μπορούν να παρατηρηθούν δύο φαινόμενα που εμφανίζονται με ξαφνική μείωση της εργασιμότητας του τσιμεντοπολτού. Αυτά είναι η ψευδόπηξη και η ταχύπηξη όπου παρατηρείται ταχεία πήξη αμέσως μετά την ανάμιξη με το νερό.

Η ψευδόπηξη δεν συνοδεύεται με έκλυση θερμότητας και εξαφανίζεται με επανάμιξη χωρίς ανάγκη προσθήκης νερού σε αντίθεση με την ταχύπηξη που συνοδεύεται με σημαντική έκλυση θερμότητας και χρειάζεται προσθήκη νερού για την επανάμιξη.

1.3. ΑΔΡΑΝΗ ΥΛΙΚΑ

Τα αδρανή υλικά αποτελούν περίπου το 75% του όγκου του σκυροδέματος. Είναι λοιπόν φυσικό οι ιδιότητές τους να επηρεάζουν τις ιδιότητες του σκυροδέματος

Τα αδρανή ανάλογα με την προέλευσή τους διακρίνονται σε φυσικά ή φερτά ή συλλεκτά και σε θραυστά. Τα πρώτα βρίσκονται έτοιμα σε ποτάμια στις παραλίες και σε ορυχεία και χρησιμοποιούνται χωρίς καμία επεξεργασία εκτός από απλό κοσκίνισμα για απομάκρυνση των υπερμεγέθων κόκκων , ενώ τα δεύτερα δημιουργούνται με σπάσιμο πετρωμάτων που εξορύσσονται σε λατομεία ή ακόμη με το σπάσιμο χονδρών φυσικών αδρανών.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των αδρανών υλικών που επηρεάζουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος είναι :

- Η αντοχή τους
- Η καθαρότητα , η ύπαρξη δηλ. ή όχι πρόσμεικτων ουσιών
- Η πρόσφυση με την κονία
- Η χημική συμπεριφορά τους με τα άλλα συστατικά του σκυροδέματος ή με ουσίες που μπορεί να διεισδύσουν μέσα στο σκυρόδεμα
- Το σχήμα και το μέγεθος των κόκκων

1.3.1 ΠΡΟΕΛΕΥΣΗ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ

Για την παρασκευή του κοινού σκυροδέματος, στο οποίο η μηχανική αντοχή είναι το κυριότερο χαρακτηριστικό, σημασία έχει η αντοχή σε θλίψη του μητρικού πετρώματος.

Εκτός από την παραπάνω αντοχή σε θλίψη, το πέτρωμα πρέπει να μην αποσαθρώνεται από την επίδραση των καιρικών συνθηκών. Οι ιδιότητες αυτές χαρακτηρίζονται με τον όρο υγεία του πετρώματος. Τέλος ,πρέπει το πέτρωμα να διαθέτει αρκετή αντοχή σε επιφανειακή φθορά ,δηλ. αντοχή σε επιφανειακή τριβή και επιφανειακές κρούσεις.

Οι παραπάνω ιδιότητες ελέγχονται με πρότυπες μεθόδους που καθορίζονται στους κανονισμούς κάθε χώρας.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι η αντοχή των αδρανών δεν επηρεάζει στις συνηθισμένες περιπτώσεις την αντοχή του σκυροδέματος. Μόνο σε ακραίες περιπτώσεις όπως σε σκυροδέματα πολύ μεγάλης αντοχής ή σε περιπτώσεις χρήσης ελαφρών αδρανών τα οποία έχουν σημαντικά μικρότερη αντοχή από τα συνήθη αδρανή η αντοχή του σκυροδέματος επηρεάζεται από την αντοχή των αδρανών.

1.3.2 ΚΑΘΑΡΟΤΗΤΑ

Γενικά κάθε αδρανές πρέπει να αποτελείται μόνο από καθαρούς κόκκους του μητρικού πετρώματος. Στα μέτωπα όμως των λατομείων υπάρχουν συχνά φλέβες με άλλα υλικά επιβλαβή για το σκυρόδεμα (πχ. άργιλος) που μεταφέρονται μαζί με το υγιές πέτρωμα στους θραυστήρες, σπάζουν μαζί του και τελικά παραμένουν μέσα στα αδρανή. Το πρόβλημα είναι οξύτερο στα αδρανή των ποταμών ή των ορυχείων. Τέτοια υλικά είναι :

α) Η παιπάλη : Ως παιπάλη χαρακτηρίζεται το λεπτότερο τμήμα του υλικού συνήθως διαμέτρου μικρότερης από 0,2 mm.

Η παιπάλη μπορεί να είναι πηλός ή άργιλος ή σκόνη από το ίδιο το πέτρωμα. Ιδιαίτερη όμως σημασία έχει η κατανομή της παιπάλης μέσα στα αδρανή. Μπορεί να είναι α) κολλημένη πάνω στην επιφάνεια των χονδρότερων κόκκων, β) να σχηματίζει μικρούς σβώλους και γ) να είναι διασκορπισμένη ομοιόμορφα ανάμεσα στους κόκκους των αδρανών.

Στην πρώτη περίπτωση εμποδίζει την πρόσφυση μεταξύ αδρανών και κονιάματος. Στη δεύτερη περίπτωση δημιουργεί αδύνατα σημεία μέσα στη μάζα του σκυροδέματος. Στην τρίτη περίπτωση έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής, αλλά συντελεί ως ένα βαθμό και στην αύξηση της πυκνότητας και της πλαστικότητας του μείγματος.

Το μέγιστο αποδεκτό ποσοστό παιπάλης είναι συνήθως 1 ως 5% του συνολικού βάρους των αδρανών, ανάλογα με την κοκκομετρική σύνθεση.

Η παιπάλη απομακρύνεται, όταν τα αδρανή πλυθούν με νερό.

β) Οργανικές προσμίξεις : Στις οργανικές προσμίξεις περιλαμβάνονται υλικά οργανικής (ζωικής ή φυτικής) προέλευσης ,γαιάνθρακες και λιγνίτες

Τα οργανικά προϊόντα μπορεί να έχουν επίδραση στην πήξη της κονίας ή να δημιουργήσουν ρηγματώσεις ή αποφλοιώσεις στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Η επίδρασή τους στην πήξη είναι μάλλον επιβραδυντική.

Την ύπαρξη οργανικών ουσιών μπορούμε να διαπιστώσουμε αν αναμείξουμε τα αδρανή με διάλυμα υδροξειδίου του Νατρίου 3%.Το χρώμα του διαλύματος δείχνει την ύπαρξη ή όχι οργανικών ουσιών. Ανοιχτό κίτρινο είναι ένδειξη αρνητική ,ενώ σκούρο κίτρινο ως καφέ ή κόκκινο είναι ένδειξη θετική

γ) Θειούχες ενώσεις :Οι θειούχες ενώσεις μεταξύ των αδρανών έχουν δυσμενή επίδραση στην τελική αντοχή του σκυροδέματος, και σε μεγαλύτερη ποσότητα ή όταν είναι συγκεντρωμένες σε ορισμένα σημεία , μπορούν να προκαλέσουν ρηγματώσεις από την τοπική διόγκωση του σκυροδέματος που προκαλούν.

Τα αποτελέσματα των θειούχων ενώσεων εξαρτώνται από τον τύπο τους και είναι περισσότερο έντονα , όταν οι θειούχες ενώσεις είναι διαλυτές στο νερό. Σημασία επίσης έχει και η δυνατότητα ή όχι του να διεισδύσει έπειτα μέσα στη μάζα του σκυροδέματος αέρας ή υγρασία

Πρέπει , τέλος , να σημειωθεί ότι η δράση των θειούχων ενώσεων γίνεται με το τσιμέντο και επομένως η ίδια ποσότητα SO_3 μπορεί να έχει διαφορετικό αποτέλεσμα ανάλογα με την ποσότητα του τσιμέντου στο σκυρόδεμα. [1]

1.3.3. ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ

Λέγοντας κοκκομετρική διαβάθμιση εννοούμε την κατανομή των διαμέτρων των κόκκων των αδρανών. Πρακτικά βρίσκονται με κοσκίνισμα από μια τυποποιημένη σειρά κοσκίνων.Τα ποσοστά βάρους του υλικού που συγκρατούνται σε κάθε κόσκινο ή περνούν από κάθε κόσκινο εκφράζουν την κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού.Όταν τα διερχόμενα ποσοστά τοποθετηθούν ως τεταγμένες σε ένα διάγραμμα αξόνων με τετμημένη το

άνοιγμα βροχίδας του κοσκίνου και τεταγμένη το ποσοστό υλικού που περνά από αυτό το κόσκινο σχηματίζεται μια τεθλασμένη γραμμή που λέγεται κοκκομετρική καμπύλη υλικού.

Επειδή ένα αδρανές με διαστάσεις κόκκων που μεταβάλλονται σε ευρέα όρια εύκολα απομινύεται στις μεταφορές, τα αδρανή προσκομίζονται στα εργοτάξια σε κλάσματα κόκκων με μικρή σχετικά μεταβολή διαστάσεων. Τα πιο συνηθισμένα κλάσματα είναι η άμμος, το γαρμπίλι και τα σκύρα. Σε σκυροδέματα με ειδικές ιδιότητες χρησιμοποιούνται περισσότερα από τρία κλάσματα.

Από την κοκκομετρική διαβάθμιση του μίγματος των αδρανών του σκυροδέματος εξαρτώνται κυρίως η οικονομικότητα του σκυροδέματος, η εργασιμότητά του, οι μεταβολές όγκου και το μέτρο ελαστικότητας.

Άλλα χαρακτηριστικά των αδρανών που χρειάζονται σε ειδικές περιπτώσεις εφαρμογών είναι το ειδικό βάρος, το φαινόμενο βάρος, το πορώδες, ο συντελεστής θερμικής διαστολής, το μέτρο ελαστικότητας, κ.α.

Εκτός από τα συνηθισμένα αδρανή με ειδικό βάρος περίπου 2,65 υπάρχουν ακόμη :

α) Τα βαριά αδρανή, με ειδικό βάρος 3,5-4,5 περίπου. Σκυρόδεμα που παρασκευάζεται με βαριά αδρανή έχει την ικανότητα να απορροφά ακτίνες γ και μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε σταθμούς ατομικής ενέργειας.

β) Τα ελαφρά αδρανή που έχουν μεγάλο πορώδες. Φυσικά ελαφρά αδρανή είναι η ελαφρόπετρα και οι σκουριές υψικαμίνων, τεχνητά δε ο διογκωμένος περλίτης, η διογκωμένη άργιλος κ.α. Χρησιμοποιούνται σε θερμομονώσεις κτιρίων ή για την παρασκευή ελαφροσκυροδεμάτων.[1], [2]

1.3.4. Η ΜΟΡΦΗ ΤΩΝ ΚΟΚΚΩΝ

Οι κόκκοι των αδρανών δεν έχουν κανονική γεωμετρική μορφή αλλά τυχαία.

Χονδρικά μπορούμε να τους κατατάξουμε στις ακόλουθες κατηγορίες : στρογγυλούς, κυβοειδείς, γωνιώδεις, πλακοειδείς, επιμήκεις.

Το σχήμα ή η μορφή των κόκκων επηρεάζει, άσχετα από την επιρροή του μεγέθους, κατά ποικίλους τρόπους τις ιδιότητες του σκυροδέματος.

Επηρεάζει πρώτα – πρώτα το εργάσιμο με την εσωτερική τριβή τους. Οι σφαιρικοί κόκκοι δίνουν τη μεγαλύτερη εργασιμότητα γιατί έχουν μικρή γωνία τριβής. Η πολυγωνικότητα όμως των κόκκων , βελτιώνει τη στήριξη μεταξύ τους και την πρόσφυση με το κονίαμα. Γι'αυτό οι κυβοειδείς και οι πλακοειδείς κόκκοι αυξάνουν τη μηχανική αντοχή του σκυροδέματος. Για την επίτευξη του μέγιστου αποτελέσματος στο μίγμα του σκυροδέματος οι κόκκοι των αδρανών θα πρέπει να είναι σφαιρικής ή κυβοειδούς μορφής με γωνιώδη επιφάνεια.

Εξίσου σημαντικό είναι το μέγεθος των κόκκων για το σκυρόδεμα. Όσο αυξάνει η μέγιστη διάστασή τους , μειώνεται η επιφάνεια των αδρανών που είναι διαθέσιμη για συνάφεια και χρειάζεται λιγότερο τσιμέντο καθώς και λιγότερο νερό ,οπότε μειώνεται η αντοχή του σκυροδέματος. Επίσης πρέπει να υπάρχει κατάλληλη ποσότητα λεπτόκοκκου υλικού ,διότι αν είναι μικρότερη από την απαιτούμενη ,τα επιμέρους συστατικά του μίγματος τείνουν να διαχωριστούν. [1]

1.4. ΝΕΡΟ ΑΝΑΜΙΞΕΩΣ

Το τρίτο από τα βασικά συστατικά του σκυροδέματος είναι το νερό. Όπως με τα αδρανή έτσι και αυτό δεν πρέπει να περιέχει ουσίες που μπορούν να παραβιάσουν την ενυδάτωση του τσιμέντου .

Χαρακτηριστικό είναι όμως ότι οι διάφοροι Κανονισμοί διαφέρουν πάρα πολύ μεταξύ τους ως προς την αξιολόγηση του νερού και τις απαιτήσεις που θέτουν.

Αυτό ισχύει , γιατί η δράση των ουσιών μεταβάλλεται ανάλογα με την ποιότητα του τσιμέντου ,την ταυτόχρονη παρουσία και άλλων στοιχείων καθώς και τη χημική σύνθεση αυτών μέσα στο νερό. Η παρουσία οργανικών ουσιών δεσμεύει μέρος του ασβεστίου του τσιμέντου. Το μέγεθος της βλαπτικότητας όμως εξαρτάται και από την περιεκτικότητα του τσιμέντου σε ασβέστιο.

Για το νερό που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του σκυροδέματος μπορούμε να είμαστε περισσότερο ανεκτικοί ,παρά για τα νερά που δρουν

εξωτερικά και μόνιμα, διότι η ποσοστιαία αναλογία του νερού αναμείξεως, είναι μικρή και ακόμη οι ουσίες αυτές δρουν ώσπου να εξαντληθούν.

Οι κυριότερες από τις χημικές ουσίες που έχουν δυσμενή επίδραση στην εξέλιξη των χημικών αντιδράσεων είναι οι ακόλουθες :

α) Η ζάχαρη : Ο τρόπος με τον οποίο δρά δεν είναι τελείως γνωστός. Θεωρείται πάντως από τις πιο επιβλαβείς ουσίες, γιατί διακόπτει τελείως τη χημική αντίδραση ανάμεσα στο τσιμέντο και το νερό και έτσι εμποδίζει την πήξη του σκυροδέματος.

Η ελάχιστη ανεκτή ποσότητα ζάχαρης μέσα στο σκυρόδεμα είναι εξαιρετικά χαμηλή.

Αποτελέσματα μετρήσεων σε τσιμεντοκονιάματα δείχνουν, κάτω από κάποιο όριο, αύξηση της αντοχής ως 30%, ενώ από το όριο αυτό και πάνω γρήγορη διακοπή της ενυδατώσεως.

Το όριο όμως αυτό δεν είναι απόλυτα εξακριβωμένο, γιατί σε άλλες μετρήσεις έχει βρεθεί 0,25% κ.β. του τσιμέντου και σε άλλες 0,1% κ.β. του τσιμέντου.

β) Τα οξέα : Τα οξέα δεσμεύουν το ασβέστιο που είναι απαραίτητο για την πήξη. Η βλαπτικότητα του γίνεται περισσότερο αισθητή σε τσιμέντα με μικρή περιεκτικότητα σε ασβέστιο.

Ως μέτρο για την οξύτητα ή αλκαλικότητα του νερού χρησιμεύει όπως είναι γνωστό, η τιμή του PH, δηλ. η πυκνότητα των ιόντων του υδρογόνου που υπάρχουν στο νερό. Επικίνδυνο θεωρείται, γενικά, νερό με $PH < 4-6$

γ) Τα λάδια και λίπη : Δρουν μηχανικά περιβάλλοντας τους κόκκους του τσιμέντου και παρεμποδίζοντας μ' αυτό τον τρόπο την επαφή τους με τα μόρια του νερού. [1]

δ) Οι οργανικές ουσίες : Γενικά επηρεάζουν ανασταλτικά την πήξη.

Από διάφορα πειράματα που έγιναν, προέκυψε ως καταλληλότερο νερό το πόσιμο γιατί το σκυρόδεμα με αυτό το νερό εμφανίζει μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό και θλίψη από ότι το σκυρόδεμα που παρασκευάζεται με αποσταγμένο ή θαλασσινό νερό. [2], [3]

1.5. ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Ονομάζονται έτσι γιατί προστίθενται στη μάζα του σκυροδέματος και έχουν σκοπό να βελτιώσουν ορισμένες ιδιότητες του σκυροδέματος. Εκτός από τη βελτιωτική αυτή δράση έχουν όμως και άλλες δυσμενείς παρενέργειες που πρέπει να γνωρίζουμε.

Ανάλογα με την κύρια δράση τους τα πρόσθετα κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες : [2]

- ρευστοποιητικά
- αερακτικά
- επιβραδυντικά
- επιταχυντικά
- στεγανωτικά
- αντιπαγετικά

Εκτός από αυτά υπάρχουν και άλλα που όμως βρίσκονται ακόμη σε εργαστηριακό στάδιο ,όπως διογκωτικά αντιδιαβρωτικά κ.α.

Οι Κανονισμοί ορίζουν την απαιτούμενη ελάχιστη βελτιωτική δράση καθώς και το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο αλλοίωσης των άλλων ιδιοτήτων. Στην Ελλάδα υπάρχει το Σχέδιο Προδιαγραφής του ΤΕΕ/ΚΝΟ : 'Πρόσθετα μάζης σκυροδέματος' που δημοσιεύτηκε στα 'Τεχνικά Χρονικά' Από τους Κανονισμούς φαίνεται η δυσμενής επίδραση όλων σχεδόν των προσθέτων στη συστολή ξήρανσης.

1.5.1. ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΑ

Τα ρευστοποιητικά στηρίζονται στην ελάττωση της επιφανειακής τάσης του ύδατος και των δυνάμεων συνοχής μεταξύ των κόκκων του τσιμέντου. Προκαλούν συνήθως καθυστέρηση στην πήξη και αύξηση της συστολής. Επιτρέπουν την μείωση του νερού αναμίξεως με ταυτόχρονη αύξηση της εργασιμότητας ή διατήρησής της σταθερή. Η μείωση του νερού αναμίξεως προκαλεί αύξηση στην τελική αντοχή του σκυροδέματος. Επίσης με την προσθήκη πρόσθετου μπορεί να διατηρηθεί ο ίδιος λόγος Ν/Τ με το μίγμα σχεδιασμού αλλά να μειωθεί η ποσότητα του τσιμέντου. Έτσι δεν αλλάζει η

αντοχή του σκυροδέματος, αλλά προκύπτει σημαντική οικονομία στο τσιμέντο.[2], [3]

1.5.2. ΕΠΙΒΡΑΔΥΝΤΙΚΑ

Στηρίζονται συνήθως στην απομόνωση των ταχύπηκτων αργιλικών αλάτων και κυρίως του αργιλικού τριασβεστίου του τσιμέντου. Η αντοχή τις πρώτες μέρες εμφανίζεται αυξημένη ακριβώς λόγω της καθυστέρησης ενυδάτωσης των χαμηλής αντοχής αργιλικών ενώσεων. Χρησιμοποιούνται συνήθως στο έτοιμο σκυρόδεμα.

1.5.3. ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΙΚΑ

Αντίθετη δράση έχουν τα επιταχυντικά που διευκολύνουν την ενυδάτωση του αργιλικού τριασβεστίου ή των πυριτικών ενώσεων. Στην πρώτη περίπτωση η αντοχή εμφανίζεται μειωμένη. Το κυριότερο επιταχυντικό είναι το χλωριούχο ασβέστιο (CaCl_2). Η παρουσία όμως του χλωρίου είναι επικίνδυνη στη διάβρωση του σπλισμού. Άλλη δυσμενής επίδραση είναι η σύντομη έκλυση της θερμότητας ενυδάτωσης.[2]

1.5.4. ΑΕΡΑΚΤΙΚΑ

Τα αερακτικά είναι υλικά που προκαλούν την ανάπτυξη μικρών φυσαλίδων μέσα στο κονίαμα. Η ανάπτυξη φυσαλίδων σε μεγαλύτερο ποσοστό εφαρμόζεται και για τη δημιουργία ελαφρού σκυροδέματος. Η δημιουργία όμως φυσαλίδων εδώ έχει σκοπό να αυξήσει το εργάσιμο και την αντοχή στον παγετό, χωρίς ιδιαίτερη μείωση της θλιπτικής αντοχής.

Είναι ουσίες της ίδιας περίπου φύσεως με τα ρευστοποιητικά. Οι φυσαλίδες που δημιουργούνται είναι μεγέθους 0,02-0,2 mm και το συνολικό ποσοστό του αέρα που περικλείεται μέσα στο σκυρόδεμα κυμαίνεται μεταξύ 4 και 8 % κ.ο. περίπου.

Η συμβολή των φυσαλίδων στην προστασία κατά του παγετού είναι ότι χρησιμεύουν σαν χώροι διαστολής του νερού κατά την πήξη του.

Τα αερακτικά έχουν τις ίδιες περίπου συνέπειες με τα ρευστοποιητικά, γι'αυτό και στους Κανονισμούς αναγράφονται περιορισμοί σχετικά με τη συστολή, την πήξη κ.τ.λ.

1.5.5 ΣΤΕΓΑΝΟΠΟΙΗΤΙΚΑ

Η διέλευση του νερού μέσα από το σκυρόδεμα γίνεται είτε μέσα από τους τριχοειδείς πόρους του κονιάματος είτε από τις επιφάνειες επαφής κονιάματος και αδρανών είτε από τις μακροσκοπικές κοιλότητες που οφείλονται στην κακή συμπίκνωση και τις ρηγματώσεις που δημιουργούνται από τις μεταγενέστερες συστολοδιαστολές του υλικού.

Διακρίνουμε δύο τρόπους διέλευσης του νερού : την **απορρόφηση** του νερού που βρίσκεται σε απλή επαφή με τις μοριακές έλξεις του υλικού , όταν αυτό δεν είναι κορεσμένο με νερό, και τη **διείσδυση** του νερού με πίεση.

Η δράση των στεγανοποιητικών αποσκοπεί :

- α) στην αποφυγή μακροσκοπικών κοιλοτήτων και ρηγματώσεων
- β) στην ελάττωση του πορώδους
- γ) στη μείωση της συνάφειας ή στην ανάπτυξη υδραπωθητικών δυνάμεων μεταξύ τσιμεντοκονιάματος και νερού.

Είναι φανερό ότι για την πλήρη στεγανοποίηση πρέπει να πραγματοποιούνται και τα τρία αυτά και μάλιστα με τη σειρά που αναγράφονται. Γι'αυτό και η επιτυχία των στεγανοποιητικών εξαρτάται πολύ από την καλή εφαρμογή, καθώς και από τη σύγχρονη βελτίωση της ποιότητας του σκυροδέματος.

Πρέπει σ'αυτό το σημείο να τονιστεί ότι αν η προσθήκη του στεγανοποιητικού δημιουργήσει την εντύπωση ότι έτσι έχει ήδη εξασφαλιστεί η στεγανότητα χωρίς καμία περαιτέρω φροντίδα, είναι προτιμότερο να εγκαταλειφθεί.[1]

1.5.6. ΑΝΤΙΠΑΓΕΤΙΚΑ

Με αυτό τον όρο χαρακτηρίζονται πρόσθετα που έχουν σκοπό να μειώσουν τις δυσάρεστες επιπτώσεις του παγετού κατά την περίοδο της πήξης και επιτρέπουν έτσι τη σκυροδέτηση σε χαμηλές θερμοκρασίες.

Η δράση τους δεν έχει ως αποτέλεσμα την ταπείνωση του σημείου πήξης του νερού, αλλά τη βελτίωση άλλων ιδιοτήτων, που συντελούν στην αύξηση της αντοχής στον παγετό.

Τα περισσότερα από τα αντιπαγετικά που κυκλοφορούν στο εμπόριο είναι συνδυασμός αερακτικών, ρευστοποιητικών και επιταχυντικών.

Οι Γερμανικοί Κανονισμοί επιτρέπουν τα αντιπαγετικά μόνο στο άοπλο σκυρόδεμα και εφόσον λάβει κανείς υπόψη μειωμένη αντοχή και μεγαλύτερη συστολή, ενώ στο οπλισμένο και το προεντεταμένο σκυρόδεμα τα απαγορεύουν τελείως λόγω του κινδύνου διαβρώσεως του οπλισμού.[1]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΥΠΟ ΦΟΡΤΙΣΗ

ΑΝΤΟΧΗ- ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

2.1. Η ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ

2.1.1. ΟΡΙΣΜΟΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

Μια από τις βασικές ιδιότητες του σκυροδέματος είναι η αντοχή του. Αντοχή ονομάζουμε γενικά τη μέγιστη τιμή της δύναμews, που μπορεί να παραληφθεί και μεταβιβαστεί από ένα στοιχειώδες τμήμα του υλικού στο γειτονικό, χωρίς καταστροφή ή επικίνδυνη παραμόρφωσή του.

Στην Τεχνολογία όμως με τον όρο αντοχή εννοούμε γενικότερα και την ικανότητα του υλικού να αναλαβαίνει και να μεταβιβάζει δυνάμεις με οριακή τιμή την παραπάνω έννοια.

Αλλά η αντοχή εξαρτάται τόσο από τη φύση και την ποιότητα του υλικού, όσο και από την μορφή της εντατικής κατάστασης. Εμφανίζεται διαφορετική σε κάποια συγκεκριμένη καταπόνηση από ένα στοιχείο σε ένα άλλο και διαφορετική για το ίδιο στοιχείο, αν αυτή είναι αποτέλεσμα κάποιας άλλης εντατικής κατάστασης. Άρα η αντοχή δεν είναι σταθερή ιδιότητα του υλικού, αλλά αντοχή υλικού σε συγκεκριμένη εξωτερική καταπόνηση.[1]

2.1.2. ΕΙΔΗ ΑΝΤΟΧΗΣ

Ο Κ.Τ.Σ. (Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος) αναφέρεται στις εξής έννοιες για να περιγράψει την αντοχή του σκυροδέματος :

Χαρακτηριστική αντοχή σε θλίψη, f_{ck} είναι η αντοχή σε θλίψη κάτω από την οποία αναμένεται να βρεθεί το 5% των συμβατικών αντοχών του συνόλου των δοκιμίων που θα μπορούσαν να παρασκευαστούν από μια σημαντικά

μεγάλη ποσότητα σκυροδέματος, αν ολόκληρη αυτή η ποσότητα μετατρεπόταν σε δοκίμια.

- **Συμβατική αντοχή σε θλίψη δοκιμίου, f_{28}** είναι η αντοχή ενός συμβατικού δοκιμίου, δηλ. ενός δοκιμίου που έχει τις διαστάσεις και τη μορφή που προβλέπονται στον Κανονισμό και που παρασκευάζεται και συντηρείται σύμφωνα με τη μέθοδο ΣΚ-303 και ελέγχεται σύμφωνα με τη μέθοδο ΣΚ-304 σε ηλικία 28 ημερών.
- **Μέση αντοχή σκυροδέματος σε θλίψη, f_m** είναι ο μέσος όρος αντοχής όλων των συμβατικών δοκιμών που θα μπορούσαν να παρασκευαστούν από μια σημαντικά μεγάλη ποσότητα σκυροδέματος, αν ολόκληρη αυτή η ποσότητα μετατρεπόταν σε δοκίμια. Οι αναλογίες υλικών για την παρασκευή σκυροδέματος με μια ορισμένη μέση αντοχή, δίνονται από τη Μελέτη Σύνθεσης. Το σκυρόδεμα πρέπει να παρασκευάζεται σύμφωνα με τους παραπάνω ορισμούς με τα ίδια υλικά, τις ίδιες αναλογίες και τα ίδια μηχανικά μέσα.
- **Απαιτούμενη αντοχή σκυροδέματος σε θλίψη, f_a** είναι η τιμή της μέσης αντοχής για την οποία το σκυρόδεμα του έργου έχει μια συγκεκριμένη πιθανότητα αποδοχής. Οι αναλογίες υλικών της Μελέτης Συνθέσεως πρέπει να εξασφαλίζουν μέση αντοχή ίση τουλάχιστον με την απαιτούμενη.[3]

2.1.3. Η ΑΝΤΟΧΗ ΣΤΙΣ ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΜΟΡΦΕΣ ΚΑΤΑΠΟΝΗΣΩΝ

α) Στατική καταπόνηση

Οι θλιπτικές αντοχές που κατορθώνουμε να πετύχουμε κυμαίνονται μεταξύ 5 MPa και 65 MPa. Πολλές φορές όμως κατασκευάζουμε σκυρόδεμα με μεγαλύτερες αντοχές.

Η εφελκυστική αντοχή κυμαίνεται στο 1/10 ως 1/15 της θλιπτικής αντοχής. Δεν έχει βρεθεί άμεση αντιστοιχία μεταξύ εφελκυστικής και θλιπτικής αντοχής. Όσο αυξάνει όμως η θλιπτική αντοχή, αυξάνεται και η εφελκυστική, αλλά η αύξηση της εφελκυστικής αντοχής δεν είναι ανάλογη της θλιπτικής και

μάλιστα αυτή της εφελκυστικής γίνεται με βραδύτερο ρυθμό από την αντίστοιχη της θλιπτικής.

Ακόμη, η εφελκυστική αντοχή είναι πιο ευαίσθητη στη συντήρηση λόγω της άμεσης εξάρτησης του εφελκυσμού από την έκταση των μικρορηγματώσεων μέσα στο σκυρόδεμα.

β) Πολυαξονική καταπόνηση

Η συμπεριφορά του σκυροδέματος σε αυτή την καταπόνηση, ιδίως θλιπτική είναι γενικά παρόμοια με τη συμπεριφορά των άλλων υλικών. Πειράματα σε δυαξονική καταπόνηση έδειξαν ότι με σύγχρονη παρουσία ίσης εγκάρσιας θλιπτικής δύναμης η αντοχή σε θλίψη είναι αυξημένη κατά 14-19 % από την αντίστοιχη μονοαξονική θλιπτική αντοχή.

Η παρουσία εγκάρσιας εφελκυστικής τάσης μειώνει γρήγορα την αντοχή σε θλίψη κατά την άλλη διεύθυνση. Αντίθετα, σε περίπτωση εφελκυστικών τάσεων η τελική αντοχή σε εφελκυσμό δεν επηρεάζεται αισθητά.

γ) Καταπόνηση με μεγάλη διάρκεια

Σε περίπτωση καταπόνησης για μεγάλο χρονικό διάστημα η θλιπτική αντοχή μειώνεται βαθμιαία. Η μείωση είναι αρκετά έντονη τα πρώτα λεπτά ενώ μετά μειώνεται ανάλογα με τη διάρκεια της καταπόνησης.

δ) Επαναλαμβανόμενη καταπόνηση - Κόπωση

Η επαναλαμβανόμενη καταπόνηση μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη θραύση του υλικού, έστω και αν η μέγιστη τιμή τάσης δεν υπερβαίνει τη στατική αντοχή του υλικού. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται κόπωση.

Για να συμβεί όμως αστοχία, πρέπει η μέγιστη τάση να υπερβαίνει κάποιο όριο, που λέγεται όριο κόπωσης. Εδώ αναφερόμαστε σε θλιπτικές μόνο καταπονήσεις. Το όριο αυτό στο σκυρόδεμα βρίσκεται στα 0,65-0,7 της στατικής αντοχής σε θλίψη.

Και η ελαστική και η πλαστική παραμόρφωση αυξάνονται με την αύξηση του αριθμού των επαναλήψεων. Μεγαλύτερη είναι η παραμόρφωση κατά τη θραύση σε σχέση με τη στατική.[1]

2.1.4. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΘΡΑΥΣΗΣ

Έχει διαπιστωθεί ότι ασυνέχειες του υλικού, κυρίως ανάμεσα στα αδρανή και το κονίαμα υπάρχουν στη μάζα του σκυροδέματος ακομη και πριν από κάθε καταπόνηση. Οι μικρορωγμές αυτές δημιουργούνται κυρίως από τις συστολές της κονίας κατά την πήξη, από τις συστολές που οφείλονται στην εξάτμιση του νερού και άρα από κακή πρόσφυση μεταξύ κονιάματος και αδρανών. Οι ρωγμές παραμένουν περίπου σταθερές, εφόσον το φορτίο είναι το πολύ ίσο προς το $1/3$ του φορτίου θραύσης. Από την τιμή αυτή οι ρωγμές αρχίζουν να επεκτείνονται και πολλαπλασιάζονται γρήγορα μέχρι το φορτίο φτάσει τα $2/3$ του φορτίου θραύσης. Με αύξηση του φορτίου πέρα από την τιμή αυτή το πλέγμα των ρωγμών επεκτείνεται πάρα πολύ γρήγορα ως την κατάρρευση του υλικού. Αυτό το όριο συμπίπτει με το όριο διαρροής.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι στην ανομοιογένεια του υλικού πρέπει να συμπεριληφθούν και οι μικρορωγμές που υπάρχουν στο υλικό από την αρχή. Οι ρωγμές είναι διασκορπισμένες προς κάθε κατεύθυνση ώστε να μην δημιουργείται ετερογενής συμπεριφορά. Όταν επιβληθεί εξωτερικό φορτίο, οι τάσεις δεν κατανέμονται ομοιόμορφα και δημιουργούνται σημεία τοπικής συγκέντρωσης τάσεων. Από τα σημεία αυτά αρχίζει και η καταστροφή του υλικού. [1]

2.1.5. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΣΥΣΤΑΤΙΚΩΝ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΑΛΛΩΝ ΠΑΡΑΓΟΝΤΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ

2.1.5.1. Τσιμέντο

Η επίδραση του τύπου του τσιμέντου στην αντοχή εξαρτάται από την χημική σύσταση και τη λεπτότητα αυτού.

Σχετικά με τη χημική σύνθεση, το τσιμέντο που περιέχει μεγάλο ποσοστό πυριτικού τριασβεστίου ($C_3 S$) αποκτά αντοχή πιο γρήγορα από

αυτό που περιέχει πυριτικό διασβέστιο($C_2 S$).με την πάροδο του χρόνου όμως η διαφορά αυτή στην αντοχή μειώνεται.

Σε ό,τι αφορά τη λεπτότητα του τσιμέντου, αυξάνει με την αντοχή. Η αύξηση είναι εντονότερη τις πρώτες μέρες, ενώ αφού περάσουν 28 ημέρες η σχετική αύξησή της μειώνεται.

2.1.5.2. Αδρανή

Η αντοχή των αδρανών δεν επηρεάζει την αντοχή του σκυροδέματος, αφού τα αδρανή έχουν πιο μεγάλη αντοχή από τον τσιμεντοπολτό. Αυτή επηρεάζεται όμως από τη συνάφεια ανάμεσα στον τσιμεντοπολτό και τα αδρανή. Η αντοχή μειώνεται όταν η συνάφεια δεν είναι ικανοποιητική. Για να είναι καλή πρέπει τα αδρανή να είναι γωνιώδη και να έχουν τραχειά επιφάνεια. Επίσης πρέπει να είναι απαλλαγμένα από άλλες ουσίες στην επιφάνειά τους. Η αντοχή επηρεάζεται ακόμη και από το μέγεθος των κόκκων των αδρανών. Με σταθερό λόγο N/T και αύξηση του μεγέθους του κόκκου επέρχεται μείωση της αντοχής.

2.1.5.3. Νερό

Η περίσσεια του νερού αναμείξεως εκτός από αυτό που δεσμεύεται από το τσιμέντο, οδηγεί στην αύξηση του πορώδους στο σκυρόδεμα με αποτέλεσμα τη μείωση και της πυκνότητας και της αντοχής.

Όταν η τιμή του λόγου N/T ελαττωθεί πέρα από κάποια οριακή τιμή, η αντοχή αρχίζει να μειώνεται.

Σε περίπτωση που η ποσότητα του νερού είναι ανεπαρκής για την πλήρη ενυδάτωση του τσιμέντου, μέρος αυτού παραμένει αδρανές, με αποτέλεσμα να μειώνεται πάλι η αντοχή.[1], [3]

2.1.5.4. Πρόσθετα

Τα πρόσθετα υλικά επηρεάζουν την αντοχή του σκυροδέματος. Συγκεκριμένα τα επιταχυντικά, μειώνουν το ρυθμό πήξης και προσφέρουν

αυξημένη αρχική αντοχή, η οποία δεν διαφοροποιείται με την πάροδο του χρόνου. Τα επιβραδυντικά έχουν αντίθετη δράση, μειώνουν την αρχική αντοχή, η οποία αυξάνει με την πάροδο του χρόνου μέχρι να φθάσει την απαιτούμενη τιμή. Ακόμη τα ρευστοποιητικά μπορούν να αυξήσουν την αντοχή όταν η χρήση τους συνοδεύεται από μείωση της απαιτούμενης ποσότητας νερού.

Όμως η επίδρασή τους στην αντοχή του σκυροδέματος δεν είναι ακριβής αφού εξαρτάται από τη σύνθεση κάθε μίγματος και κάθε προσθέτου αλλά και από τις εξωτερικές συνθήκες.[3]

2.1.5.5. Επίδραση των μεθόδων παρασκευής

Πρέπει να δοθεί προσοχή στην ανάμιξη των υλικών στο χρόνο που χρειάζεται για την παρασκευή του σκυροδέματος. Αν η ανάμιξη δεν είναι πλήρης προκύπτει σκυρόδεμα γενικά χαμηλής αντοχής με μεγάλη ανομοιομορφία. Πρέπει ακόμη να προσεχθεί η συμπύκνωσή του, καθώς και η διάστρωσή του για να μην επέλθει εξίδρωση ή απόμιξη ή κάποιο άλλο δυσμενές φαινόμενο.[3]

2.1.5.6. Επίδραση της συντήρησης και των συνθηκών δοκιμής

Η συντήρηση του σκυροδέματος είναι απαραίτητη πριν τη χρήση του, για την ενυδάτωση του τσιμέντου. Προτιμάται να διατηρείται το σκυρόδεμα στο νερό για κάποιο χρόνο, γιατί αυξάνεται η τελική αντοχή του. Όταν αυτό όμως συντηρηθεί στον αέρα αποκτά τη μικρότερη αντοχή γιατί εξατμίζεται το ελεύθερο νερό.

Επίσης σημαντικό ρόλο παίζει η θερμοκρασία συντήρησης. Όσο η θερμοκρασία αυξάνει, ο ρυθμός ανάπτυξης της αντοχής επίσης αυξάνεται σε μικρές ηλικίες. Όμως κατά τη διάρκεια πήξης του σκυροδέματος η υψηλή θερμοκρασία μπορεί να έχει αρνητική επίπτωση στην αντοχή αυτού.[3]

Από την άλλη πλευρά οι συνθήκες όπου γίνονται οι μετρήσεις στην αντοχή του σκυροδέματος επηρεάζουν τα αποτελέσματά τους. Έτσι πρέπει

οι παραπάνω επιδράσεις να είναι γνωστές από πριν, για τη σωστή εκτίμηση των αποτελεσμάτων.

2.1.6. ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ

Η αντοχή είναι αποτέλεσμα της ενυδάτωσης του τσιμέντου και της δημιουργίας των ένυδρων χημικών ενώσεων του ασβεστίου C_3S , C_2S και αλουμινίου C_3A και επομένως η εξέλιξή της ακολουθεί τον ίδιο εκθετικό νόμο που ακολουθεί και η χημική αντίδραση. Όμως η ανάπτυξη της αντοχής διαφέρει για τα βασικά συστατικά του τσιμέντου γι' αυτό και η χρονική εξέλιξή της εξαρτάται από τη σύνθεση αυτού. Άλλοι παράγοντες είναι ο βαθμός αλέσεως του τσιμέντου, καθώς και οι υγρομετρικές και θερμοκρασιακές περιβαλλοντικές συνθήκες.

Για τους λόγους αυτούς, η ακριβής ποσοτική εκτίμηση της εξέλιξης της αντοχής, μπορεί να γίνει μόνο με δοκιμές με τον ίδιο τύπο τσιμέντου, τα ίδια υλικά και τις ίδιες συνθήκες συντήρησης.

Όταν αυτό δεν μπορεί να γίνει, οι Κανονισμοί προβλέπουν κάποιους συντελεστές που δίνουν ένδειξη του μεγέθους της αντοχής.[1]

2.1.7. ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

Επειδή η αντοχή εξαρτάται από το σχήμα και το μέγεθος του δοκιμίου και επηρεάζεται από πλήθος παραγόντων, καθορίζεται ένας συμβατικός τρόπος μέτρησης, ώστε τα αποτελέσματα των μετρήσεων να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους.

Για τους λόγους αυτούς καθορίζεται στους Κανονισμούς το σχήμα και οι διαστάσεις του δοκιμίου και περιγράφεται με λεπτομέρεια ο τρόπος παρασκευής, συντήρησης και μέτρησης της αντοχής.

Ο Ελληνικός Κανονισμός προβλέπει τη μέτρηση της αντοχής σε θλίψη, καθώς και τη μέτρηση σε καμπτικό εφελκυσμό. Για τη μέτρηση σε θλίψη καθορίζει δοκίμια κυβικά πλευράς 150 mm ή 200 mm. Εναλλακτικά ο Κ.Τ.Σ. προβλέπει ότι μπορούν να χρησιμοποιηθούν και κυλινδρικά δοκίμια $\Phi 150$ mm και ύψος 300 mm. Η μέτρηση της αντοχής γίνεται την 28^η ημέρα. Η

μέτρηση της καμπτικής αντοχής γίνεται σε δοκούς διαστάσεων 10x15x70 cm που θραύονται σε κάμψη, με ένα συγκεντρωμένο φορτίο στη μέση.

Αν για τον προσδιορισμό της αντοχής εφαρμοστεί άλλη μέθοδος ή χρησιμοποιηθούν δοκίμια άλλου σχήματος ή μεγέθους από αυτά που καθορίζει ο Κανονισμός, το αποτέλεσμα της μέτρησης μπορεί να αναχθεί στη συμβατική αντοχή, δηλ. στην αντοχή του δοκιμίου που καθορίζει ο Κανονισμός αλλά αυτό δεν επιτρέπεται να γίνει σε δοκίμια με τα οποία εξετάζεται η συμμόρφωση ή μη του σκυροδέματος.[1]

2.2. ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ

Την ελαστικοπλαστική συμπεριφορά ενός υλικού απεικονίζει το διάγραμμα τάσεων – παραμορφώσεων.

Για το σκυρόδεμα το διάγραμμα έχει τη μορφή μιας συνεχούς καμπύλης και μικρά μόνο τμήματα μπορούν να θεωρηθούν ευθύγραμμα.

Ο νόμος του Hook επομένως ισχύει για μικρές μεταβολές του φορτίου. Εξάλλου για μικρές μόνο τιμές του φορτίου μπορεί το σκυρόδεμα να θεωρηθεί σαν ελαστικό υλικό.

Η καμπυλότητα του διαγράμματος οφείλεται στην προοδευτική επέκταση των μικρορωγμών μέσα στο υλικό, εκτός από την κυρίως παραμόρφωση του υλικού.

Αν το φορτίο παραμείνει αρκετό χρονικό διάστημα, η παραμόρφωση συνεχίζεται βαθμιαία (ερπυσμός). Μετά την αφαίρεση του φορτίου τμήμα της παραμόρφωσης αναιρείται (ελαστική παραμόρφωση) ενώ το υπόλοιπο παραμένει (πλαστική παραμόρφωση). Με την πάροδο του χρόνου και μετά την αφαίρεση του φορτίου, η παραμόρφωση που παραμένει ελαττώνεται συνεχώς. Η μείωση των τάσεων που συνοδεύει τον ερπυσμό ονομάζεται χαλάρωση.

Μέτρο ελαστικότητας E ονομάζουμε, ως γνωστό το λόγο :

$$E = \sigma / \epsilon$$

δηλ. την κλίση της εφαπτομένης σε κάθε σημείο της καμπύλης. Άρα το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος δεν παραμένει σταθερό, αλλά μειώνεται συνεχώς όσο αυξάνει η καταπόνηση.

Διακρίνουμε :

Το **αρχικό** μέτρο ελαστικότητας E_0 στην αρχή των συντεταγμένων

Το **στιγμιαίο** μέτρο ελαστικότητας $E = d\sigma / d\epsilon$ που αντιστοιχεί στην τάση σ .

Το **μέσο** μέτρο ελαστικότητας $E = \sigma / \epsilon$ δηλ. την κλίση της χορδής που ενώνει την αρχή των συντεταγμένων με το σημείο της καμπύλης που αντιστοιχεί στην τάση σ .

Τέλος ως **συμβατικό** μέτρο ελαστικότητας ,για να συγκριθούν τα σκυροδέματα μεταξύ τους, χρησιμοποιείται το μέσο μέτρο ελαστικότητας που αντιστοιχεί στην τάση ίση με το $\frac{1}{4}$ της αντοχής.

Εκτός από τα παραπάνω υπάρχει και το μέτρο ελαστικότητας για την αποφόρτιση από τάση σ , το **δυναμικό** μέτρο ελαστικότητας , καθώς και αυτό για τα άλλα είδη καταπονήσεων, όπως ο εφελκυσμός.

Γενικά το μέτρο ελαστικότητας των αδρανών είναι διαφορετικό από το μέτρο ελαστικότητας του κονιάματος ,άρα διαφορετική είναι και η ανάληψη τάσεων από αυτά.

Για τα συνηθισμένα σκυροδέματα με ασβεστολιθικά αδρανή το μέτρο ελαστικότητας των αδρανών είναι μεγαλύτερο από αυτό του κονιάματος. Αντίθετα στην περίπτωση σκυροδέματος με ελαφρά αδρανή το μέτρο ελαστικότητας αυτών είναι μικρότερο από αυτό του κονιάματος και η εικόνα της ροής των τάσεων είναι διαφορετική.

Γενικά το μέτρο ελαστικότητας αυξάνεται όσο η θλιπτική αντοχή αυξάνεται.

Το μέγεθος της παραμόρφωσης και η τιμή του μέτρου ελαστικότητας, επηρεάζονται και από την ταχύτητα φόρτισης, αλλά και από όλες τις παραμέτρους που επηρεάζουν την αντοχή. [1]

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΙΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΔΕΝ ΠΡΟΚΑΛΟΥΝΤΑΙ ΑΠΟ ΦΟΡΤΙΟ - ΣΥΣΤΟΛΗ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Έχει παρατηρηθεί ότι με την πάροδο του χρόνου το σκυρόδεμα , χωρίς την επίδραση καμιάς εξωτερικής δύναμης, συστέλεται στον αέρα και διαστέλεται μέσα στο νερό. Τα φαινόμενα αυτά ονομάζονται χρόνια συστολή και διαστολή του σκυροδέματος.

Η συστολή αυτή στον αέρα δεν πρέπει να συγχέεται με τη συστολή της πήξεως που οφείλεται στη χημική δράση των ενεργών προϊόντων ούτε με τις ελαστικές ή πλαστικές παραμορφώσεις και τον ερπυσμό, που οφείλονται στη δράση εξωτερικών δυνάμεων. Το σκυρόδεμα δηλ. υφίσταται μεταβολές όγκου χωρίς την επιβολή φορτίου, αλλά μόνο λόγω μεταβολής της περιεχόμενης υγρασίας, Σχ.3.1. Τα αδρανή, εκτός σπανίων εξαιρέσεων, δεν παρουσιάζουν σημαντικές μεταβολές όγκου με την αυξομείωση της περιεχόμενης υγρασίας. Για τον λόγο αυτό οι μεταβολές όγκου οφείλονται κυρίως στον τσιμεντοπολτό. Τα αδρανή, αντίθετα, λόγω της μεγάλης αναλογίας τους 65-80 % κ.ο., μετριάζουν τις συνέπειες της μεταβολής του όγκου του τσιμεντοπολτού.[1],[5]

3.2 ΕΙΔΗ ΣΥΣΤΟΛΗΣ

Διακρίνονται 4 είδη συστολής, τα οποία έχουν ως κοινό χαρακτηριστικό ότι το αίτιο που την προκαλεί είναι η απώλεια υγρασίας από τη μάζα του σκυροδέματος. Αυτά είναι :

- Συστολή νωπού σκυροδέματος
- Συστολή πήξης – αυτογενής συστολή
- Συστολή ξήρανσης
- Συστολή από ενανθράκωση

3.2.1 ΣΥΣΤΟΛΗ ΝΩΠΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Είναι η συστολή που υφίσταται το σκυρόδεμα, όταν βρίσκεται ακόμα σε πλαστική κατάσταση. Οφείλεται στην απώλεια νερού, από την επιφάνειά του, λόγω εξάτμισης. Συστολή μπορεί επίσης να προκαλέσει και η απώλεια νερού από ισχυρή αναρρόφηση αυτού, κυρίως από τον πυθμένα αλλά και από τα πλάγια, λόγω απορροφητικών υλικών. Η συστολή αυτή έχει σαν αποτέλεσμα την ρηγμάτωση του σκυροδέματος επειδή στην κατάσταση αυτή δεν έχει αντοχή, ούτε και ικανότητα παραμορφώσεως. Η ρηγμάτωση αυτή είναι συνήθως επιφανειακή και σπανίως διατρέχει τη διατομή σε όλο το πάχος. Μάλιστα ενώ δεν έχει συνήθως σοβαρές συνέπειες στη στατική συμπεριφορά της διατομής, μπορεί να έχει σοβαρότατες συνέπειες στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος και την επιτελεστικότητα της κατασκευής, διότι αυξάνει την διαπερατότητα του σκυροδέματος. Χρειάζεται επομένως μεγάλη προσοχή γιατί μπορεί να προκληθεί διάβρωση του οπλισμού.

Όταν το νερό, που γεμίζει τα κενά μεταξύ των κόκκων του τσιμέντου και των λεπτόκοκκων αδρανών, αρχίζει να απομακρύνεται λόγω εξωτερικών επιδράσεων όπως εξάτμιση, δημιουργείται ένα πολύπλοκο σύστημα μηνίσκων, που εξασκούν ελκτικές δυνάμεις στους μικρούς κόκκους των στερεών Σχ.3.2. Οι ελκτικές δυνάμεις (τριχοειδείς πιέσεις) συστέλουν τη μάζα του πολτού που τελικά ρηγματώνεται γιατί η παραμόρφωση παρεμποδίζεται από τα κατώτερα στρώματα του σκυροδέματος που δεν παρουσιάζουν συστολή. Έτσι η ρηγμάτωση περιορίζεται σε ένα μικρό σχετικά βάθος. Ο μηχανισμός της είναι ανάλογος με αυτόν των αργιλικών εδαφών, κατά την ξήρανσή τους.

Η πλαστική συστολή είναι μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός εξάτμισης του νερού από το σκυρόδεμα. Η εξίδρωση, δηλ. η μετακίνηση νερού από τα κατώτερα στρώματα στην επιφάνεια, παρεμποδίζει ή επιβραδύνει την εμφάνιση των ρωγμών αφού αναπληρώνει το νερό που εξατμίζεται. Αντιθέτως, διάφοροι άλλοι παράγοντες που είναι εντονότεροι κατά τους θερινούς κυρίως μήνες, όπως η ταχύτητα ανέμου, η σχετική υγρασία και η θερμοκρασία περιβάλλοντος, αλλά και η θερμοκρασία σκυροδέματος, επηρεάζουν τον ρυθμό απώλειας νερού από το σκυρόδεμα

και μπορεί να επιταχύνουν τη συστολή και να προκαλέσουν έντονη ρηγμάτωση. Το διάγραμμα του Σχ.3.3 παρέχει τη δυνατότητα εκτίμησης της ταχύτητας εξάτμισης για δεδομένες περιβαλλοντικές συνθήκες. Όταν η ταχύτητα εξάτμισης υπερβεί ένα όριο, τότε η εξάτμιση γίνεται γρηγορότερα από την αναπλήρωση που προκαλεί η εξίδρωση και πρέπει να λαμβάνονται πρόσθετα μέτρα προστασίας του σκυροδέματος από εξάτμιση. Τα μέτρα αυτά μπορεί να είναι αποφυγή σκυροδέτησης όταν η θερμοκρασία είναι υψηλή, χρησιμοποίηση πετασμάτων για ανακοπή του ανέμου ή μείωση της θερμοκρασίας του σκυροδέματος με ψύξη των συστατικών του. Περισσότερο αποτελεσματική όμως είναι η κάλυψη της επιφάνειας με πλαστικά φύλλα ή με υλικό συντήρησης, ή ακόμα καλύτερα η συνεχής διαβροχή υπό μορφή λεπτότατων σταγονιδίων νερού, Σχ.3.4.

Είναι φανερό από την προηγούμενη ανάπτυξη ότι, ως προς την σύνθεση του σκυροδέματος οι παράγοντες που μειώνουν τη συστολή είναι εκείνοι που έχουν ως συνέπεια την μείωση της περιεκτικότητας του σκυροδέματος σε τσιμεντοπολτό (Σχ.3.5). Η πλαστική συστολή είναι μεγαλύτερη, όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό του τσιμέντου στο μίγμα και όσο μικρότερος είναι ο λόγος N/T . Αντίστοιχα, η συστολή νωπού σκυροδέματος είναι μικρότερη όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό των αδρανών κατ'όγκον. [5]

3.2.2 ΣΥΣΤΟΛΗ ΠΗΞΗΣ- ΑΥΤΟΓΕΝΗΣ ΣΥΣΤΟΛΗ (Ή ΕΝΔΟΓΕΝΗΣ)

Το άθροισμα των απολύτων όγκων νερού και τσιμέντου πριν την ενυδάτωση είναι μεγαλύτερο από τον όγκο των προϊόντων ενυδάτωσης, δηλ. από το άθροισμα των όγκων των στερεών του πηγματος και του όγκου του επιφανειακά δεσμευμένου νερού. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται χημική συστολή. Η διαφορά αυτή ανηγμένη στον αρχικό όγκο νερού και τσιμέντου δεν προκαλεί συστολή του όγκου του συμπυκνωμένου τσιμεντοπολτού, αλλά συμβάλλει στη δημιουργία τριχοειδών πόρων μέσα στη μάζα του, οι οποίοι είναι κενοί σε περίπτωση μη προσθήκης νερού ή απώλειάς του. Αυτό συμβαίνει μόνο όταν $N/T \leq 0,42$. Όταν $N/T > 0,42$ εκτός των τριχοειδών της χημικής συστολής θα σχηματισθούν και άλλοι τριχοειδείς πόροι, οι οποίοι

θεωρητικά είναι πλήρεις με νερό αλλά στην πραγματικότητα το νερό κατανέμεται σε όλους τους τριχοειδείς πόρους, είτε αυτοί προκαλούνται από χημική συστολή, είτε από περίσσεια νερού($N/T > 0,42$). Άρα ένα ποσοστό των πόρων είναι εν μέρει γεμάτο με νερό, οπότε αναπτύσσονται τριχοειδείς πιέσεις.

Κατά τη διάρκεια της ενυδάτωσης τσιμεντοπολτού ή σκυροδέματος με $N/T < 0,42$ το ποσοστό του τσιμέντου που έχει ήδη ενυδατωθεί, έχει δημιουργήσει τους τριχοειδείς πόρους της χημικής συστολής, οι οποίοι περιέχουν το νερό που ακόμη είναι ελεύθερο και δεν έχει χρησιμοποιηθεί για ενυδάτωση. Όσο όμως η ενυδάτωση προχωρεί και εφόσον δεν είναι δυνατή η πρόσδοση νερού στο σκυρόδεμα εξωτερικώς, το νερό από τα τριχοειδή αυτά αναλώνεται και τα τριχοειδή παύουν να είναι γεμάτα. Έτσι προκαλείται συστολή με μηχανισμό όμοιο με εκείνο της συστολής ξήρανσης.

Το φαινόμενο αυτό που είναι χαρακτηριστικό των σκυροδεμάτων με $N/T < 0,42$ ονομάζεται αυτογενής ή ενδογενής ξήρανση και έχει ως συνέπεια την αυτογενή ή ενδογενή συστολή. Διαφέρει από τη συστολή ξήρανσης ως προς το ότι για να λάβει χώρα δεν προϋποθέτει απώλεια νερού στο περιβάλλον(ξήρανση), αλλά κατανάλωση του υπάρχοντος στο μίγμα νερού για την ενυδάτωση του διαθέσιμου τσιμέντου. Άρα αφορά μόνο εκείνα τα μίγματα με $N/T < 0,42$, δηλ. τα σκυροδέματα με υψηλή αντοχή και επιτελεστικότητα, για εκείνες τις περιπτώσεις που δεν είναι δυνατόν να προσδοθεί εξωτερικώς νερό κατά τη συντήρηση, όπως π.χ. στο εσωτερικό κατασκευών μεγάλου όγκου σκυροδέματος.

Αντίθετα με τη συστολή ξήρανσης, η οποία είναι εντονότερη στα τμήματα εκείνα του σκυροδέματος στα οποία είναι μεγαλύτερη η απώλεια νερού, η αυτογενής συστολή αναπτύσσεται "ομοιόμορφα" σε όλη τη μάζα του σκυροδέματος. Η αυτογενής συστολή δεν προκαλεί συνήθως ρωγμές στην επιφάνεια του σκυροδέματος, όπως η συστολή ξήρανσης, αλλά μικρορωγμές στην διεπιφάνεια τσιμεντοπολτού και αδρανών λόγω ασυμβίβαστου των παραμορφώσεων. Οι ρωγμές αυτές, κατανεμημένες σε όλη τη μάζα του σκυροδέματος, μπορεί να έχουν σαν συνέπεια τη μείωση του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής και την ελάττωση της ανθεκτικότητας του υλικού.

Η συστολή του τσιμεντοπολτού περιορίζεται από τον στέρεο σκελετό του ήδη ενυδατωμένου τσιμέντου, καθώς και από τους κόκκους των αδρανών. Συνεπώς, η αυτογενής συστολή του σκυροδέματος είναι κατά μια τάξη μεγέθους μικρότερη από την συστολή του καθαρού τσιμεντοπολτού.

Είναι φανερό ότι η προστασία των σκυροδεμάτων με λόγο $N/T < 0,42$ με κάλυψη με μεμβράνη συντήρησης δεν είναι ικανή να αποτρέψει την αυτογενή συστολή και η μόνη μέθοδος για την αποφυγή της, ή την ελάττωσή της, τουλάχιστον όσον αφορά στα επιφανειακά στρώματα του σκυροδέματος, είναι η συντήρηση με συνεχή τροφοδοσία εξωτερικώς με νερό (συνεχής διαβροχή ή πλημμύρισμα)

Στα σχήματα 3.6 και 3.7 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ενυδάτωσης τσιμεντοπολτού, με διάφορους λόγους N/T . Στο Σχ.3.6 η ενυδάτωση έγινε χωρίς τη δυνατότητα πρόσδοσης νερού εξωτερικά, ενώ στο Σχ.3.7 η ενυδάτωση έγινε με συνεχή τροφοδοσία νερού από το περιβάλλον. Από το Σχ.3.6 γίνεται φανερό ότι, εφόσον δεν υπάρχει δυνατότητα πρόσδοσης νερού από το περιβάλλον στη μάζα του πλήρως ενυδατωμένου πηγματος, θα υπάρχουν άδεια τριχοειδή. Κατά τη διάρκεια όμως της ενυδάτωσης, τα τριχοειδή περιέχουν εν μέρει νερό με αποτέλεσμα να αναπτύσσονται τάσεις συστολής, άρα ρηγμάτωση. Αντίθετα στην περίπτωση του Σχ.3.7 λόγω της δυνατότητας πλήρωσης των κενών εξωτερικώς με νερό δεν αναπτύσσονται τάσεις συστολής και αποφεύγεται η ρηγμάτωση.[5]

3.2.3 ΣΥΣΤΟΛΗ ΞΗΡΑΝΣΗΣ

Πρόκειται για ένα πολύ σημαντικό φαινόμενο που συνδέεται άμεσα με μετακινήσεις του νερού που περιέχεται στη μάζα του τσιμεντοπολτού υπο την επίδραση ξήρανσης. Πρόκειται για τη μείωση του όγκου του σκυροδέματος που προκαλείται από φυσική απώλεια νερού κατά την διάρκεια της σκλήρυνσης και της διαδοχικής έκθεσης σε μη επαρκώς υγρό περιβάλλον. Ο ρυθμός της συστολής αυτής είναι αρχικά μεγάλος, ενώ συνεχίζεται για εκτεταμένο χρόνο αλλά με συνεχώς μειωμένο ρυθμό. Οι προκύπτουσες μεταβολές όγκου μπορούν να δημιουργήσουν ρωγμές όπου το σκυρόδεμα δεν είναι ελεύθερο να παρακολουθήσει τη συστολή.

Στο Σχ.3.3 παρουσιάζονται γενικά τα αποτελέσματα της μεταβολής της υγρασίας μέσα στον τσιμεντοπολτό / σκυρόδεμα. Η απώλεια υγρασίας έχει σαν αποτέλεσμα τη συστολή, ενώ η αύξηση της υγρασίας τη διαστολή (διόγκωση). Παρατηρείται ότι ένα σημαντικό μέρος της συνολικής συστολής, η οποία λαμβάνει χώρα κατά την πρώτη ξήρανση, είναι μη αναιρέσιμο. Οι αιτίες που προκαλούν το μη αναιρέσιμο μέρος της συστολής ξήρανσης δεν είναι τελείως γνωστές. Πιστεύεται ότι αυτό είναι συνέπεια μίας ή περισσοτέρων από τις ακόλουθες μεταβολές που λαμβάνουν χώρα όταν το σκυρόδεμα υφίσταται την πρώτη απώλεια υγρασίας :

- μεταβολή στην κατανομή των πόρων του τσιμεντοπολτού
- μεταβολή στους δεσμούς μεταξύ των κόκκων C-S-H
- μεταβολή στη διάταξη των κόκκων C-S-H λόγω αλλαγών στην κατανομή του νερού μέσα στο σύστημα των C-S-H

Ο βαθμός ενυδάτωσης, επομένως, επηρεάζει το μη αναιρέσιμο μέρος της συστολής αφού όσο πιο ολοκληρωμένος είναι όταν αρχίσει η ξήρανση του σκυροδέματος τόσο το μη αναιρέσιμο τμήμα είναι μικρότερο, διότι η δομή του πηγματος είναι πιο ολοκληρωμένη και επομένως πιο ευσταθής. Μετά την πρώτη ξήρανση η συστολή δεν παρουσιάζει μη αναιρέσιμο τμήμα και οι μεταβολές όγκου που γίνονται με ύγρανση (διόγκωση), ή με ξήρανση(συστολή), είναι μικρότερες. Του γεγονότος αυτού μπορεί να γίνει κατάλληλη εκμετάλευση στη βιομηχανία προκατασκευασμένων στοιχείων για να επιτευχθεί μεγαλύτερη σταθερότητα όγκου των προϊόντων.

Στο Σχ.3.4 παρουσιάζεται η μεταβολή της συστολής ως συνάρτηση της απώλειας του νερού από τσιμεντοπολτό, η οποία εκφράζεται ως απώλεια βάρους % του τσιμέντου. Στο ίδιο σχήμα φαίνεται, επίσης, και το περιβάλλον στο οποίο τοποθετήθηκε ο τσιμεντοπολτός. Παρατηρούνται 5 περιοχές σχεδόν γραμμικής συσχέτισης απώλειας βάρους % και συστολής. Οι τρεις πρώτες αφορούν περιβάλλοντα στα οποία το σκυρόδεμα μπορεί να βρεθεί στην πράξη, ενώ οι δύο τελευταίες αφορούν σπάνιες περιπτώσεις παρατεταμένης έκθεσης του σκυροδέματος σε εξαιρετικά χαμηλές σχετικές υγρασίες όπως π.χ. πυρκαγιά. Οι περιοχές 1 και 2 αφορούν απώλεια νερού από τους τριχοειδείς πόρους του τσιμεντοπολτού, η περιοχή 3 αφορά απώλεια νερού από το νερό που είναι επιφανειακά δεσμευμένο στις επιφάνειες των κόκκων ένυδρων ασβεστοπυριτικών ενώσεων C-S-H, η

περιοχή 4 αφορά απώλεια νερού από χημικά δεσμευμένο νερό του πηγματος και η περιοχή 5 αφορά τη θερμική/χημική αποσύνθεση του πηγματος.

Το φαινόμενο της συστολής ξήρανσης δεν ερμηνεύεται κατά ενιαίο τρόπο από όλους τους ερευνητές. Δύο είναι οι κυριότερες ερμηνείες της επίδρασης του νερού για υγρασίες από 100% έως 40% : η θεωρία της πίεσης των τριχοειδών και η θεωρία της πίεσης διαχωρισμού. Επίσης, δυο είναι οι ερμηνείες της επίδρασης του νερού για υγρασίες < 40% : η θεωρία της επιφανειακής τάσης και η θεωρία της απομάκρυνσης του προσροφημένου νερού.

Στο Σχ.3.4 παρατηρείται ότι, στην περιοχή 1 η κλίση της γραμμής είναι σχετικά μικρή, γεγονός που υποδεικνύει ότι στην περιοχή 1 η κλίση της γραμμής είναι σχετικώς μικρή, γεγονός που υποδηλώνει ότι η συστολή είναι μικρή σε σχέση με την απώλεια νερού, ενώ στην περιοχή 2 η κλίση είναι μεγαλύτερη, γεγονός που υποδηλώνει ότι για την ίδια απώλεια νερού η συστολή είναι σημαντικά μεγαλύτερη. Κατά τη θεωρία της πίεσης των τριχοειδών, αποδίδεται στο ότι στο πρώτο στάδιο εξατμίζεται το νερό των πόρων με σχετικώς μεγάλη διάμετρο, αλλά η αναπτυσσόμενη τάση θλίψης στα στερεά του τσιμεντοπολτού δεν είναι τόσο μεγάλη ώστε να προκαλέσει σημαντική συστολή, ενώ αντιθέτως στην περιοχή 2 η εξάτμιση αφορά πόρους μικρότερης διαμέτρου, οπότε η ποσότητα του εξατμιζόμενου νερού είναι μεν μικρότερη αλλά οι πιέσεις που προκαλούνται από τους μηνίσκους των τριχοειδών είναι σημαντικά μεγαλύτερες και επομένως η συστολή είναι επίσης μεγαλύτερη. Η συστολή ξήρανσης μπορεί να αποδοθεί στις αναπτυσσόμενες πιέσεις των τριχοειδών για ξήρανση σε περιβάλλον σχετικής υγρασίας μέχρι 40-50% . Στα επίπεδα αυτών των σχετικών υγρασιών θεωρείται ότι το νερό έχει εξατμιστεί από όλα τα τριχοειδή, τα οποία είναι πλέον άδεια και δεν ασκείται καμία θλιπτική δύναμη στα στερεά του πηγματος.

Η συστολή στις περιοχές 1 και 2 μπορεί να αποδοθεί ακόμη, στο φαινόμενο της πίεσης διαχωρισμού. Σύμφωνα με το φαινόμενο αυτό, το νερό που είναι επιφανειακά δεσμευμένο – προσροφημένο στις επιφάνειες των στερεών του πηγματος εξαρτάται από τη θερμοκρασία και την σχετική υγρασία που επικρατεί(νόμος Kelvin). Το πάχος του υμένα που μπορεί να

προσροφηθεί, φθάνει ένα μέγιστο το οποίο ισούται με πάχος 5 μορίων. Αν η απόσταση μεταξύ δυο γειτονικών κόκκων είναι μικρότερη από αυτή που η σχετική υγρασία και η θερμοκρασία καθορίζει, το νερό, που θα προσροφηθεί τελικά, θα είναι αυτό που επιβάλλει η γεωμετρία(λιγότερο) και επομένως θα βρίσκεται υπό πίεση, η οποία ονομάζεται πίεση διαχωρισμού ή πίεση διόγκωσης διότι ωθεί τους κόκκους σε απομάκρυνση μεταξύ τους έτσι ώστε να μπορέσει να προσροφηθεί η κανονική ποσότητα. Στην πίεση διαχωρισμού αντιτάσσονται οι δυνάμεις Van der Waals, οι οποίες έλκουν τους κόκκους μεταξύ τους. Όσο η σχετική υγρασία αυξάνει τόσο η πίεση αυτή αυξάνει και επιτυγχάνει απομάκρυνση των κόκκων μεταξύ τους και επομένως δημιουργεί διόγκωση. Το αντίθετο συμβαίνει με τη μείωση της σχετικής υγρασίας.

Σε περιβάλλοντα μικρότερης σχετικής υγρασίας (περιοχή 3) αρχίζει η εξάτμιση του νερού, το οποίο είναι επιφανειακά δεσμευμένο στις επιφάνειες των κόκκων C-S-H. Λόγω των υψηλών δεσμών μεταξύ του νερού αυτού και των επιφανειών των στερεών του πηγματος, το νερό δεν συμπεριφέρεται ως ελεύθερο νερό και δεν ισχύουν τα τριχοειδή φαινόμενα. Η απώλεια επιφανειακά δεσμευμένου νερού προκαλεί αύξηση της επιφανειακής ενέργειας των στερεών C-S-H. Η επιφανειακή αυτή ενέργεια επιβάλλει στους κόκκους θλιπτικές τάσεις κάθετες προς την επιφάνεια των κόκκων, οι οποίες δίνονται για την περίπτωση σφαιρικών κόκκων από τη σχέση :

$$p = 2T/R$$

Αυτό γίνεται άμεσα αντιληπτό από το Σχ.3.5, στο οποίο παρουσιάζονται σχηματικά οι δυνάμεις που δέχεται ένα μόριο A στο εσωτερικό ενός σώματος και ένα μόριο B στην επιφάνεια του σώματος. Η συνισταμένη δύναμη F στο σημείο B δρα κάθετα στην επιφάνεια. Όταν υπάρχει προσροφημένο νερό στην επιφάνεια του στερεού, τότε, ανάλογα με το πάχος του προσροφημένου υμένα, θα αναπτυχθούν δυνάμεις έλκουσες το μόριο B προς τα πάνω και επομένως η θλιπτική δύναμη F θα ελαττωθεί. Οπότε όσο το πάχος του προσροφημένου υμένα ελαττώνεται, τόσο αυξάνει η επιφανειακή ενέργεια και η θλιπτική τάση. Τα μεγέθη αυτά λαμβάνουν τις μέγιστες τιμές τους όταν σε επαφή με την επιφάνεια δεν υπάρχει νερό, αλλά μόνο αραιοί υδρατμοί και θεωρητικά όταν υπάρχει κενό.

Για τα στερεά του C-S-H, που έχουν κολλοειδείς δαστάσεις, η επιφανειακή ενέργεια θεωρείται ότι επιβάλλει θλιπτικές τάσεις της τάξης των 250 Μpa και κάθε μεταβολή της επιφανειακής τάσης T θα επιφέρει σημαντική μεταβολή στη θλιπτική τάση p , γεγονός που θα προκαλέσει και αντίστοιχες μεταβολές στις παραμορφώσεις των στερεών. Ο μηχανισμός αυτός μπορεί να ερμηνεύσει την συστολή ξήρανσης, για χαμηλές τιμές της σχετικής υγρασίας(περιοχή 3).

Κατά μία άλλη θεωρία, η συμβολή της επιφανειακής θλιπτικής τάσης στη συστολή είναι μικρή και η συστολή στην περιοχή 3 θα πρέπει να αποδοθεί στην απώλεια του προσροφημένου νερού, το οποίο εκ νέου προσροφούμενο προκαλεί διόγκωση. Η ελεύθερη όμως είσοδος και έξοδος του προσροφημένου νερού(επιφανειακά δεσμευμένου νερού) δεν γίνεται αποδεκτή σε άλλες θεωρίες, σύμφωνα με τις οποίες το επιφανειακά δεσμευμένο νερό που εκφεύγει δεν μπορεί να επανέλθει διότι τα στερεά του πηγματος έχουν λάβει εν τω μεταξύ άλλη πιο σταθερή διάταξη, την οποία το νερό δεν μπορεί να διαταράξει εισερχόμενο μεταξύ των στερεών.

Στο Σχ.3.6α φαίνεται η κατανομή της υγρασίας στη μάζα του σκυροδέματος σε συνάρτηση με το χρόνο ενώ στο Σχ.3.6β φαίνεται η προκαλούμενη συστολή ξήρανσης και η ρηγμάτωση του φλοιού του σκυροδέματος που είναι αποτέλεσμα της ανάπτυξης εφελκυστικών τάσεων στο φλοιό και θλιπτικών τάσεων στο εσωτερικό της μάζας.

Τόσο η συστολή όσο και ο ερπυσμός είναι φαινόμενα τα οποία συνδέονται άμεσα με μετακινήσεις γενικά του νερού στη μάζα του τσιμεντοπολτού, είτε αυτές προκαλούνται από εξωτερικό φορτίο(ερπυσμός), είτε υπό την επίδραση ξήρανσης ή διύγρανσης(συστολή-διόγκωση), δηλ. πρόκειται για το ίδιο φαινόμενο που προκαλείται από διαφορετικές αιτίες. Επομένως οι παράγοντες που επηρεάζουν τον ερπυσμό και τη συστολή μπορούν να εξετάζονται μαζί.

Στα Σχ.3.7, 3.8, 3.9 και 3.10 παρουσιάζεται η επίδραση της σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντος(Σχ.3.7), του μέτρου ελαστικότητας των αδρανών(Σχ.3.8) και της περιεκτικότητας των αδρανών(Σχ.3.9,3.10) στη συστολή ξήρανσης του σκυροδέματος.

Σε περίπτωση που δεν ληφθεί υπόψη κατά τον σχεδιασμό και την κατασκευή ενός έργου η συστολή ξήρανσης, μπορεί να προκληθούν όπως

ήδη αναφέρθηκε, ανεπιθύμητες ρηγματώσεις. Η πρόβλεψη όμως για παράδειγμα, αρμών διαστολής σε οδοστρώματα, πλάκες και δάπεδα είναι μια προσπάθεια αποφυγής της. Οι αρμοί αυτοί αποτρέπουν την τυχαία και ακανόνιστη ρηγμάτωση και την περιορίζουν σε κάποιες επιθυμητές διευθύνσεις, ώστε να μπορέσουν εν τω μεταξύ εύκολα να καλυφθούν.[5],[6]

3.2.4 ΣΥΣΤΟΛΗ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ

Το σκυρόδεμα εκτός από τη συστολή λόγω ξήρανσης υφίσταται και συστολή λόγω ενανθράκωσης. Ο μηχανισμός των δύο φαινομένων είναι τελείως διαφορετικός παρόλο που πολλά πειραματικά στοιχεία αναφέρονται και στους δύο τύπους συστολής.

Ενανθράκωση είναι το φαινόμενο της αντίδρασης του CO_2 του περιβάλλοντος με το ενυδατωμένο τσιμέντο(πήγμα) κατ' αρχήν με το Ca(OH)_2 με σχηματισμό CaCO_3 και στη συνέχεια με τις ένυδρες ασβεστοπυριτικές ενώσεις C-S-H. Και στις δύο περιπτώσεις ακολουθεί η απώλεια ή απελευθέρωση νερού από τη στερεά μάζα του πηγματος.

Η δράση του CO_2 γίνεται ακόμα και για μικρές συγκεντρώσεις του, όπως για παράδειγμα στο ύπαιθρο όπου το ποσοστό είναι περίπου 0,03% κ.ο. Σε περιβάλλον μη αεριζόμενου εργαστηρίου, το ποσοστό του CO_2 είναι 0,1% αλλά και περισσότερο, ενώ στις μεγαλουπόλεις είναι περίπου 0,3%, φθάνοντας κάποιες φορές το 1%. Μεγάλα ποσοστά υπάρχουν σε χώρους με καυσάερια, όπως κλειστοί χώροι στάθμευσης αυτοκινήτων.

Η παρουσία υγρασίας έχει μεγάλη επιρροή στην ενανθράκωση. Πολύ μικρή υγρασία (< 25%) δεν ευνοεί την ενανθράκωση γιατί το νερό των πόρων του πηγματος δεν αρκεί για να σχηματίσει με το CO_2 ανθρακικό οξύ που είναι το πρώτο βήμα για την αντίδραση με το Ca(OH)_2 για σχηματισμό CaCO_3 . Αντίθετα, σε περίπτωση πολύ μεγάλης υγρασίας το CO_2 πρέπει να διαχυθεί μέσα στο νερό και αυτό είναι μια χρονοβόρα διαδικασία. Επίσης, στην περίπτωση υψηλών ποσοστών περιεχόμενης υγρασίας το αρχικά σχηματιζόμενο CaCO_3 μπορεί να φράσσει τους πόρους και να εμποδίζει την περαιτέρω διείσδυση του CO_2 .

Γενικά ο βαθμός ενανθράκωσης εξαρτάται από τη διαπερατότητα του σκυροδέματος, το ποσοστό υγρασίας του, το ποσοστό του CO_2 και τη σχετική υγρασία και θερμοκρασία του εξωτερικού περιβάλλοντος.

Αύξηση της συγκέντρωσης του CO_2 αυξάνει και το ρυθμό ενανθράκωσης. Σχετικά με τη θερμοκρασία, η άνοδός της επιταχύνει την ενανθράκωση μέχρι κάποιο σημείο, ενώ ύστερα η υπερβολική ξήρανση μειώνει τον ρυθμό ενανθράκωσης.

Όπως αναφέρθηκε ένας βασικός παράγοντας που ελέγχει την ενανθράκωση είναι η διαπερατότητα του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού. Η διαπερατότητα εξαρτάται από τον τύπο του τσιμέντου, τον βαθμό ενυδάτωσης, αλλά κυρίως από τον λόγο N/T και την μέθοδο συντήρησης. Ένα σκυρόδεμα με υψηλό λόγο N/T και ανεπαρκώς συντηρημένο είναι περισσότερο επιρρεπές στην ενανθράκωση. Επίσης η αντίσταση στην ενανθράκωση βελτιώνεται όσο αυξάνει η αντοχή του σκυροδέματος.

Για σταθερές υδρομετρικές συνθήκες, το βάθος της ενανθράκωσης αυξάνεται ανάλογα με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου σύμφωνα με τη σχέση : $D=K t^{0.5}$

όπου, D : το βάθος ενανθράκωσης σε mm

K : συντελεστής ενανθράκωσης σε mm/έτος

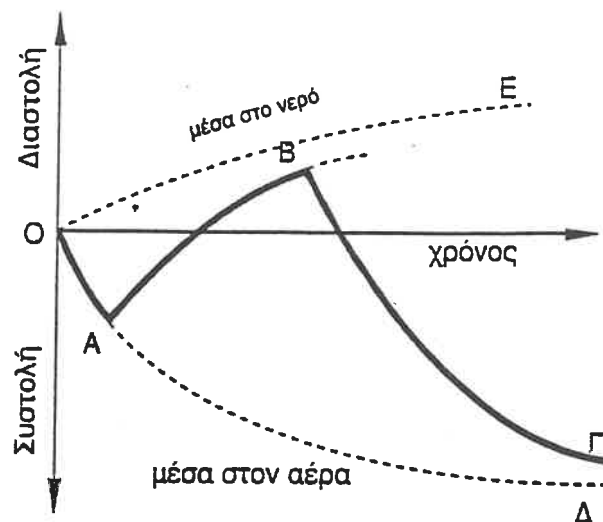
t : χρόνος έκθεσης σε έτη

Η έκταση της ενανθράκωσης μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί με την θραύση του σκυροδέματος και αμέσως μετά με τον ψεκασμό του θραύσματος με διάλυμα 1gr φαινολοφθαλείνης και 50 ml αλκοόλης σε 100ml νερού. Το ελεύθερο Ca(OH)_2 χρωματίζεται ροζ- μωβ, ενώ το ενανθρακωμένο μέρος παραμένει άχρωμο.

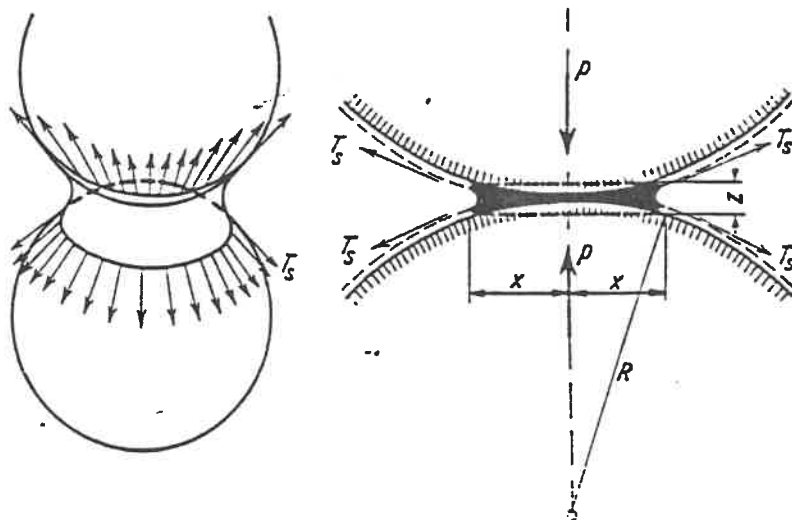
Η ενανθράκωση του κοινού σκυροδέματος μπορεί να έχει και κάποιες θετικές συνέπειες. Η αντικατάσταση του Ca(OH)_2 από το CaCO_3 , έχει ως συνέπεια τη μείωση του πορώδους, λόγω του ότι το CaCO_3 καταλαμβάνει μεγαλύτερο όγκο και κατακάθεται στα κενά του τσιμεντοπολτού. Ακόμη, το νερό που απελευθερώνεται από την αποσύνθεση του Ca(OH)_2 κατά την ενανθράκωση επιταχύνει τη διαδικασία της ενυδάτωσης. Τα παραπάνω έχουν ως συνέπεια μια μικρή αύξηση της αντοχής και μείωση της διαπερατότητας του ενανθρακωμένου σκυροδέματος. Σημαντικό είναι επίσης ότι με την ενανθράκωση εξουδετερώνεται η αλκαλική φύση του

ενυδατωμένου τσιμεντοπολτού λόγω του Ca(OH)_2 που ελευθερώθηκε κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου.

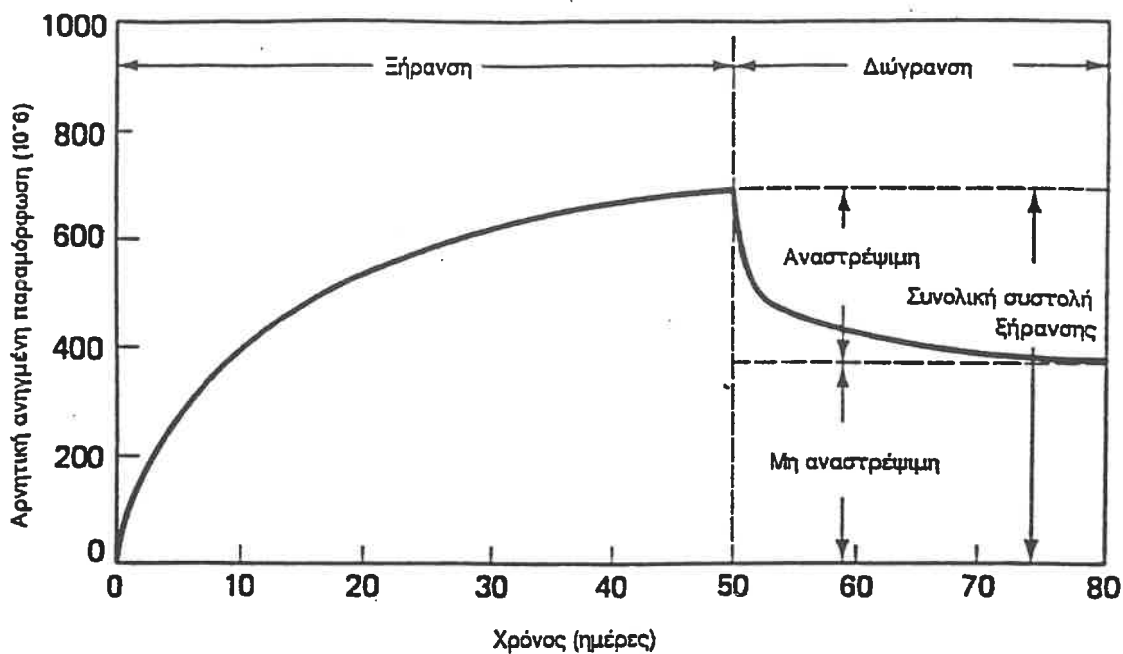
Πάντως η ταυτόχρονη ξήρανση και ενανθράκωση προκαλεί μικρότερη συνολική συστολή, από ό,τι στην περίπτωση που η ενανθράκωση ακολουθεί της ξηράνσεως γιατί στην πρώτη περίπτωση το πιο μεγάλο μέρος της ενανθράκωσης γίνεται με σχετικές υγρασίες πάνω από 50% , δηλ. σε συνθήκες μειωμένης συστολής ενανθράκωσης.[5],[6]



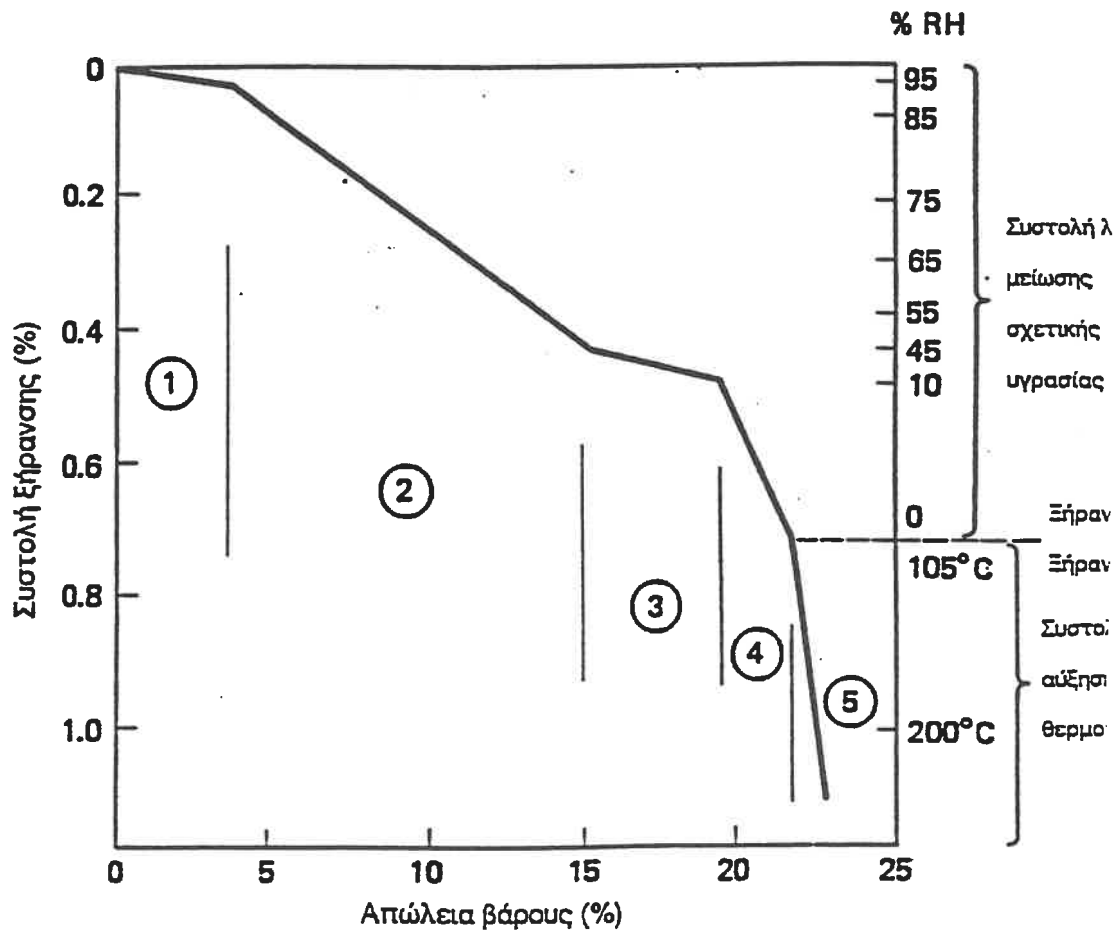
Σχ.3.1. Σχηματική μεταβολή της συστολής (ή διαστολής) του σκυροδέματος με το χρόνο



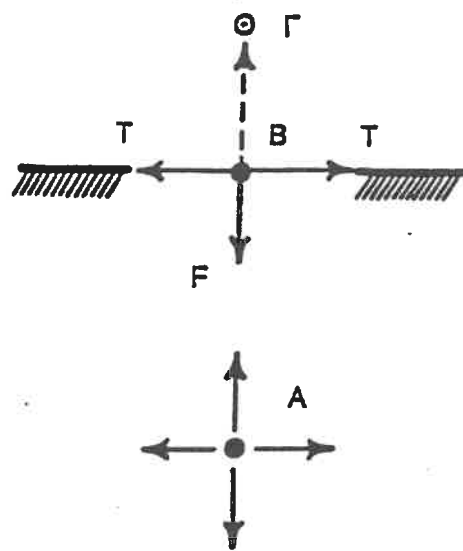
Σχ.3.2. Δράση επιφανειακών τάσεων που αναπτύσσονται μεταξύ δύο κόκκων στερεού υλικού.



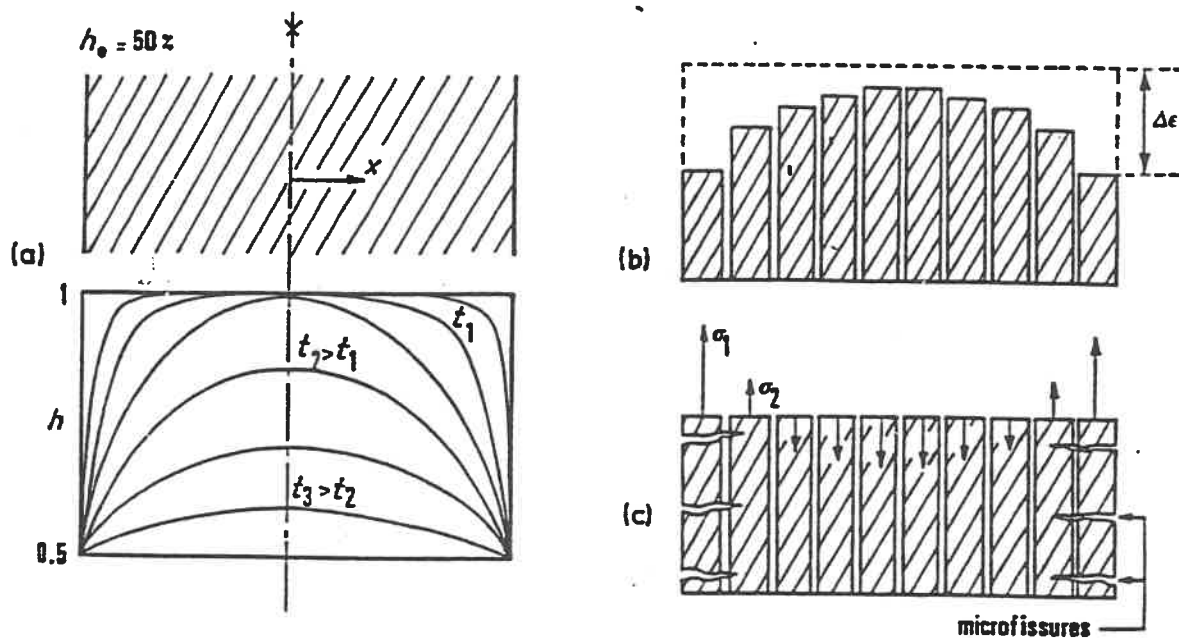
Σχ.3.3. Τυπική συμπεριφορά σκυροδέματος κατά την ξήρανση και διύγρανσή του.



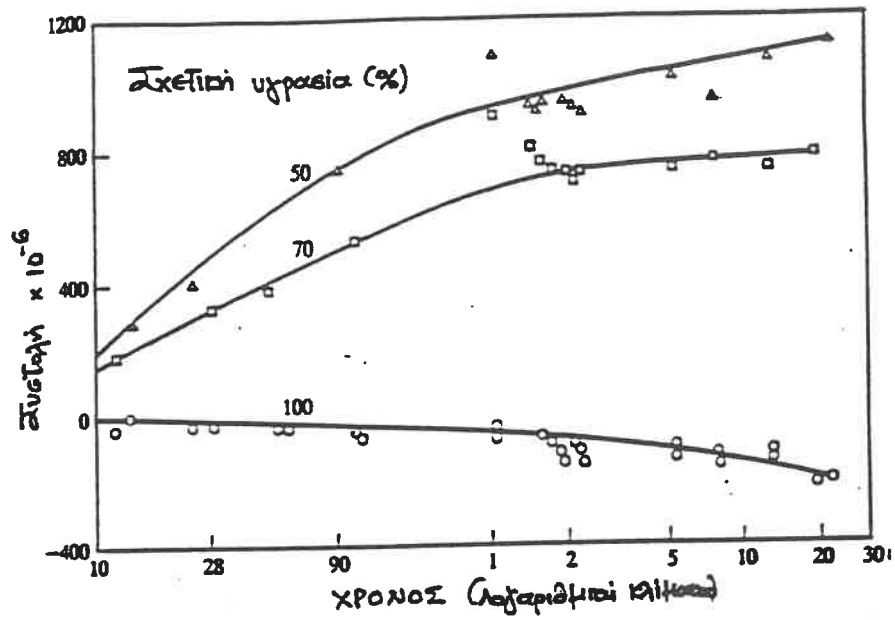
Σχ. 3.4. Σχέση μεταξύ συστολής ξήρανσης και απώλειας βάρους (απώλεια νερού) καθαρού τσιμεντοπολτού, κατά τη διάρκεια ξήρανσής του.



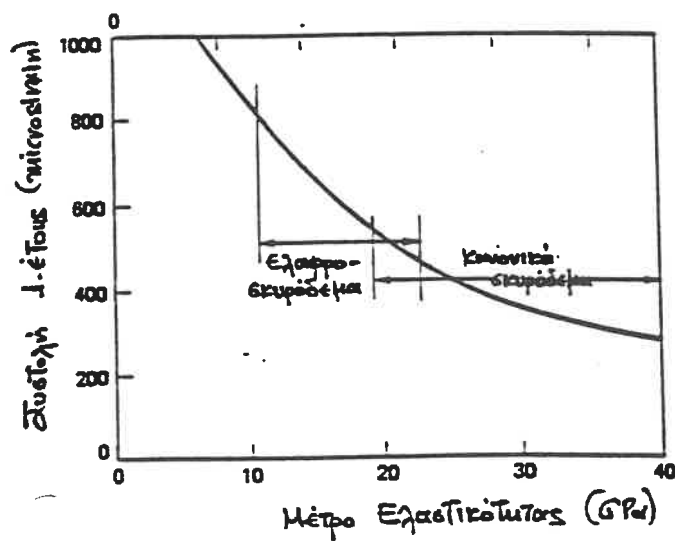
Σχ.3.5. Σχηματική παράσταση επιφανειακών τάσεων



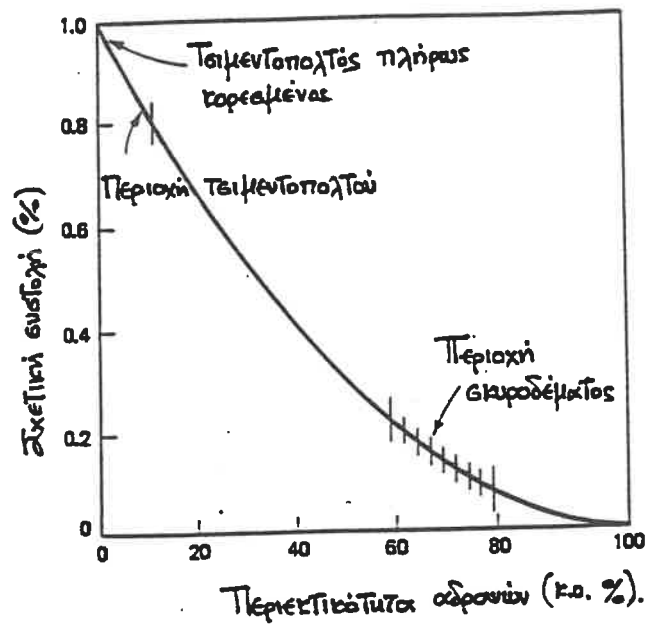
- Σχ.3.6: α) Κατανομή υγρασίας στη μάζα σκυροδέματος, που συντηρείται σε περιβάλλον σχετικής υγρασίας 50%.
- β) Συστολή ξήρανσης και ρηγμάτωση του φλοιού του σκυροδέματος, ως αποτέλεσμα των αναπτυσσόμενων εφελκυστικών τάσεων στον φλοιό και των θλιπτικών τάσεων στο εσωτερικό της μάζας του.



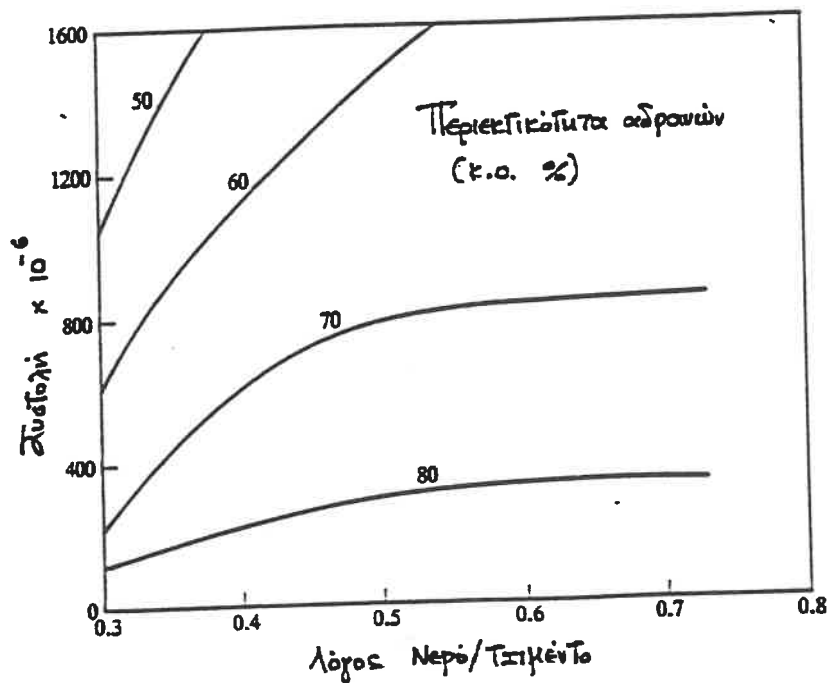
Σχ.3.7. Επίδραση της σχετικής υγρασίας του περιβάλλοντος στη συστολή ξήρανσης



Σχ.3.8. Επίδραση του μέτρου ελαστικότητας των αδρανών στη συστολή



Σχ.3.9. Επίδραση της περιεκτικότητας σε αδρανή του σκυροδέματος στη συστολή



Σχ.3.10. Επίδραση της περιεκτικότητας σε αδρανή και του λόγου N/T του σκυροδέματος στη συστολή

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

4.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι μελέτες που γίνονται σχετικά με τη ρηγμάτωση του σκυροδέματος αποδίδουν την αιτία αυτής στην πρώιμη συστολή του τσιμεντοπολτού λόγω απώλειας προέντασης. Έτσι πρέπει να καθορίζεται η συμπεριφορά αυτού ως προς τη συστολή, για την καλύτερη κατανόηση του μηχανισμού της ρηγμάτωσης.

Η συστολή μπορεί ακόμη να προκαλέσει απώλεια προέντασης σε διάφορα τμήματα μιας κατασκευής από σκυρόδεμα.

Βασικό αντικείμενο της διπλωματικής αυτής εργασίας είναι η μέτρηση της συστολής του τσιμεντοπολτού σε μικρή ηλικία, κατά τις πρώτες ώρες και ημέρες μετά την παρασκευή αυτού.

Υπάρχουν διάφοροι τρόποι για τη μελέτη της συστολής σε τσιμεντοπολτό, κάθε ένας από τους οποίους προσεγγίζει με διαφορετικό τρόπο τη συμπεριφορά του υλικού έναντι συστολής.

Στην παρούσα εργασία που έγινε σε δύο εργαστηριακές φάσεις –κυρίως και δευτερεύουσα - μετρήθηκε η ενδογενής συστολή καθώς και η συστολή ξήρανσης σε τσιμεντοπολτό στον οποίο σε ορισμένες (δευτερεύουσες) πειραματικές διαδικασίες έγινε προσθήκη ενός πολυμερούς υλικού.

4.2 ΔΙΕΥΚΡΥΝΗΣΕΙΣ- ΟΡΙΣΜΟΙ ΕΝΝΟΙΩΝ

Ενδογενής συστολή (ή αυτογενής)

Ορίζεται κάθε εξωτερική παραμόρφωση που επιτελείται χωρίς αλλαγή της μάζας του δοκιμίου. Η αυτογενής παραμόρφωση μετριέται με δύο τρόπους, είτε ογκομετρικά, είτε γραμμικά, σε δοκίμια από τσιμεντοπολτό υπό “σφραγισμένες” συνθήκες, ώστε να μην έρχονται σε επαφή με τον αέρα του εργαστηρίου. Στις γραμμικές μετρήσεις που έγιναν σε αυτή την εργασία η αυτογενής παραμόρφωση φαίνεται από τις δοκιμές ότι μπορεί να είναι

συστολή η και διαστολή. Άρα, αυτογενής συστολή είναι η *εξωτερικώς* εμφανιζόμενη συστολή δηλ. η μείωση των εξωτερικών διαστάσεων του τσιμεντοπολτού. Η κύρια γεννεσιουργός αιτία αυτής είναι η χημική συστολή γ'αυτό η αυτογενής συστολή ονομάζεται και εξωτερική χημική συστολή.

Η εξωτερική χημική συστολή ισούται με την ολική χημική συστολή μέχρι να πήξει ο τσιμεντοπολτός, δηλ. μέχρι που ο σκελετός των προϊόντων της ενυδάτωσης ισχυροποιηθεί αρκετά ώστε να μην επιτρέπει παραπέρα παραμόρφωση, ή για την χρονική περίοδο όπου υπάρχει ακόμη νερό εξίδρωσης στην επιφάνεια του σφραγισμένου δοκιμίου. Στη μετέπειτα πορεία η χημική συστολή εκδηλώνεται μόνο με τη δημιουργία εσωτερικών κενών και η εξωτερική μεταβολή όγκου ή μήκους μειώνεται σε μεγάλο βαθμό.

Συστολή ξήρανσης

Είναι η συστολή που έχει ως συνέπεια την εξωτερική μεταβολή μήκους σε δοκίμια τσιμεντοπολτού τα οποία δεν φυλάσσονται από τυχόν απώλεια υγρασίας όπως γίνεται στην προηγούμενη περίπτωση, αλλά έρχονται σε άμεση επαφή με το περιβάλλον του εργαστηρίου και υφίστανται ανεμπόδιστα την επίδραση της ξήρανσης.

4.3 ΓΕΝΙΚΗ ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ

Για την επίδραση των παραπάνω τύπων συστολής σε διάφορα είδη τσιμεντοπολτού έγινε στο εργαστήριο μια σειρά δοκιμών που περιλάμβανε συνολικά 12 δοκιμές (7 πρώτες (4+3) δευτερεύουσες μετρήσεις, 5 επόμενες κύριες) : μετρήθηκαν η αυτογενής συστολή καθώς και η συστολή ξήρανσης ως, ως γραμμικές μεταβολές (mm/mm).

Αυτό διότι η μείωση του όγκου (ογκομετρική παραμόρφωση), ισούται με το τριπλάσιο της γραμμικής συστολής και έτσι στην πράξη η συστολή μετριέται τις περισσότερες φορές απλά ως γραμμική παραμόρφωση.

Γραμμική συστολή

- Μέτρηση αυτογενούς συστολής με μηχανικό μηκυνσιόμετρο

- Μέτρηση συστολής ξήρανσης με μηχανικό μηκυνσιόμετρο

4.3.1. ΥΛΙΚΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ

Χρησιμοποιήθηκαν τα εξής υλικά:

α) Τύπος τσιμέντου : Χρησιμοποιήθηκαν έξι (6) διαφορετικοί τύποι τσιμέντου (T) : τσιμέντο I 45, τσιμέντο I 55, τσιμέντο II 35, λευκό , τσιμέντο 42,5 και σκωρίας.

β) Λόγος νερού προς τσιμέντο (N/T) για το μίγμα : σε όλες τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκε ο λόγος $N/T = 0,35$.

γ) Πολυμερές (P) : χρησιμοποιήθηκε σε ορισμένα μόνο μίγματα σε διάφορα ποσοστά κατά βάρος του τσιμέντου : 0,25%, 1%, 7%.

Οι τύποι τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκαν, αναφέρονται παραπάνω. Από αυτούς, τα τσιμέντα Πόρτλαντ τύπου II 35 και I 45 χρησιμοποιούνται ευρέως στην Ελλάδα. Το λευκό είναι οικονομικά ασύμφωρο αλλά παρουσιάζει πολύ καλές ιδιότητες, ενώ το τσιμέντο CEM/42,5 παρασκευάζεται σύμφωνα με τους νέους κανονισμούς του ΕΛΟΤ με βάση τα νέα ευρωπαϊκά πρότυπα της ΕΕ. Η επιλογή του τσιμέντου σκωρίας έγινε για ειδικούς λόγους, γιατί έχει μεγάλη αντίσταση στην διείσδυση χλωριόντων και γι'αυτόν τον λόγο χρησιμοποιείται για σκυροδέματα που επηρεάζονται από αλμυρό νερό. Το I 55 είναι σκυρόδεμα υψηλής αντοχής με πολύ γρήγορο ξεκαλούπωμα αλλά με περιορισμένη χρήση.

Το νερό ανάμιξης που χρησιμοποιήθηκε, λόγω της ανάγκης μεγάλων ποσοτήτων, ήταν νερό βρύσης που είχε τη θερμοκρασία περιβάλλοντος (συγκέντρωσή του σε πλαστικά δοχεία 2-3 ημέρες πριν τα πειράματα).

Σε ορισμένα μίγματα προστέθηκε ακόμη μια ποσότητα πολυμερούς (P)

4.3.2. ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ

Όλες οι δοκιμές έγιναν σε εργαστηριακό περιβάλλον, σε ελεγχόμενες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας. Η θερμοκρασία κυμαίνονταν από 22-24 °C (στον πρώτο κύκλο των δευτερεύουσων δοκιμών), 19-22° C (στο

δεύτερο) και 22-23⁰ C (στις κύριες). Η μέση υγρασία ήταν περίπου 64% (59-69% διακύμανση).

Σε όλα τα υλικά, και τις συσκευές που επρόκειτο να χρησιμοποιηθούν κάποιες μέρες πριν την εκτέλεση κάθε δοκιμής, γίνονταν τοποθέτηση στον ίδιο χώρο για να έχουν ίδια θερμοκρασία και υγρασία.

4.4 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΩΝ

Παρακάτω γίνεται αναλυτική περιγραφή των δοκιμών που συντελέστηκαν.

4.4.1. ΠΡΟΚΑΤΑΡΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

Επιτελέστηκαν δοκιμές κάθισης σε πέντε (5) τύπους τσιμέντων σε μικρές ποσότητες για να εξεταστεί η εργασιμότητα του κάθε τσιμεντοπολτού ώστε να αποφασίσουμε ποιο λόγο N/T συνέφερε να χρησιμοποιήσουμε για να μπορεί να γίνει σύγκριση μεταξύ των διαφόρων τύπων τσιμεντοπολτού. Οι τύποι τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκαν για τη δοκιμή ήταν :

- Τσιμέντο I 45
- Τσιμέντο I 55
- Τσιμέντο 42,5
- Λευκό τσιμέντο
- Τσιμέντο II 35

Ελήφθησαν για το καθένα 500 gr τσιμέντου και έγινε ανάμιξη με νερό με λόγο N/T=0,35 σε μικρά δοχεία με χρησιμοποίηση ηλεκτρικού mixer για να γίνει η ανάμιξη (2 min) περίπου. Μετά το τέλος κάθε ανάμιξης τοποθετούνταν το μίγμα σε τρεις στρώσεις σε μεταλλικό κώλουρο κώνο (μικρή βάση d=39mm, μεγάλη βάση D=68mm, ύψος 90,5 mm) αφού προηγουμένως γίνονταν διύγρανση αυτού και τοποθέτησή του σε γυάλινη επίπεδη βάση. Σε κάθε στρώση εφαρμόζονταν 25 ραβδισμοί με ράβδο Φ8 για την απαλλαγή του μίγματος απ'τον αέρα. Μετά το γέμισμα κάθε φορά του κώνου, τον απομακρύνουμε και μετρούσαμε την κάθιση του τσιμεντοπολτού (σε cm) με μετροταινία τοποθετημένη κατακόρυφα από την κορυφή του κώνου,

τοποθετημένου σε γυάλινη βάση, μέχρι το πάνω μέρος του εξαπλωμένου τσιμεντοπολτού.

Τα αποτελέσματα της δοκιμής κάθισης έχουν ως εξής :

α) Τσιμέντο I 45

- κάθιση 6 cm
- θερμοκρασία 23,7⁰ C

β) Τσιμέντο I 55

- κάθιση 6,3 cm
- θερμοκρασία 23,8⁰ C

γ) Τσιμέντο 42,5

- κάθιση 5,5 cm
- θερμοκρασία 23,8⁰ C

δ) Λευκό τσιμέντο

- κάθιση 4,8 cm
- θερμοκρασία 23,8⁰ C

ε) Τσιμέντο II 35

- κάθιση 5,8 cm
- θερμοκρασία 23,9⁰ C

Συμπεραίνουμε σε όλες τις δοκιμές ότι για λόγο $N/T=0,35$ που χρησιμοποιήθηκε, η κάθιση είναι περίπου η ίδια, με μικρή σχετικά απόκλιση μεταξύ των διαφόρων μιγμάτων, δηλ. παρουσιάζουν το ίδιο περίπου εργάσιμο που οδηγεί στη χρησιμοποίηση του παραπάνω λόγου ως αποδεκτού για τη συσχέτιση των περαιτέρω δοκιμών μεταξύ των τσιμεντοπολτών.

4.4.2. (ΚΥΡΙΕΣ-ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΕΣ) ΔΟΚΙΜΕΣ – ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ

Έγινε μέτρηση της γραμμικής συστολής $\Delta L/L$ (mm/mm) με τη βοήθεια ενός μηχανικού μηκυσιομέτρου.

Παρασκευάστηκαν κυλινδρικά δοκίμια με διάμετρο $D=40$ mm και μήκος περίπου $L=250$ mm. Έγινε επιλογή αυτών των διαστάσεων ώστε τα κατασκευαζόμενα δοκίμια να έχουν μεγάλο λόγο επιφάνειας/όγκο, κι'αυτό

για να γίνεται ταχύτερα η ξήρανση αφού οι μετρήσεις διήρκησαν σχετικά μικρό χρονικό διάστημα αλλά και για πρακτικούς λόγους ως αναφορά την κατασκευή καλουπιών.

Τα καλούπια κατασκευάστηκαν από υλικό PVC με διάμετρο σωλήνα Φ40. Στο ένα από τα δύο άκρα κάθε σωλήνα έγινε επικόλληση ενός επίπεδου πλαστικού πάτου, ως βάση. Σε όλους τους σωλήνες δημιουργήθηκε μια κατά μήκος τομή για να μπορεί να γίνει το ξεκαλούπωμα η οποία καλύφθηκε με αυτοκόλλητη μονωτική ταινία.

Για να μπορούν να ξεκαλούπωθούν τα δοκίμια από τους σωλήνες πρέπει να έχουν περάσει το λιγότερο 22-25 ώρες αφού γίνει η ανάμιξη, διότι θα πρέπει να έχει πήξει ο τσιμεντοπολτός και να έχει αποκτήσει κάποια αντοχή. Έτσι χάνεται η αρχική συστολή για τις πρώτες ώρες και αυτό είναι το βασικό μειονέκτημα της μεθόδου.

Πορεία δοκιμών – Διαδικασία

Γίνεται παρασκευή έξι δοκιμών από κάθε ανάμιγμα που έχουν τα ίδια κοινά στοιχεία :δηλ. τον ίδιο τύπο τσιμέντου, τον ίδιο λόγο N/T καθώς και το ίδιο ποσοστό πολυμερούς (αν υπάρχει). Στη συνέχεια από τη σειρά των έξι δοκιμών δημιουργούμε δύο (2) ομάδες από τρία δοκίμια στην κάθε μια για λόγους διαφορετικής αντιμετώπισης αφού γίνει το ξεκαλούπωμα.

Αυτά της μιας ομάδας, αμέσως μετά το ξεκαλούπωμα καθώς και στην πορεία των μετρήσεων αφήνονται όπως είναι, σε απευθείας επαφή με τον εργαστηριακό αέρα (ακάλυπτα δοκίμια), ενώ αυτά της άλλης ομάδας τυλίγονται αμέσως μετά το ξεκαλούπωμα με αυτοκόλλητη μεμβράνη που απομονώνει το δοκίμιο από το περιβάλλον και εμποδίζει την απώλεια της υγρασίας (σφραγισμένα δοκίμια). Στην περίπτωση αυτή, η συστολή που μετράται είναι η αυτογενής συστολή. Στην προηγούμενη περίπτωση της άμεσης επαφής με τον αέρα, η εξάτμιση του νερού γίνεται δίχως καμία παρεμπόδιση και η συστολή που μετράται είναι η συστολή ξήρανσης.

Ως αναφορά τις μετρήσεις, για την μέτρηση της αλλαγής του μήκους κάθε δοκιμίου έγινε χρησιμοποίηση μιας ράβδου από invar για τη διόρθωση των τιμών, μήκους 200mm (μήκος αναφοράς), γιατί μεταβάλλεται ελάχιστα λόγω των αυξομειώσεων της θερμοκρασίας. Οπότε σε κάθε μέτρηση,

λαμβάνεται μια τιμή για αυτή τη ράβδο, βάσει της οποίας γίνεται στην επεξεργασία των μετρήσεων που ακολουθεί, διόρθωση των τιμών των ενδείξεων για τα δοκίμια.

Τα βήματα της διαδικασίας των δοκιμών που έγιναν έχουν ως εξής :

- Επάλλειψη της εσωτερικής επιφάνειας των καλουπιών με λεπτό στρώμα γράσσου.
- Ζύγιση τσιμέντου, νερού (ίσως και πολυμερούς) με τις σωστές αναλογίες
- Ύγρανση του αναμικτήρα (ρυθμιζόμενης ταχύτητας)
- Τοποθέτηση τσιμέντου σε αυτόν
- Έναρξη ανάμιξης με ταυτόχρονη προσθήκη νερού
- Προσθήκη του υπερρευστοποιητικού
- Τελική ανάμιξη για τρία περίπου λεπτά

Σε όλη τη διάρκεια της ανάμιξης γινόταν τακτά ανακάτεμα του τσιμεντοπολτού με σπάτουλα για να μην κολλήσει και για να είναι ομογενές το μίγμα.

- Γέμισμα των έξι (6) καλουπιών σχεδόν μέχρι πάνω
- Δόνηση σε δονητική τράπεζα σε δύο διαστήματα των 10 sec το καθένα
- Προσθήκη μικρής ποσότητας ακόμη τσιμεντοπολτού
- Κάλυψη της ελεύθερης επιφάνειας των καλουπιών με πλαστική μεμβράνη
- Αποθήκευση σε ειδικό θάλαμο με συγκεκριμένες συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας
- Ξεκαλούπωμα μετά από 24 περίπου ώρες
- Τύλιγμα των τριών δοκιμών με αυτοκόλλητη μεμβράνη ενώ τα τρία επόμενα μένουν ακάλυπτα
- Κόλλημα δύο ζευγαριών μεταλλικών υποδοχών 'πούλιες' με σιδηρόστοκο σε κάθε δοκίμιο σχεδόν αντιδιαμετρικά
- Λαμβάναμε την πρώτη μέτρηση με το μηχανικό μηκυνσιόμετρο 30min με 1 ώρα μετά το κόλλημα των μεταλλικών υποδοχών.

Την πρώτη εβδομάδα των μετρήσεων, αυτές γίνονταν δύο (2), (μπορεί και τρεις φορές την πρώτη μέρα για ορισμένα μίγματα) φορές, την επόμενη εβδομάδα μία μέτρηση την ημέρα, και στη συνέχεια μια κάθε 2 ή 3 αργότερα

ημέρες για μια ακόμη εβδομάδα. Στο τέλος των μετρήσεων, αυτές λαμβάνονταν σε αραιά πια διαστήματα για μία περίοδο 20 περίπου ημερών. Διαρκούσαν συνολικά γύρω στις 45 ημέρες.

Κάθε φορά που λαμβάνονταν μια μέτρηση, καταγράφονταν δύο τιμές για κάθε δοκίμιο, κάθε μια να αντιστοιχεί σε ένα ζευγάρι μεταλλικών υποδοχών, που κατά την επεξεργασία των μετρήσεων λαμβάνονταν ο μέσος όρος τους και στη συνέχεια, ο μέσος όρος των τριών ξηρών ή των τριών σφραγισμένων δοκιμίων της κάθε σειράς. Ακόμη καταγράφονταν κάθε φορά το βάρος των δοκιμίων (για την παρακολούθηση της απώλειας υγρασίας, όπου για τα σφραγισμένα η απώλεια ήταν αμελητέα όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο) καθώς και οι ενδείξεις της θερμοκρασίας και της υγρασίας από ένα ειδικό θερμόμετρο. Επίσης λαμβάνονταν μέτρηση για το invar όπως έχει ειπωθεί πιο πάνω.

4.5 ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ ΤΩΝ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΠΟΥ ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣΤΗΚΑΝ ΜΕ ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΟΝ ΑΡΙΘΜΟ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Τύπος τσιμέντου	ΚΥΡΙΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΈΡΕΥΝΑ		ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ		
	Ξήρανση δοκιμίων	Κάλυψη	ΠΡΩΤΗ ΦΑΣΗ Ξήρανση δοκιμίων	Κάλυψη	ΔΕΥΤΕΡΗ ΦΑΣΗ Ξήρανση δοκιμίων
I 45	3 (δοκίμια) N ^ο 1-3	3(δοκίμια) N ^ο 4-6	-	3 N ^ο 7-9	3 N ^ο 10-12
I 55	3 N ^ο 7-9	3 N ^ο 10-12	-	-	-
CEM/42,5	3 N ^ο 13-15	3 N ^ο 16-18	-	-	-
Λευκό	3 N ^ο 19-21	3 N ^ο 22-24	-	-	-
II 35	3 N ^ο 25-27	3 N ^ο 28-30	24(δοκ.) *	3 N ^ο 1-3	3 N ^ο 4-6
Σκωρίας	-	-	-	3 N ^ο 13-15	3 N ^ο 16-18

*

II 35	Ξήρανση	Κάλυψη
P=0%T	3(δοκίμια) N ^ο 1-3	3(δοκίμια) N ^ο 4-6
P=0,25%T	3 N ^ο 7-9	3 N ^ο 10-12
P=1%T	3 N ^ο 13-15	3 N ^ο 16-18
P=7%T	3 N ^ο 19-21	3 N ^ο 22-24

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι εργαστηριακές δοκιμές – μετρήσεις έγιναν σε τρεις (3) ξεχωριστές χρονικές περιόδους (2 δευτερεύουσες φάσεις και μια κύρια) σε καθεμιά από τις οποίες χρησιμοποιήθηκαν διαφορετικοί τύποι τσιμέντου. Παρασκευάστηκαν συνολικά 12 διαφορετικά μίγματα τσιμεντοπολτού (με 6 δοκίμια το καθένα) με σκοπό να διερευνηθεί η επίδραση της συστολής (γραμμικής) σε καθένα από τα μίγματα με την πάροδο του χρόνου, ανάλογα με τη σύνθεση του μίγματος και τις επικρατούσες εργαστηριακές συνθήκες. Συνολικά παρασκευάστηκαν 72 δοκίμια.

5.2 ΚΥΡΙΕΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΠΟΛΤΟΥ

Κατασκευάστηκαν 5 σειρές δοκιμών από διαφορετικούς τύπους τσιμέντου με έξι δοκίμια στην κάθε σειρά με λόγο σε όλα $N/T=0,35$.

(βλ. πίνακα από 4^ο Κεφάλαιο)

5.2.1 ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΣΥΣΤΟΛΗΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΠΩΛΕΙΑ ΒΑΡΟΥΣ

(Η ανάλυση των διαγραμμάτων των κύριων δοκιμών έγινε πριν τη λήψη των δύο τελευταίων μετρήσεων)

Από το Σχ.5.1.1- 5.1.5 παρατηρούμε ότι ο τύπος I 45 Σχ.5.1.1 (ο οποίος χρησιμοποιείται συνήθως για κατασκευή μεγάλων τεχνικών έργων) παρουσιάζει αρχικά μεγάλη συστολή που όμως στη συνέχεια (μετά τις 250 ώρες) ο ρυθμός αύξησης μειώνεται σε σχέση ιδίως με το τσιμέντο I 55 Σχ.5.1.2 όπου ο ρυθμός αύξησης της συστολής παραμένει σταθερός για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα (περίπου γραμμική αύξηση). Επίσης το CEM/42,5 Σχ.5.1.3, που παρασκευάζεται σύμφωνα με τα νέα πρότυπα,

παρουσιάζει αρκετά μεγάλη συστολή ξήρανσης που είναι περίπου ίδια με αυτή του ΙΙ 35 Σχ.5.1.5 (συνηθισμένο στις κατασκευές) όπως δείχνει η σύγκριση των διαγραμμάτων. Μικρή συστολή έχει το (λευκό) Σχ.5.1.4 όπως άλλωστε αναμένονταν αφού διαθέτει πολύ μεγάλη αντοχή.

Η απώλεια βάρους στα ίδια διαγράμματα είναι μεγαλύτερη στο τσιμέντο CEM/42,5 το οποίο έχει πολύ έντονη αρχική απώλεια.

Την μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ συστολής ξήρανσης και απώλειας βάρους παρουσιάζει το Ι 55 (μεγάλη συστολή-μικρή απώλεια) που ίσως οφείλεται στη σύσταση του τσιμέντου ή στη λεπτότητα άλεσής του.

Στο CEM/42,5 οι τιμές της συστολής και της απώλειας βάρους διατρέχουν τον άξονα του χρόνου σχεδόν παράλληλες μεταξύ τους.

Στα σχήματα από 5.1.6 μέχρι 5.1.10, φαίνεται η σχέση συστολής ξήρανσης και απώλειας βάρους όπου αρχικά η αύξηση της συστολής είναι μικρή σε σχέση με την απώλεια βάρους (καμπύλη γραμμή) ενώ στην πορεία λαμβάνει χώρα έντονη συστολή και μικρότερη απώλεια βάρους – αυτό ισχύει σε όλα σχεδόν τα διαγράμματα της συγκεκριμένης σειράς- Συμβαίνει διότι το νερό εξατμίζεται αρχικά από τους τριχοειδείς πόρους με μεγαλύτερη διάμετρο οπότε παρουσιάζεται μεγάλη απώλεια νερού και αναπτύσσονται μικρές τριχοειδείς τάσεις (πιέσεις) ενώ στην πορεία αρχίζει να εξατμίζεται και το νερό των πόρων με μικρότερη διάμετρο (άρα λιγότερο νερό- μικρότερη απώλεια βάρους- μεγαλύτερες πιέσεις- μεγαλύτερη συστολή).

Συγκριτικά παρατηρούμε ότι το Ι 45 Σχ.5.1.6 έχει μικρότερη συστολή και μεγαλύτερη απώλεια βάρους από το Ι 55 Σχ.5.1.7, ενώ το CEM/42,5 έχει τη μεγαλύτερη απώλεια βάρους από όλα και τη μεγαλύτερη τελική συστολή $> 0,0025$. Στο (λευκό) Σχ. 5.1.9 η απώλεια βάρους φτάνει περίπου τα 4,7% (μικρή απώλεια). Το ΙΙ 35 Σχ.5.1.10 επίσης έχει τον ίδιο ρυθμό αύξησης με το Ι 45 με ελαφρώς μειούμενες τιμές για τη συστολή και μεγαλύτερη τελική συστολή.

5.2.2 ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ “ΕΝΔΟΓΕΝΟΥΣ” ΣΥΣΤΟΛΗΣ

Η πρόθεση της διπλωματικής εργασίας ήταν, με την κάλυψη των δοκιμών να εξασφαλίσουμε μηδενική απώλεια υγρασίας απ’ τα δοκίμια, οπότε η μετρούμενη συστολή θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως ενδογενής

συστολή. Εν τούτοις οι μετρήσεις έδειξαν ότι παρόλη την προσπάθεια υπήρχε μια μικρή απώλεια βάρους που δεν ξεπερνούσε όμως το 0,12%. Επομένως αυστηρά κρινόμενα οι μετρήσεις αυτές, δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως μετρήσεις ενδογενούς συστολής. Ακολούθως ο όρος αυτός χρησιμοποιείται με το σύμβολο: “ ”

Η ενδογενής συστολή είναι εκείνη η οποία οφείλεται αφενός μεν στη χημική συστολή, αφετέρου δε στη συστολή η οποία προκύπτει από “εσωτερική ξήρανση” του δοκιμίου. Η εσωτερική αυτή ξήρανση του σκυροδέματος λαμβάνει χώρα σε σκυροδέματα με $N/T < 0,42$ διότι τα σκυροδέματα αυτά έχουν λιγότερο νερό από το απαιτούμενο για πλήρη ενυδάτωση του τσιμέντου και επομένως οι ανυδάτωτοι κόκκοι αντλούν νερό από τα σχηματιζόμενα λόγω χημικής συστολής τριχοειδή και ως εκ τούτου δημιουργούν μια κατάσταση ξήρανσης εσωτερικά του τσιμεντοπολτού.

Στα Σχ. 5.1.11 έως 5.1.15 παρουσιάζεται η εξέλιξη της “ενδογενούς” συστολής με το χρόνο, καθώς και η απώλεια βάρους.

Παρατηρούμε ότι το (λευκό) Σχ.5.1.14 παρουσιάζει την μικρότερη “ενδογενή” συστολή. Η εξάτμιση του νερού από τους πόρους είναι επίσης χαμηλή και επιτελείται σχεδόν παράλληλα με τη συστολή. Τη μεγαλύτερη συστολή παρουσιάζει το CEM/42,5 > 0,0008 Σχ.5.1.13 με όχι ιδιαίτερα μεγάλη απώλεια βάρους. Την μεγαλύτερη εξάτμιση έχει το I 45 Σχ.5.1.11 που αυξάνει με τον χρόνο σχεδόν γραμμικά. Το II 35 Σχ.5.1.15 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ των δύο διαγραμμάτων με αρκετά μικρή απώλεια νερού και υψηλή (όχι ιδιαίτερα πάντως) συστολή. Το (I 55) τέλος φαίνεται ότι διαθέτει αρκετά καλή τελική αντοχή αφού η συστολή του δεν εμφανίζει ιδιαίτερα υψηλές τιμές.

Η απώλεια βάρους στην περίπτωση της “ενδογενούς” θα αναμέναμε να είναι σχεδόν μηδενική αλλά παρατηρώντας τα διαγράμματα από 5.1.16 έως 5.1.20 βλέπουμε ότι έχουμε μια απώλεια βάρους που δεν ξεπερνά βέβαια τα 0,12%, μικρή μεν, αλλά όχι αμελητέα. Την πιο μεγάλη εξάτμιση νερού παρουσίασε το I 45 > 0,1% Σχ.5.1.16 με εξίσου μεγάλη συστολή ενώ τη μικρότερη εξάτμιση είχε το (λευκό) < 0,06% Σχ.5.1.19. Ομοίως το (II 35) Σχ.5.1.20 έδειξε μικρή απώλεια βάρους.

Αξίζει να σημειωθεί, όπως φαίνεται και από τα διαγράμματα, ότι ο ρυθμός αύξησης της “ενδογενούς” κυρίως συστολής μετά την πάροδο

κάποιου χρονικού διαστήματος (250-300 ώρες) ελαττώνεται αισθητά (τείνει να οριζοντιωθεί).

5.2.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΣΥΣΤΟΛΗΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ- “ΕΝΔΟΓΕΝΟΥΣ” ΣΥΣΤΟΛΗΣ

Μπορούμε να δούμε τη σχέση ανάμεσα στα δύο είδη συστολών όπου η συστολή ξήρανσης είναι πολύ μεγαλύτερη. Φτιάχνοντας το λόγο της “ενδογενούς” προς την ξήρανση, συγκρίνουμε, βρίσκοντας ακριβώς την αναλογία. Σε όλα τα διαγράμματα της σειράς αυτής (Σχ.5.1.21-5.1.30) παρατηρούμε ότι ο λόγος γίνεται σχεδόν σταθερός με μικρές μόνο αυξομειώσεις για χρόνο άνω των 150 περίπου ωρών. Επίσης ενώ σε ένα αρχικό, πολύ μικρό χρονικό διάστημα φαίνεται ότι η συσχέτιση μεταξύ των δύο συστολών είναι μεγάλη (υψηλός λόγος), στην πορεία βλέπουμε ότι η “ενδογενής” συστολή είναι ένα μικρό ποσοστό της ξήρανσης που όπως είναι φυσικό αλλάζει για το κάθε ανάμιγμα. Ο μεγαλύτερος λόγος παρουσιάζεται για το Ι 45 Σχ.5.1.26 ενώ ο μικρότερος για το λευκό Σχ.5.1.29.

5.3 ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΕΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΠΟΛΤΟΥ (ΠΡΩΤΗ ΦΑΣΗ)

Στην πρώτη ομάδα δοκιμών που παρασκευάστηκαν χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο ΙΙ 35 με λόγο $N/T=0,35$ σε διάφορα ποσοστά πολυμερούς P (0, 0,25%, 1%, 7%) –βλ. πίνακα Κεφάλαιο 4- με την ιδιότητα να απορροφά- να συγκρατεί νερό και να το προσδίδει στον τσιμεντοπολτό για περαιτέρω ενυδάτωση και μεγαλύτερη τελική αντοχή. Σκοπός της εργασίας αυτής ήταν να εξεταστεί αν το πολυμερές αυτό μειώνει τη συστολή ξήρανσης του τσιμεντοπολτού. Για να έχουν τα μίγματα το κατάλληλο εργάσιμο ώστε να συμπυκνώνονται ικανοποιητικά, χρησιμοποιήθηκε υπερρρευστοποιητικό πρόσθετο.

Από τη σχετική βιβλιογραφία προκύπτει ότι όσο πληρέστερη είναι η ενυδάτωση του τσιμεντοπολτού τόσο μεγαλύτερη ευστάθεια παρουσιάζει το μίγμα (πιο σταθεροί δεσμοί) αναπτύσσοντας καλύτερη τελική αντοχή και επομένως μικρότερη συστολή.

Παρόλο όμως τη χρήση του πολυμερούς, η τελική συστολή των διαφόρων μιγμάτων δεν παρουσιάστηκε ελαττωμένη (Σχ.5.2.1-5.2.4) που σημαίνει προφανώς ότι συνετέλεσαν και άλλοι παράγοντες που χρειάζεται περαιτέρω έρευνα για να αναλυθούν. Άλλωστε η δράση του πολυμερούς μέσα σε ένα μίγμα τσιμεντοπολτού δεν είναι γνωστή και η αλληλεπίδρασή του (καθώς και του υπερρευστοποιητικού προσθέτου) σε ένα περιβάλλον έντονα βασικό (τσιμεντοπολτός) είναι ιδιαίτερα πολύπλοκη

5.3.1 ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΣΥΣΤΟΛΗΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΠΩΛΕΙΑ ΒΑΡΟΥΣ

Τα διαγράμματα της ξήρανσης εμφανίζουν μια αρχική διαστολή που κανονικά δεν θα έπρεπε να υπάρχει αλλά αυτό έχει παρουσιασθεί σε πολλές έρευνες που έχουν γίνει και αποδίδεται στην αύξηση της θερμοκρασίας του μίγματος και επομένως έχουμε θερμική διαστολή μίγματος λόγω της θερμότητας ενυδάτωσης του τσιμέντου.

Οι καμπύλες της διαστολής αυτής, που παρουσιάζεται κατά το πρώτο χρονικό διάστημα των μετρήσεων, και ιδιαίτερα εκείνες της αυτογενούς μεταβολής μήκους έχουν μια έντονη διαστολή. Παράδειγμα τα δοκίμια του μίγματος με $P = 7\%T$, διαστέλλονται τις πρώτες 40 περίπου ώρες σε ξήρανση, ενώ σφραγισμένα, η διαστολή εμφανίζεται για 370 ώρες!

Πάντως η πιο μεγάλη συστολή ξήρανσης παρουσιάζεται στο μίγμα με $P=7\%T$ όπως φαίνεται στο διάγραμμα 5.2.4 (μη αναμενόμενο) καθώς και η μεγαλύτερη απώλεια βάρους. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι τα δοκίμια αυτά, ενώ τελικά φαίνεται να παρουσιάζουν την μεγαλύτερη συστολή, αρχικά, μέχρι τις 100-150 περίπου ώρες είχαν τη μικρότερη συστολή από όλα τα υπόλοιπα.

Τα υπόλοιπα διαγράμματα έχουν περίπου την ίδια μορφή με ελαφρώς αυξανόμενες τιμές του μίγματος με $P=0\%T$ από αυτό με $P=0,25\%T$ και του μίγματος με $P=1\%T$ από αυτό με $P=0$.

Στο μίγμα με $P=0,25\%T$ παρουσιάστηκε κατά τη διάρκεια των μετρήσεων ξεκόλλημα πούλιας στο 3^ο δοκίμιο από τα ακάλυπτα. Αυτό μπορεί να ερμηνεύσει την τοπική ανωμαλία που παρουσιάζει η αντίστοιχη γραφική παράσταση μετά τις 100 ώρες .(Διαγράμματα από 5.2.1- 5.2.4)

Στα σχήματα από 5.2.5 ως 5.2.8 δίνεται η σχέση συστολής ξήρανσης και απώλειας βάρους όπου η καμπύλη των μετρήσεων λαμβάνει και αρνητικές τιμές λόγω προφανώς της αρχικής διαστολής.

5.3.2 ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ “ΕΝΔΟΓΕΝΟΥΣ” ΣΥΣΤΟΛΗΣ

Παρατηρώντας τα διαγράμματα από 5.2.9-5.2.12 βλέπουμε ότι η συστολή των καλυμένων δοκιμών (“ενδογενής”), λαμβάνει επίσης αρνητικές τιμές – έχουμε δηλ. διαστολή- για κάποιο χρονικό διάστημα που είναι παρατεταμένο στην περίπτωση με $P=7\%T$ Σχ.5.2.12 όπου τελικά η “ενδογενής” συστολή είναι αρκετά μικρή περίπου 0,0002 (αναπτύσσει τη μεγαλύτερη διαστολή δεδομένου ότι δεν έχει προλάβει να τμήσει τον άξονα του χρόνου μέχρι περίπου τις 370 ώρες!) σε αντίθεση με την ξήρανση για το αυτό μίγμα, καθώς επίσης έχει και τη μεγαλύτερη εξάτμιση από όλα.

Πάντως την μεγαλύτερη “ενδογενή” συστολή έχει το II 35 με $P=0,25\%T$ Σχ.5.2.10 το οποίο παρουσιάζει και τη μικρότερη εξάτμιση (μικρό σχετικά ποσοστό πολυμερούς που δεν μπορεί να επηρεάσει ιδιαίτερα έτσι και αλλιώς τη μείωση της συστολής.)

Όπως φαίνεται και από τα σχήματα 5.2.13- 5.2.16 την πιο ‘απότομη’ μορφή έχει η γραφική παράσταση με $P=0,25\%T$ Σχ.5.2.14 (μεγάλη ενδογενή συστολή- μικρή απώλεια βάρους $< 0,11\%$). Την ίδια περίπου μορφή εμφανίζει το μίγμα με $P= 1\%T$ Σχ.5.2.15 με λίγο μειωμένες τιμές συστολής και ελαφρώς μεγαλύτερη εξάτμιση.

Το επιθυμητό από τις δοκιμές ήταν να παρουσιάζουν τα σφραγισμένα δοκίμια αμελητέα απώλεια βάρους που όμως ήταν κάπως μεγαλύτερη. Γι’ αυτό σε άλλες δοκιμές σφραγίζονταν καλύτερα τα δοκίμια για τη μελέτη της “ενδογενούς” συστολής (διπλό τύλιγμα της διάφανης μεμβράνης).

5.3.3 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΣΥΣΤΟΛΗΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ- “ΕΝΔΟΓΕΝΟΥΣ” ΣΥΣΤΟΛΗΣ

Από τα διαγράμματα 5.2.17- 5.2.20 που δίνουν τη σχέση ανάμεσα στα δύο είδη συστολών, μπορούμε να δούμε αναλογικά πόσο μικρότερη είναι η “ενδογενής”, από τη συστολή ξήρανσης. Η σχέση δείχνεται καλύτερα αν πάρουμε τον λόγο της “ενδογενούς” προς την ξήρανση με το χρόνο (Σχ. από

5.2.21- 5.2.24) όπου φαίνεται ακριβώς η αναλογία. Τα διαγράμματα παρουσιάζουν κατά ένα αρχικό χρονικό διάστημα αρνητικές τιμές λόγω του ότι καθώς η ενδογενής 'διαστολή' εμφανίζεται για μεγαλύτερο χρόνο από ότι η αντίστοιχη διαστολή στα ακάλυπτα, ο λόγος της "ένδογενούς" προς την ξήρανση λαμβάνει κατά το διάστημα αυτό αρνητικές τιμές. (Ενώ στην αρχή έχουμε θετικές τιμές λόγω της ταυτόχρονης διαστολής σφραγισμένων – ακάλυπτων). Μετά τις 100 περίπου ώρες για όλα τα μίγματα παρουσιάζεται σχεδόν σταθερός ο λόγος και αρκετά μειωμένος.

5.4 ΔΕΥΤΕΡΕΥΟΥΣΕΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ (ΔΕΥΤΕΡΗ ΦΑΣΗ)

Στις δοκιμές αυτές παρασκευάστηκαν τρία μίγματα με λόγο σε όλα $N/T=0,35$ και με τρεις τύπους τσιμέντου: II 35, I 45 και σκωρίας. (βλ. πίνακα Κεφ.4)

Σε αυτόν τον κύκλο δοκιμών κάποια δοκίμια έσπασαν από τις σειρές II 35 και σκωρίας κατά το ξεκαλούπωμα. Έτσι τα αποτελέσματα προκύπτουν από τον μέσο όρο δύο δοκιμίων ή ακόμη και από ένα μόνο δοκίμιο, και όχι από το μέσο όρο τριών δοκιμίων. Παρόλα αυτά, οι καμπύλες συστολής είναι αρκετά αξιόπιστες.

5.4.1 ΜΕΛΕΤΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΣΥΣΤΟΛΗΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ ΜΕ ΤΟΝ ΧΡΟΝΟ ΚΑΙ ΤΗΝ ΑΠΩΛΕΙΑ ΒΑΡΟΥΣ

Για το τσιμέντο σκωρίας τα τέσσερα δοκίμια (2 ξηρά , 2 σφραγισμένα) έδωσαν αρκετά ικανοποιητικά αποτελέσματα (μειωμένη συστολή σε σχέση με τα άλλα δύο μίγματα) ενώ για το II 35 τα αποτελέσματα των γραφικών παραστάσεων είναι ανάλογα αυτών που έδωσαν οι προηγούμενες δοκιμές (πρώτη φάση)

Στα Σχ. 5.3.1- 5.3.3 παρατηρούμε ότι τα τσιμέντα II 35 Σχ.5.3.1 και σκωρίας Σχ.5.3.3 παρουσιάζουν μια μικρή αρχική διαστολή σε αντίθεση με το I 45. Τα (I 45) και (II 35) έχουν την ίδια περίπτωση τελική συστολή, μεγαλύτερη αυτής του τσιμέντου σκωρίας.

Επίσης η συστολή του I 45 γίνεται φανερό ότι είναι μεγαλύτερη από εκείνη του τσιμέντου σκωρίας σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων. Ακόμη παρατηρούμε ότι σε μικρή ηλικία η συστολή του II 35 είναι πιο μικρή σε σχέση με τα άλλα δύο μίγματα. Αυτό ίσως να οφείλεται στα μικρότερα ποσοστά C_3A , C_2S και C_3S (κλίνκερ) που περιέχει αυτό το τσιμέντο, τα οποία καθυστερούν (μικρές ποσότητες) τη διαδικασία της ενυδάτωσης που συνεπάγεται ελαττωμένη χημική συστολή και μίγμα πιο πορώδες με ικανότητα γρηγορότερης εξάτμισης.

Η απώλεια βάρους είναι μικρότερη για το I 45, λίγο μικρότερη από 6% ενώ στο II 35 φτάνει τα 13,3% έχοντας συνεχώς υψηλές τιμές (απότομα αυξανόμενη κάμπυλη) . Την μεγαλύτερη απόκλιση μεταξύ των δύο καμπυλών (συστολής-απώλειας) έχει το I 45.

Από τη σχέση μεταξύ συστολής ξήρανσης και απώλειας βάρους, φαίνεται πάλι ότι την μικρότερη εξάτμιση έχει το I 45 Σχ.5.3.5. Ακόμη παρατηρούμε ότι οι καμπύλες των II 35 Σχ.5.3.4 και σκωρίας Σχ.5.3.6 λαμβάνουν και αρνητικές τιμές , όπως άλλωστε ήταν αναμενόμενο λόγω της αρχικής διαστολής που είναι μεγαλύτερη για το II 35. (Σχ. 5.3.4- 5.3.6)

5.4.2 ΜΕΛΕΤΗ ΑΝΤΙΣΤΟΙΧΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ “ΕΝΔΟΓΕΝΟΥΣ” ΣΥΣΤΟΛΗΣ

Από τις καμπύλες των σχημάτων 5.3.7- 5.3.8 βλέπουμε ότι το (I 45) Σχ.5.3.8 έχει μεγάλη “ενδογενή” συστολή γύρω στα 0,0014 η οποία παρουσιάζει υψηλές τιμές από την αρχή ενώ στο II 35 Σχ.5.3.7, υπάρχει αρχική διαστολή μέχρι περίπου τις 200 ώρες και έχει μικρότερη συστολή(τελική τιμή περίπου 0,0009) πιθανόν λόγω ελαττωμένης χημικής συστολής.

Η απώλεια βάρους όμως είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση του (II 35) ενώ η καμπύλη του I 45 παρουσιάζει μια τοπική ανωμαλία λόγω ίσως λανθασμένης μέτρησης ενώ και οι δύο καμπύλες εξάτμισης είναι σχεδόν ευθύγραμμες.

Η τοπική ανωμαλία που παρουσίασε το I 45 φαίνεται και στις καμπύλες που παριστάνουν τη σχέση της “ενδογενούς” με την απώλεια. (5.3.9- 5.3.10)

5.4.3 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΣΥΣΤΟΛΗΣ ΞΗΡΑΝΣΗΣ-“ΕΝΔΟΓΕΝΟΥΣ” ΣΥΣΤΟΛΗΣ

Από τη σχέση μεταξύ των δύο συστολών (Σχ. από 5.3.11- 5.3.13) συμπεραίνουμε ότι η “ενδογενής” συστολή στο (II 35) Σχ.5.3.11 έχει το μικρότερο ποσοστό από τα τρία μίγματα. Φαίνεται επίσης χαρακτηριστικά ότι η διαστολή στα ακάλυπτα μίγματα είναι αρκετά μικρότερη (στο II 35 το 1/3 περίπου) από την διαστολή στα σφραγισμένα. Στο τσιμέντο σκωρίας Σχ.5.3.13 η “ενδογενής” είναι περίπου η μισή της ξήρανσης ενώ στο I 45 Σχ.5.3.12 λίγο μικρότερη. Η αναλογία μεταξύ των δύο φαίνεται ακόμη από τον λόγο της “ενδογενούς” προς την συστολή ξήρανσης (5.3.14- 5.3.16). Στο τσιμέντο σκωρίας εμφανίζονται δύο αρνητικές τιμές για χρόνο περίπου από 20 μέχρι 45 ώρες ενώ στο II 35 περισσότερες για χρόνο από 60 περίπου ώρες μέχρι 150. Η ύπαρξη αρνητικών τιμών λόγου έχει σχολιαστεί παραπάνω. Στο τσιμέντο I 45 έχουμε μόνο θετικές τιμές. Και σ’ αυτήν την περίπτωση ο λόγος της “ενδογενούς” προς την ξήρανση σταθεροποιείται μετά τις 100 περίπου ώρες λαμβάνοντας μικρές τιμές (“ενδογενής” συστολή γύρω στα 0,4 της ξήρανσης).

Στο τέλος των διαγραμμάτων παρατείνονται και αυτά που δείχνουν τη σχέση συστολής ξήρανσης – χρόνου για όλα τα τσιμέντα της κάθε σειράς δοκιμών. (Σχ. 5.1, 5.2, 5.3)

5.5 ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΟΛΩΝ ΤΩΝ ΦΑΣΕΩΝ ΔΟΚΙΜΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΚΟΙΝΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ

Σε όλες τις φάσεις χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο II 35. Από τη σύγκριση των διαγραμμάτων που παριστάνουν την εξέλιξη της συστολής ξήρανσης-απώλειας βάρους με το χρόνο παρατηρούμε ότι στη 2^η σειρά των δευτερεύουσων δοκιμών η συστολή λαμβάνει τις υψηλότερες αρχικές τιμές καθώς και η απώλεια βάρους (εξάτμιση νερού) είναι σαφώς μεγαλύτερη. Παρατηρείται ακόμη όπως ήδη έχει ειπωθεί μια μικρή αρχική διαστολή για τις δευτερεύουσες πειραματικές δοκιμές.

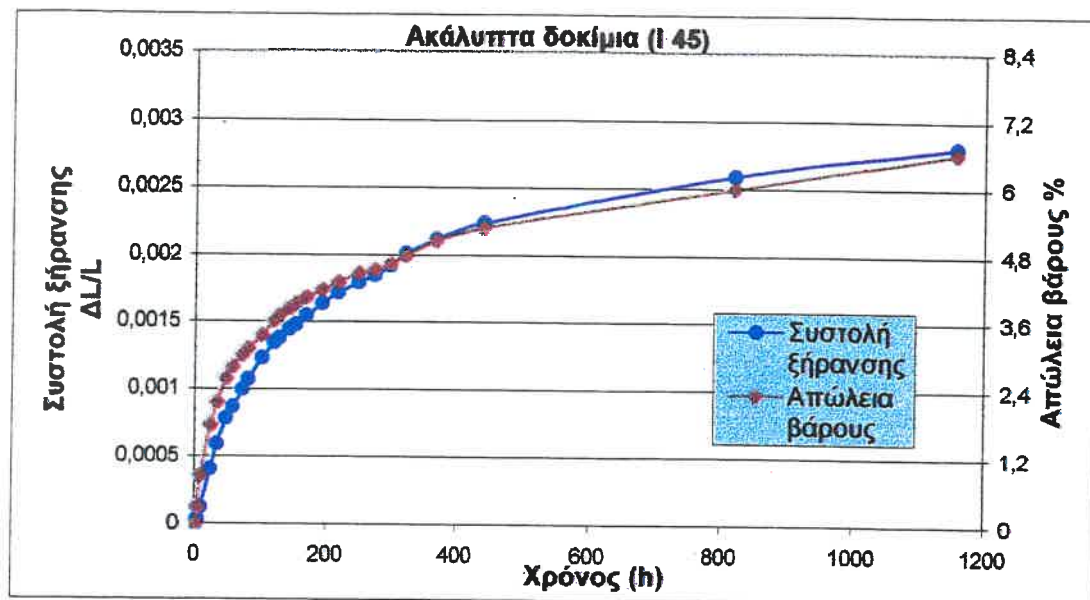
Σε ό,τι αφορά τα αντίστοιχα διαγράμματα της “ένδογενούς” συστολής, πάλι κατά τις δευτερεύουσες πειραματικές σειρές (έχει επωθεί) παρατηρείται αρχική διαστολή των δοκιμών ενώ τη μεγαλύτερη “ένδογενή” συστολή παρουσιάζει το τσιμέντο ΙΙ 35 των κύριων δοκιμών το οποίο όμως έχει και τη μικρότερη απώλεια νερού (σύγκριση για ίδιους χρόνους). Επίσης σημειώνεται ότι ο λόγος της “ένδογενούς” προς τη συστολή ξήρανσης, μετά τις 100 περίπου ώρες, και για τις τρεις περιπτώσεις των τσιμέντων ΙΙ 35 τείνει να σταθεροποιηθεί, λαμβάνοντας η “ένδογενής” ένα μικρό ποσοστό της ξήρανσης.

Το δεύτερο κοινό τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε σε δύο από τις τρεις εργαστηριακές δοκιμές ήταν το Ι 45.

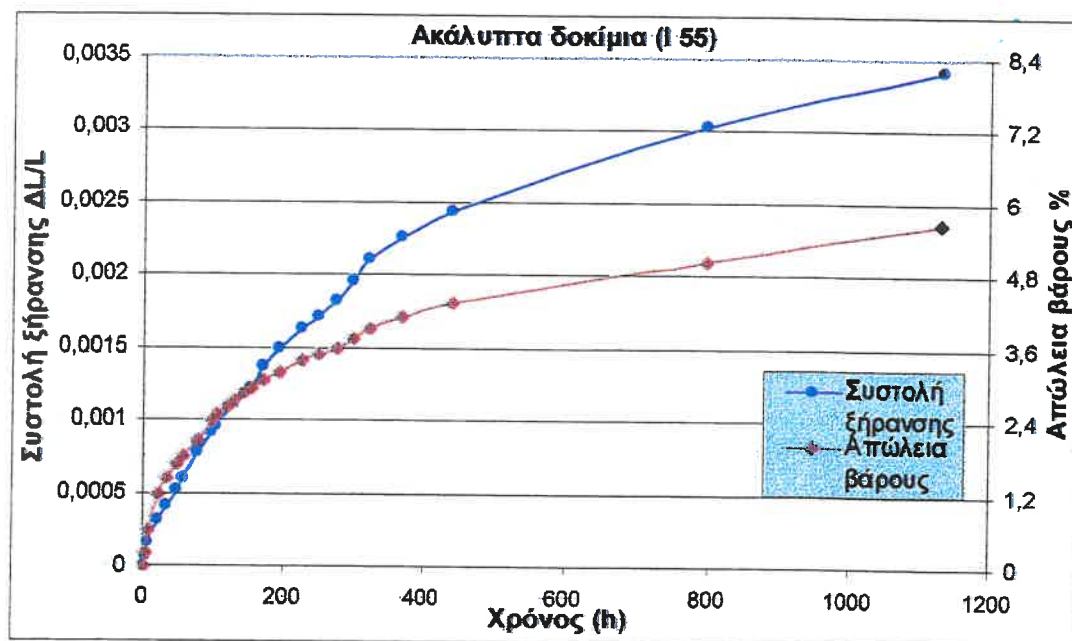
Σχετικά με τη συμπεριφορά των δοκιμών στη συστολή ξήρανσης, αυτά της δεύτερης σειράς των δευτερεύουσων πειραμάτων έδειξαν μεγαλύτερη παραμόρφωση έναντι ξήρανσης από αυτά της κύριας φάσης ενώ οι απώλειες βάρους ήταν περίπου ίδιες με μικρές μόνο αποκλίσεις (με αντιστοίχιση σε ίδιους χρόνους).

Σε αντιστοιχία με τα διαγράμματα της “ένδογενούς” συστολής, οι μετρήσεις έδειξαν μεγαλύτερη παραμόρφωση (συστολή) για τη 2^η σειρά των δευτερεύουσων πειραμάτων με ελαφρώς μικρότερες απώλειες βάρους για την ίδια σειρά από τις αντίστοιχες της κύριας φάσης.

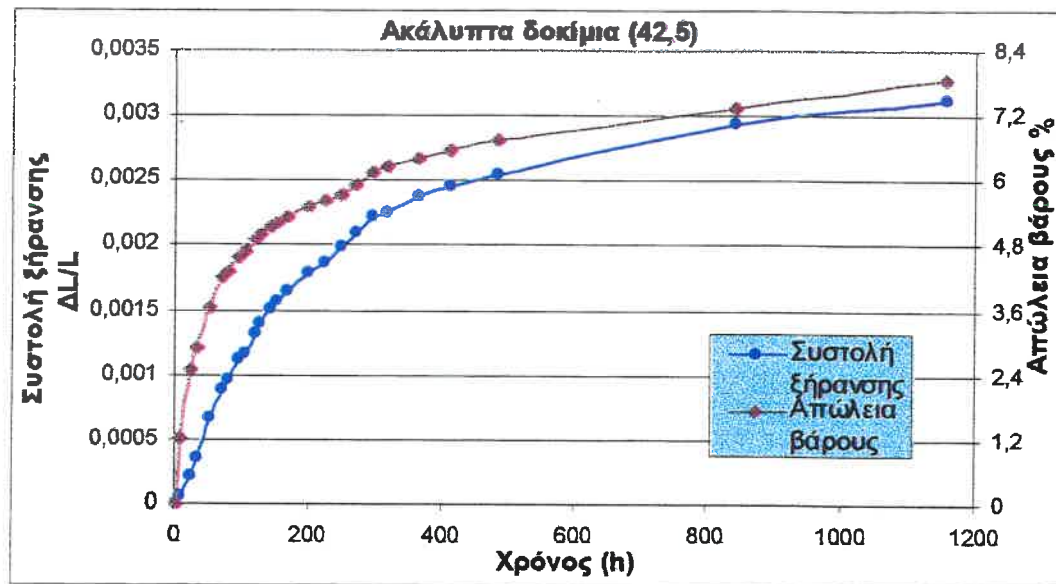
Τέλος από τη σύγκριση του λόγου των δύο συστολών, ξανά παρατηρούμε ότι τείνει να σταθεροποιηθεί μετά τις 100 περίπου ώρες με ελαφρώς μειωμένες τις τιμές του για το τσιμέντο (Ι 45) της κύριας φάσης. Για το τσιμέντο των δεύτερων δοκιμών της δευτερεύουσας φάσης ο λόγος σταθεροποιείται γύρω στο 0,4 ενώ για το αντίστοιχο τσιμέντο των κύριων πειραμάτων στην τιμή 0,35.



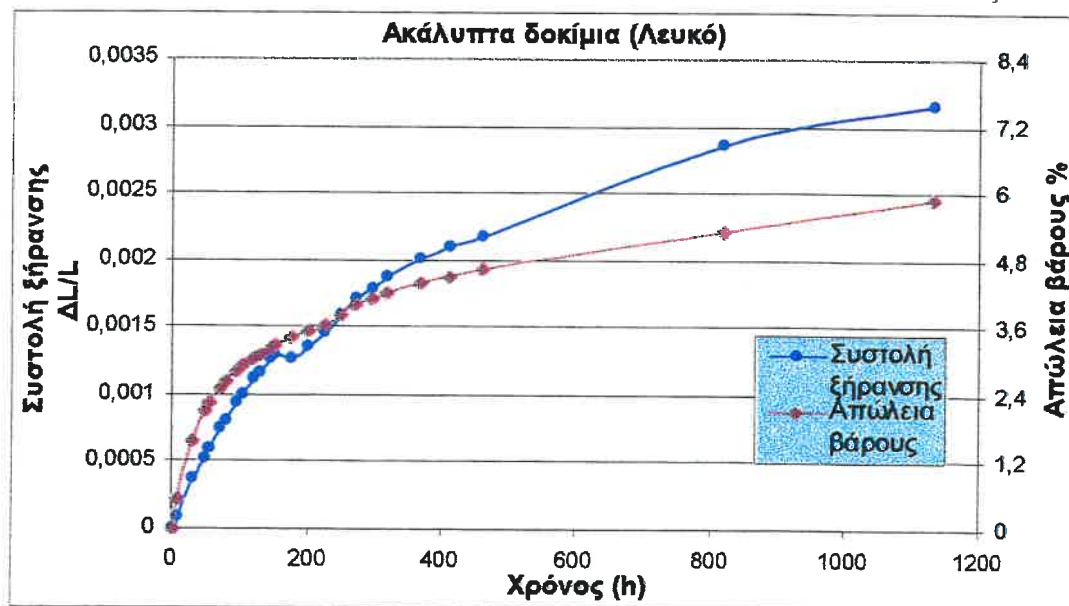
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.1



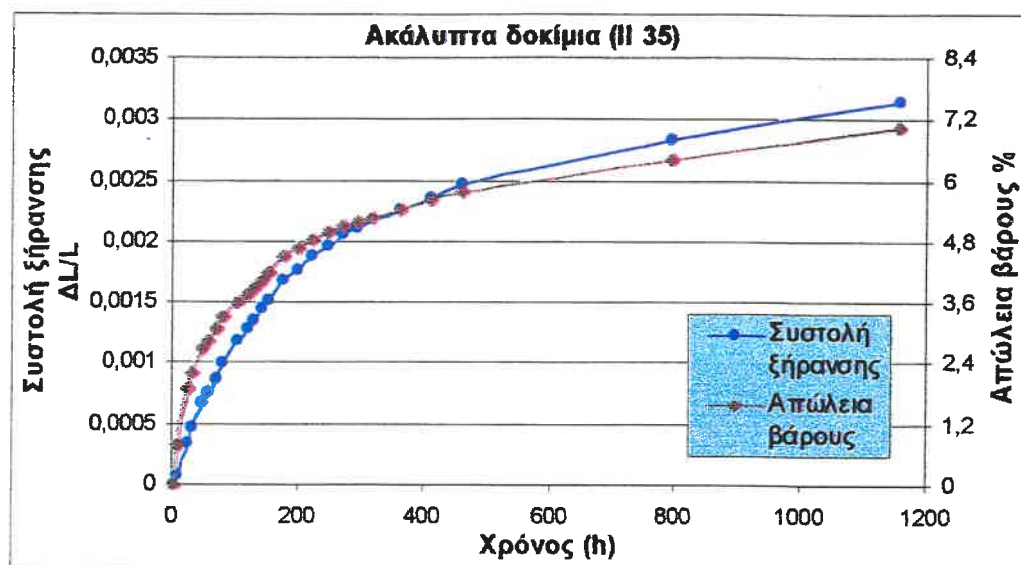
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.2



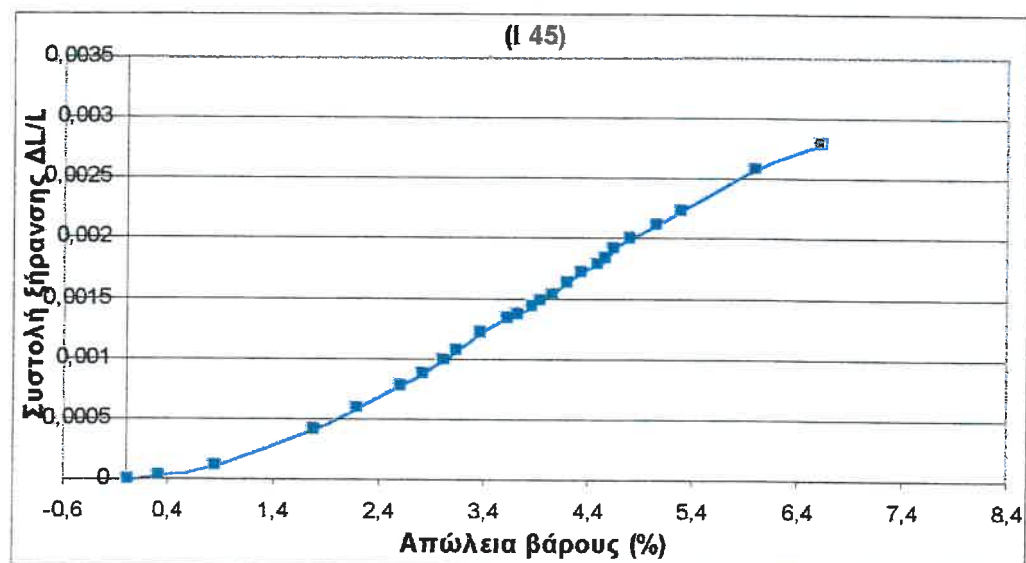
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.3



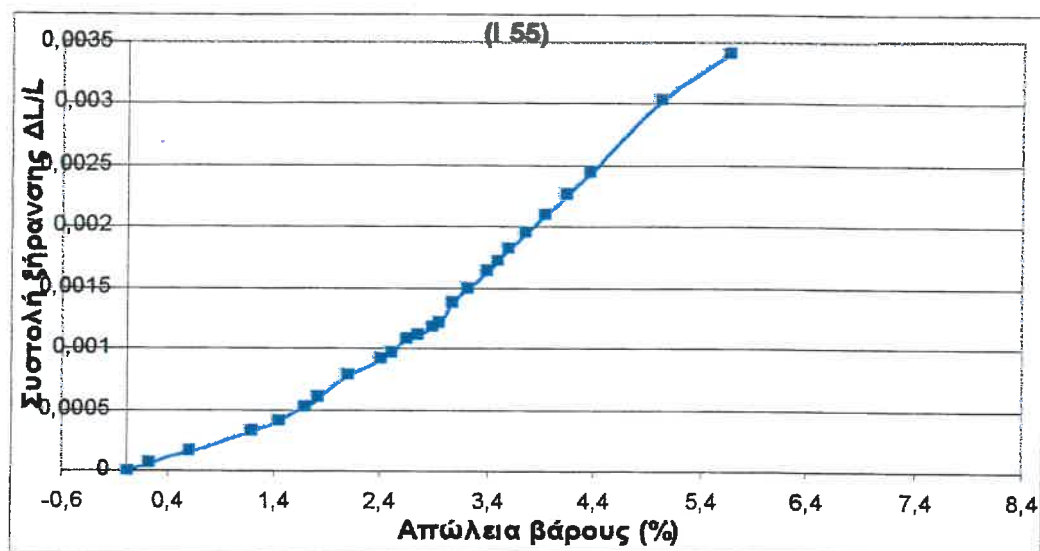
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.4



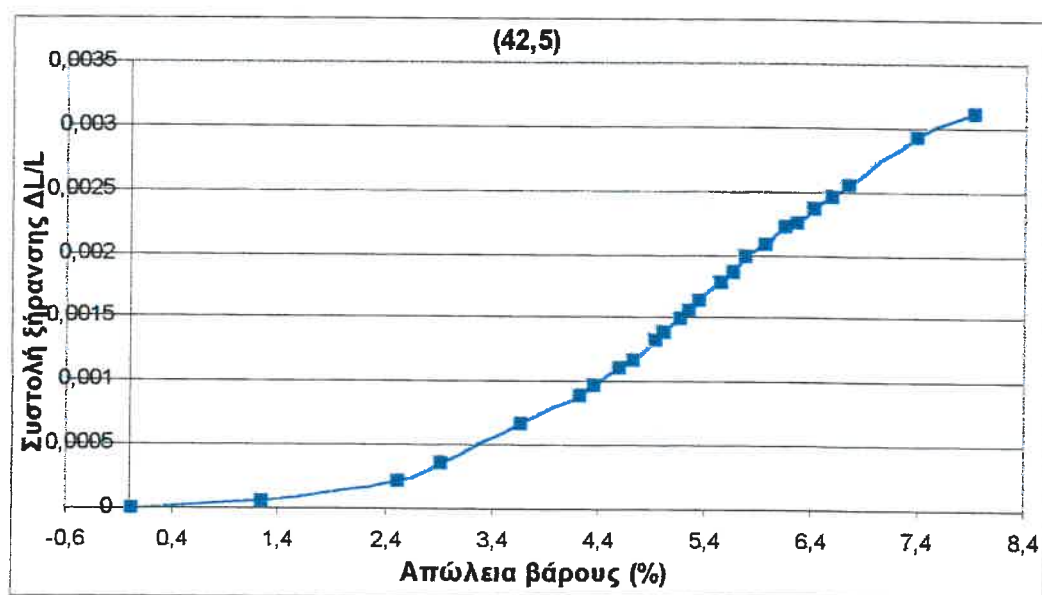
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.5



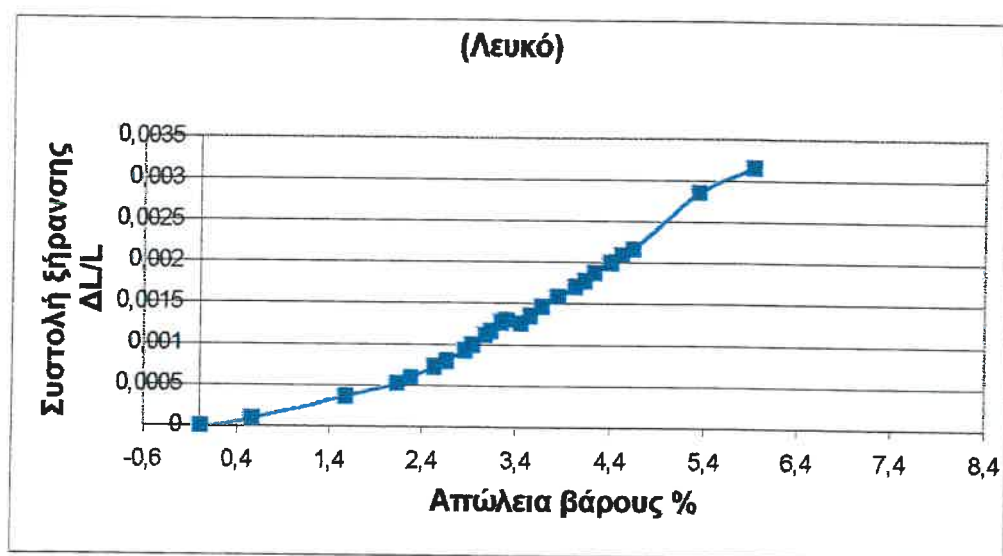
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.6



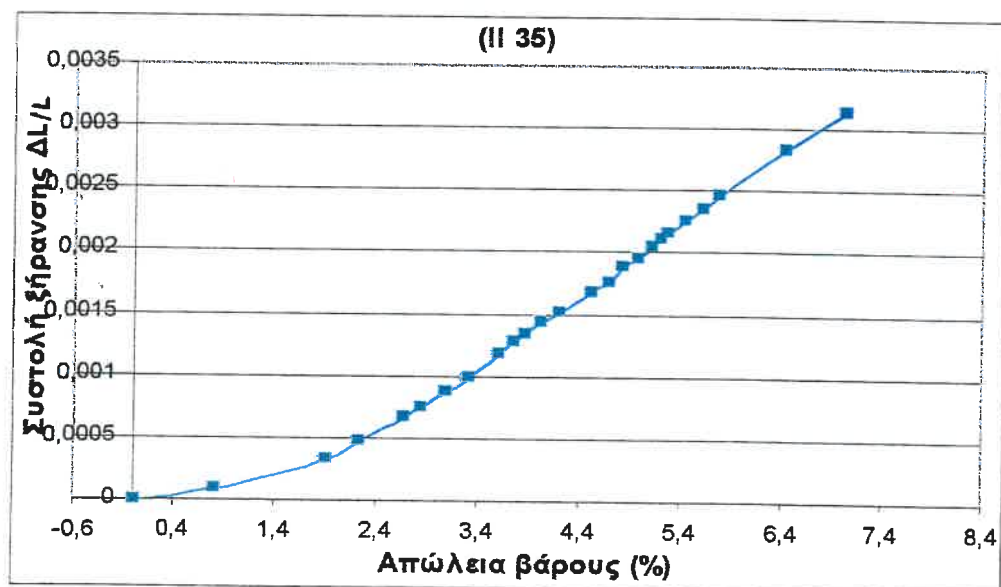
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.7



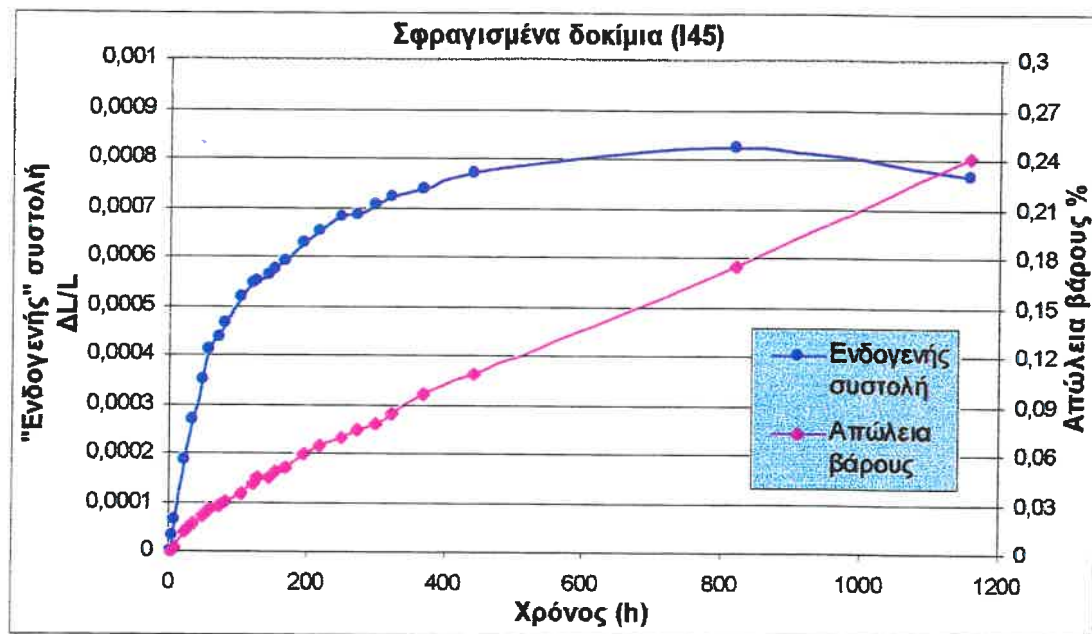
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.8



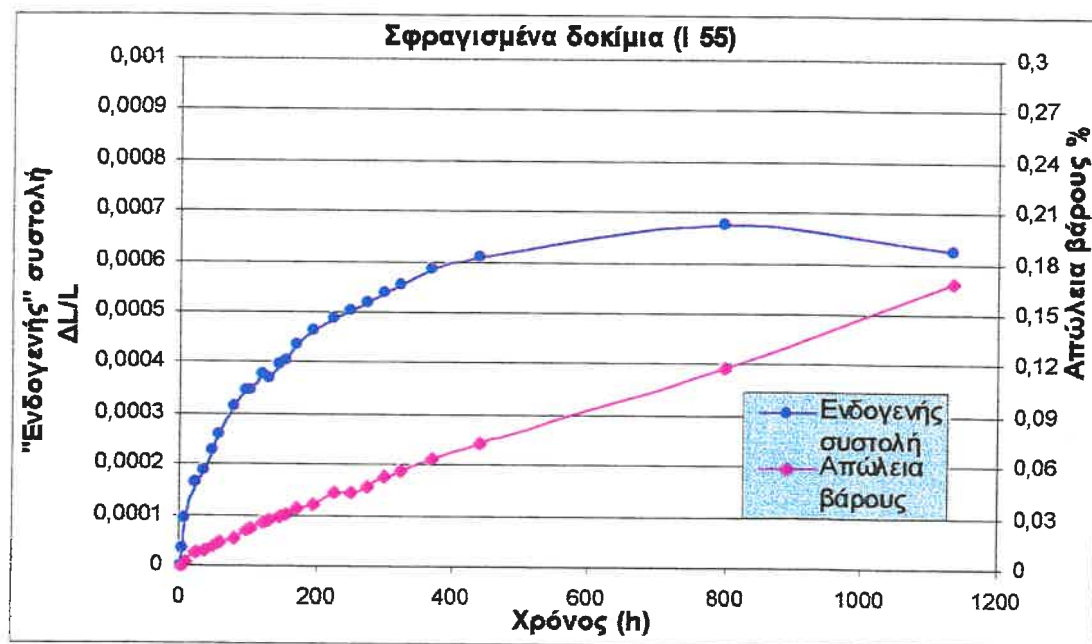
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.9



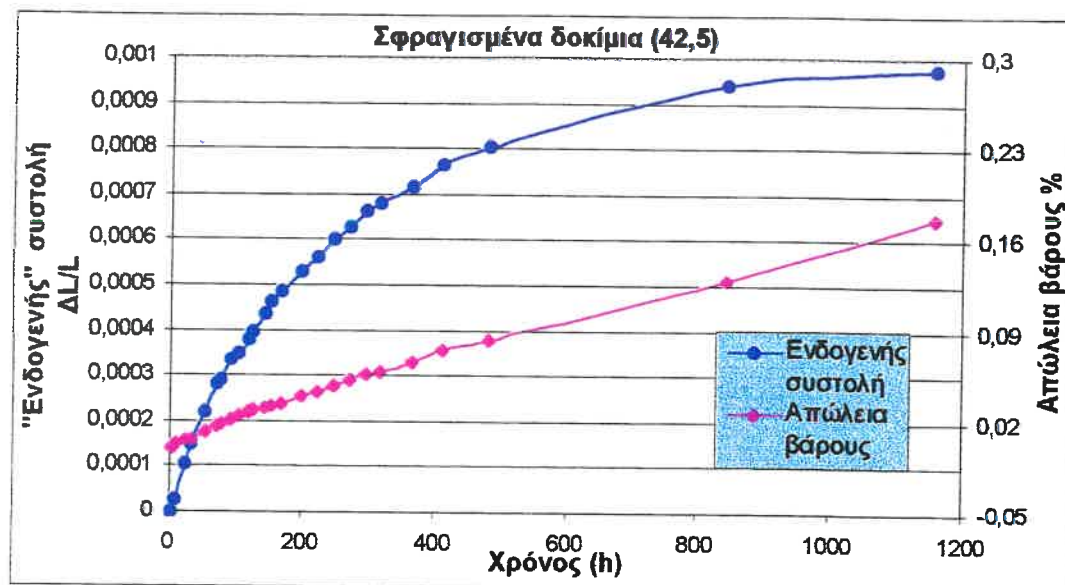
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.10



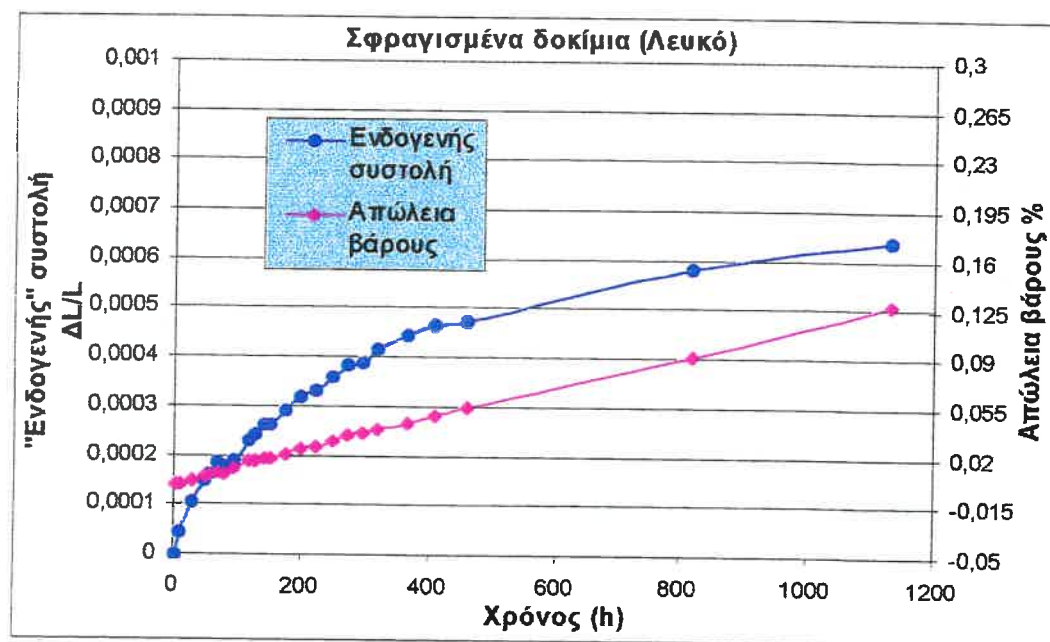
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.11



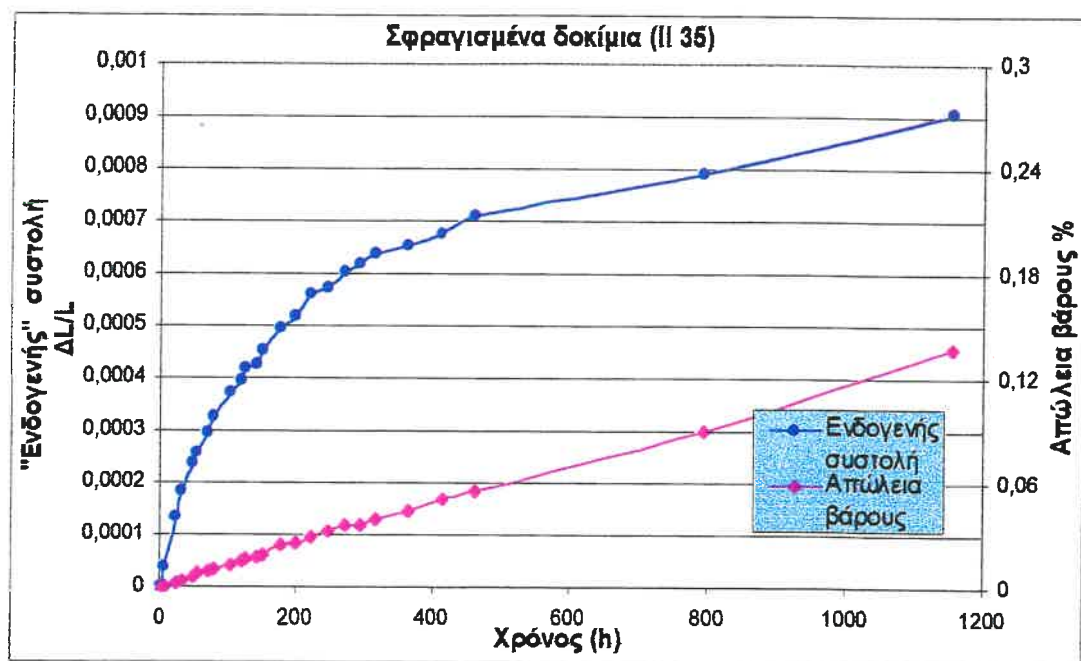
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.12



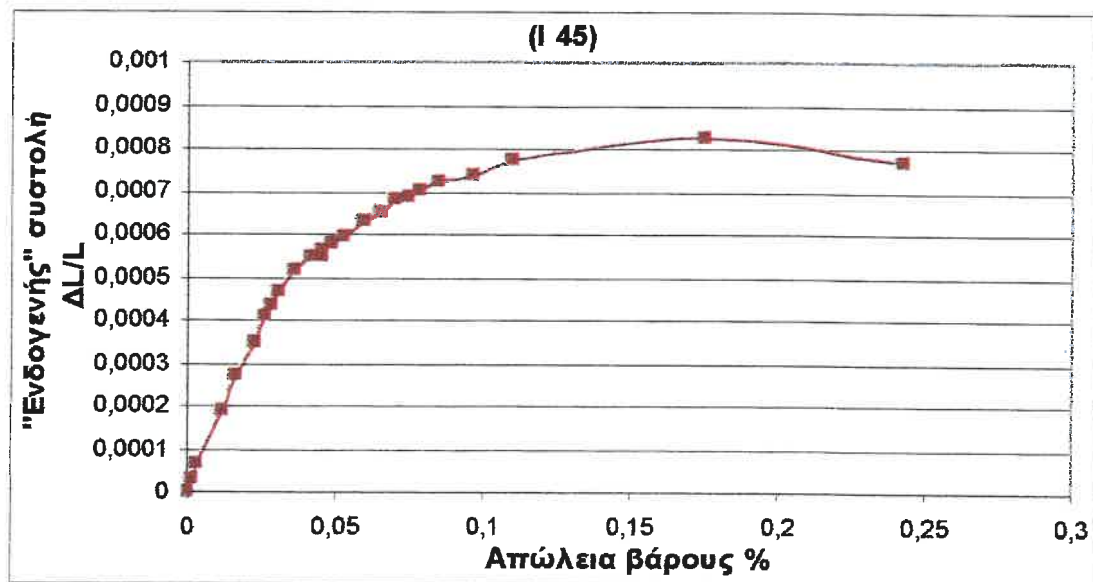
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.13



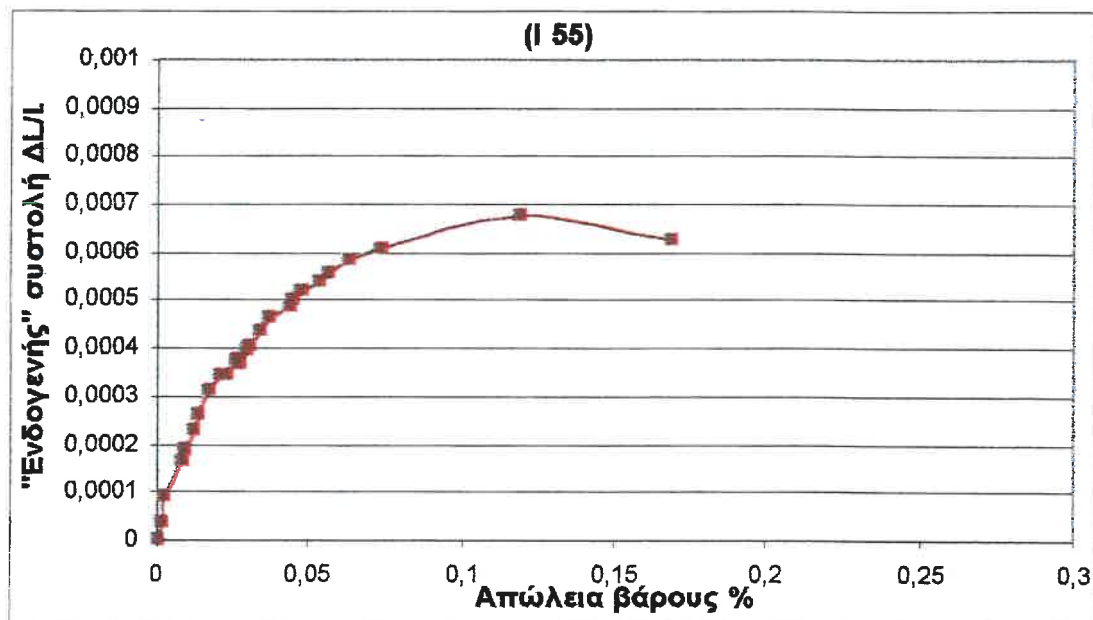
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.14



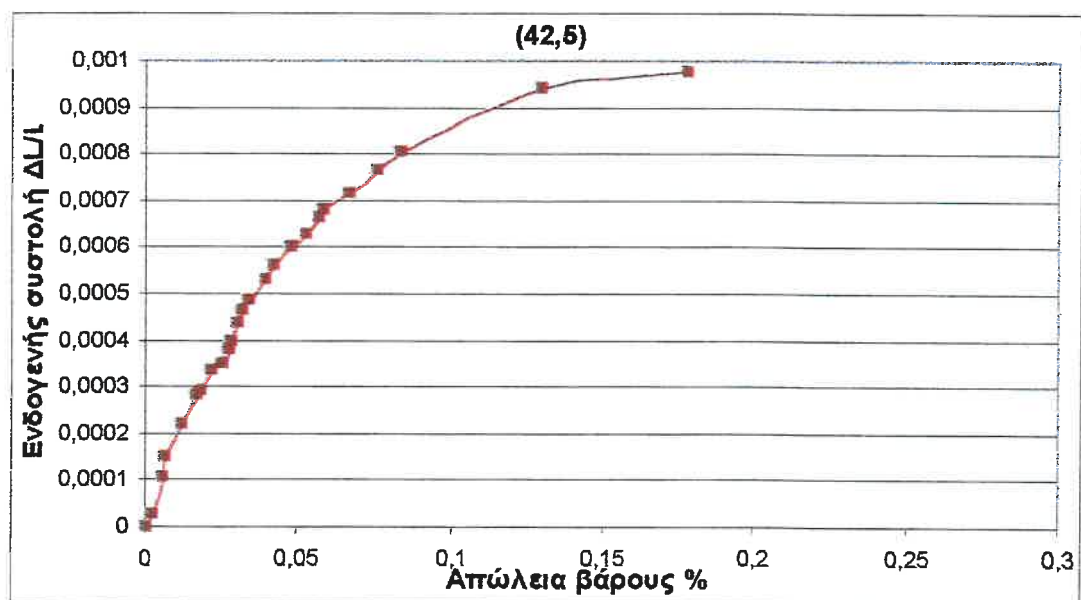
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.15



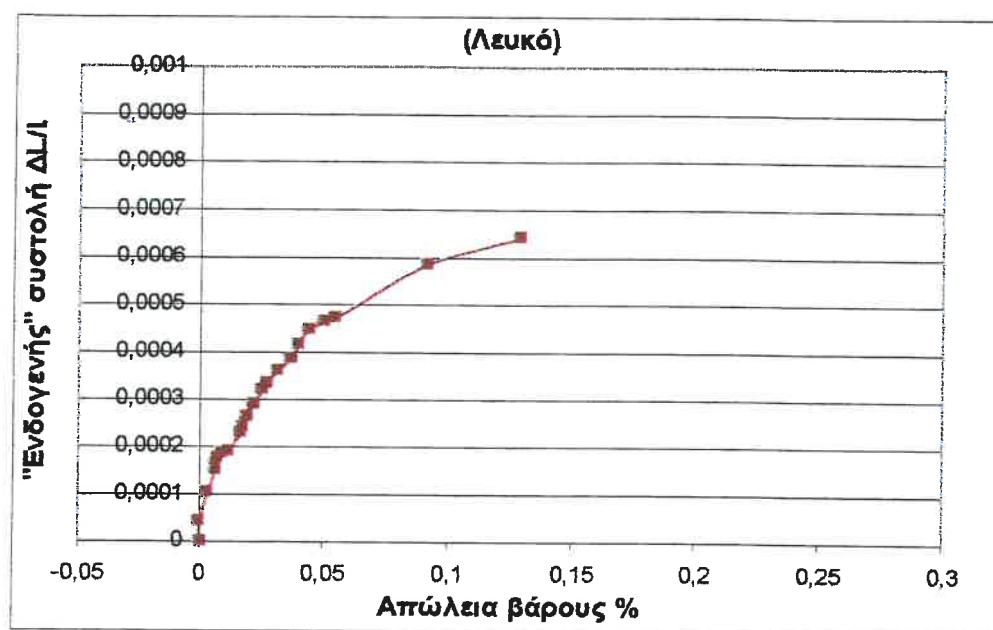
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.16



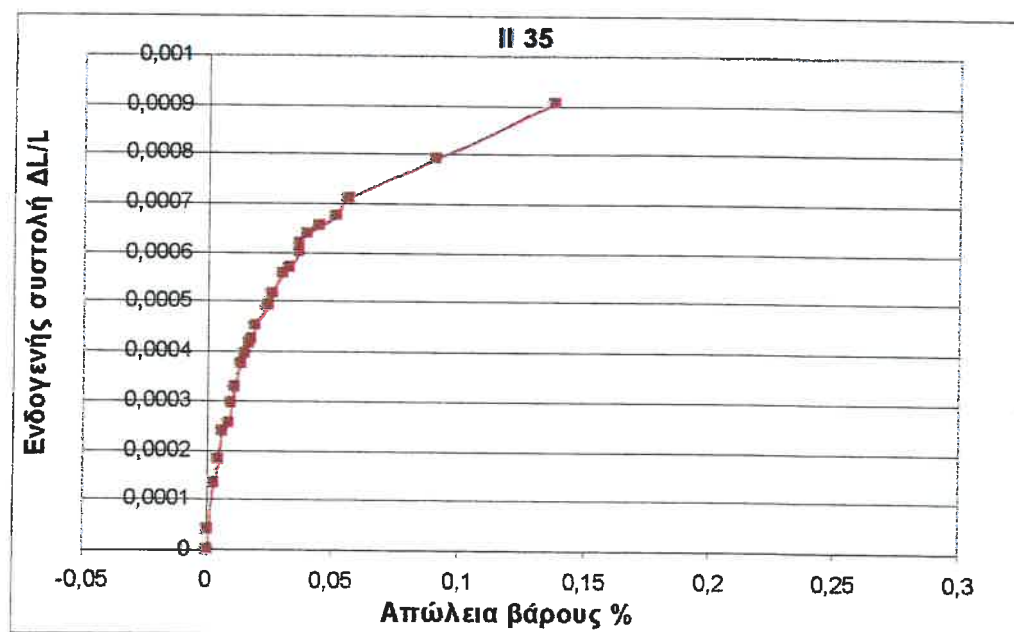
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.17



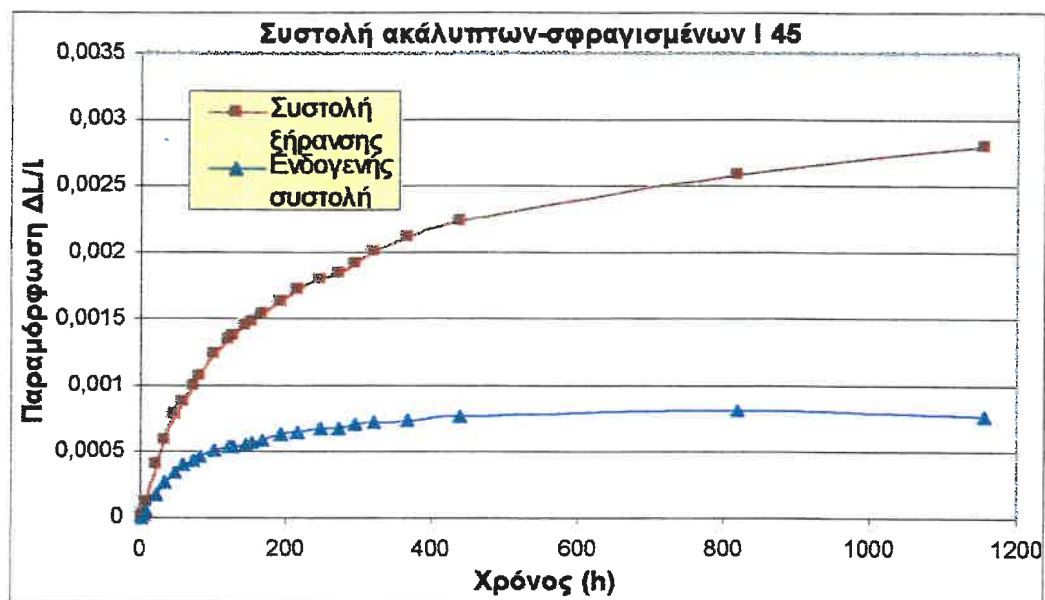
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.18



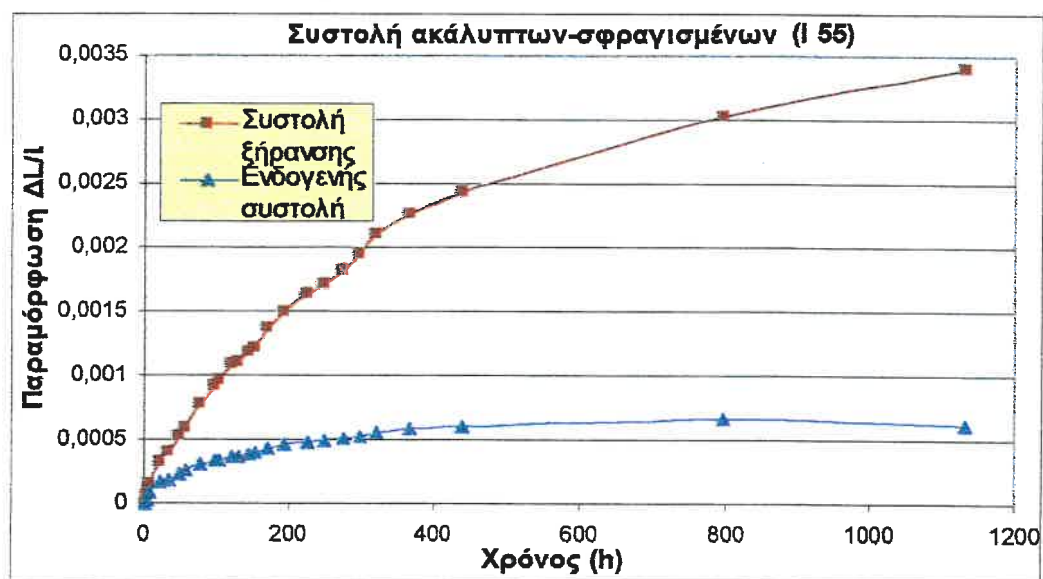
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.19



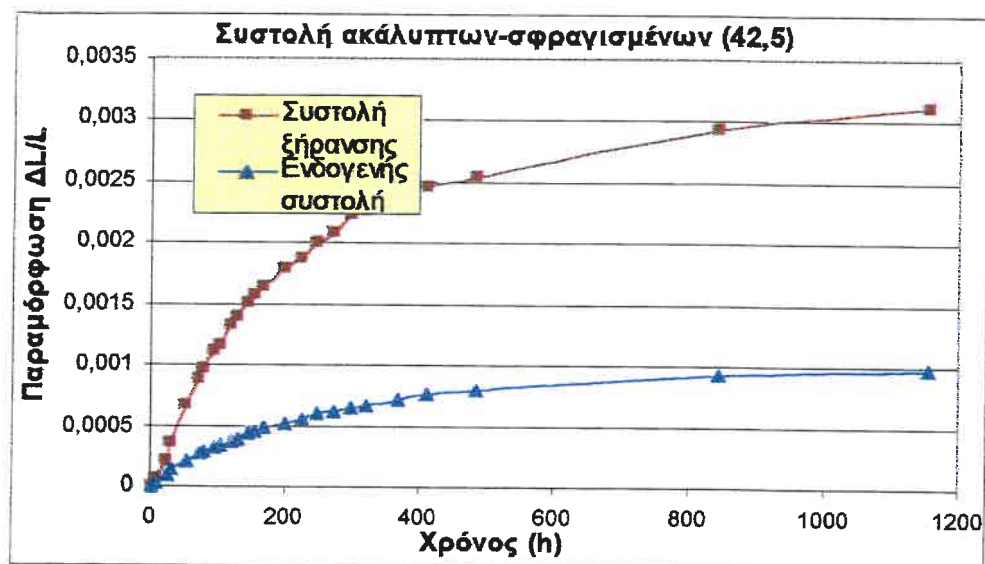
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.20



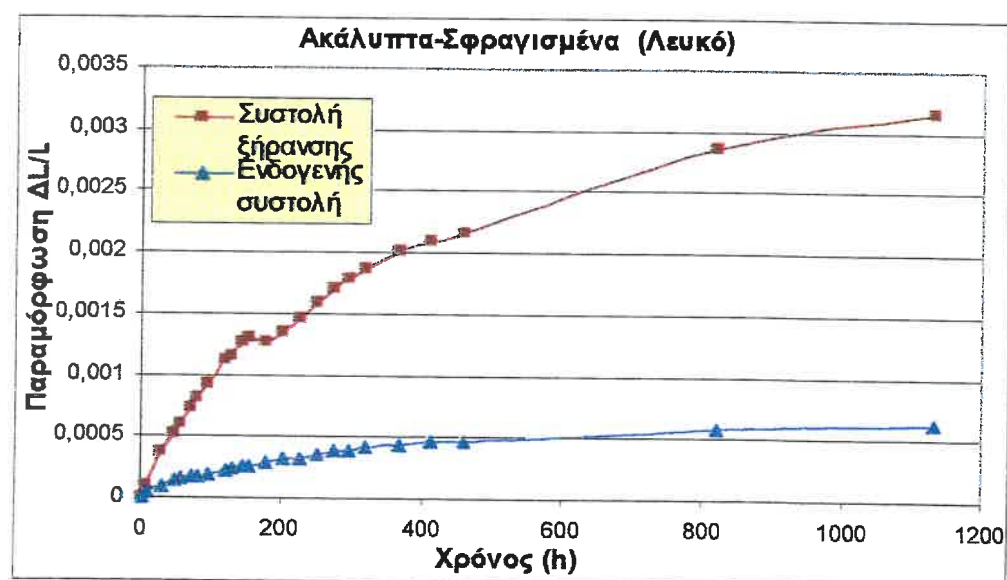
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.21



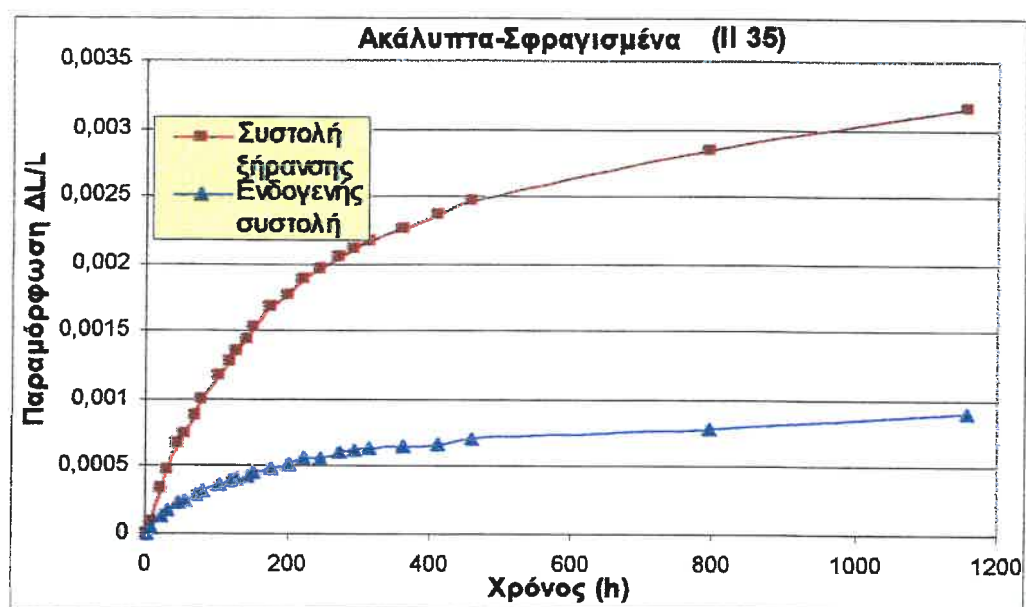
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.22



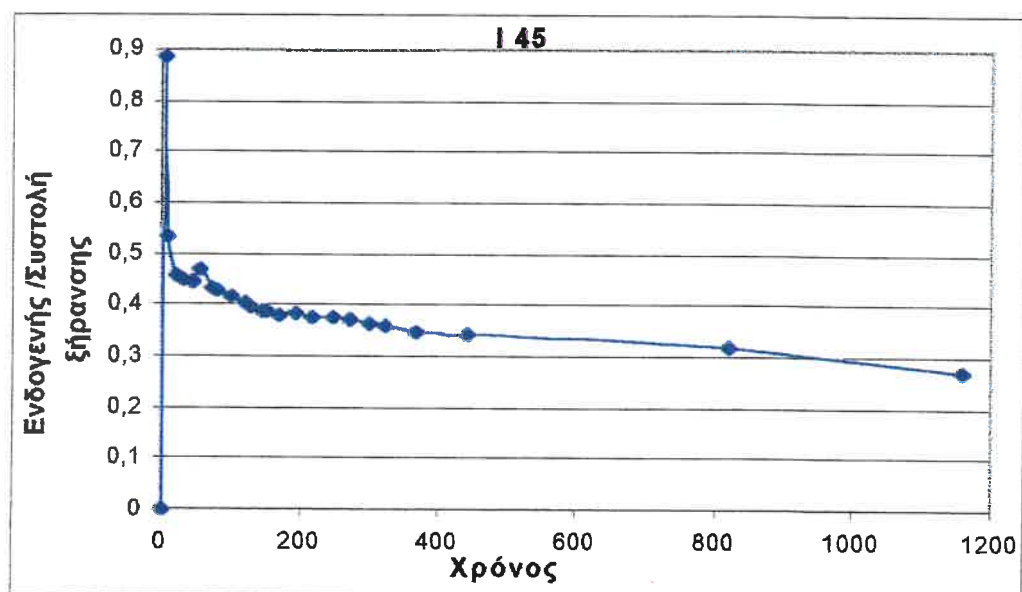
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.23



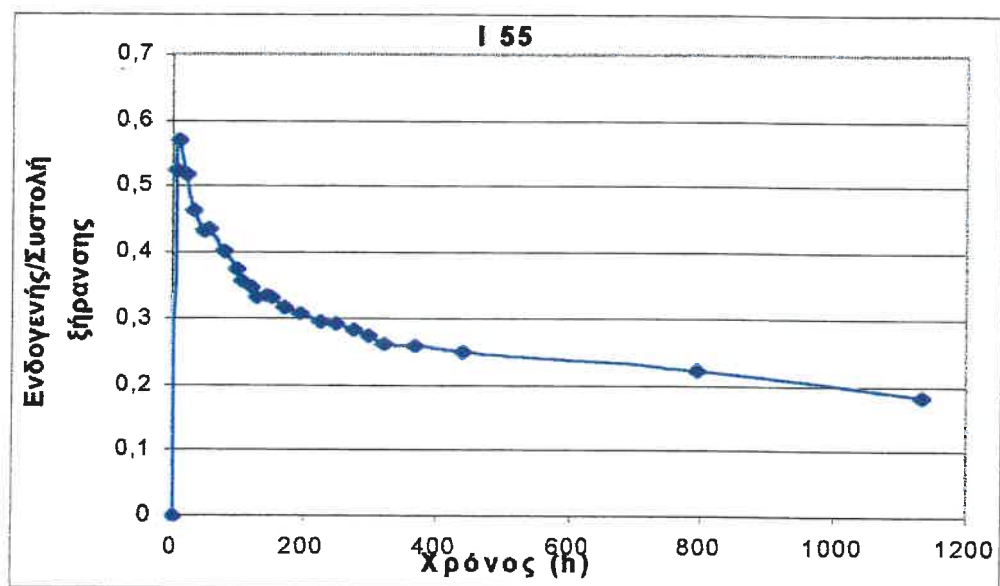
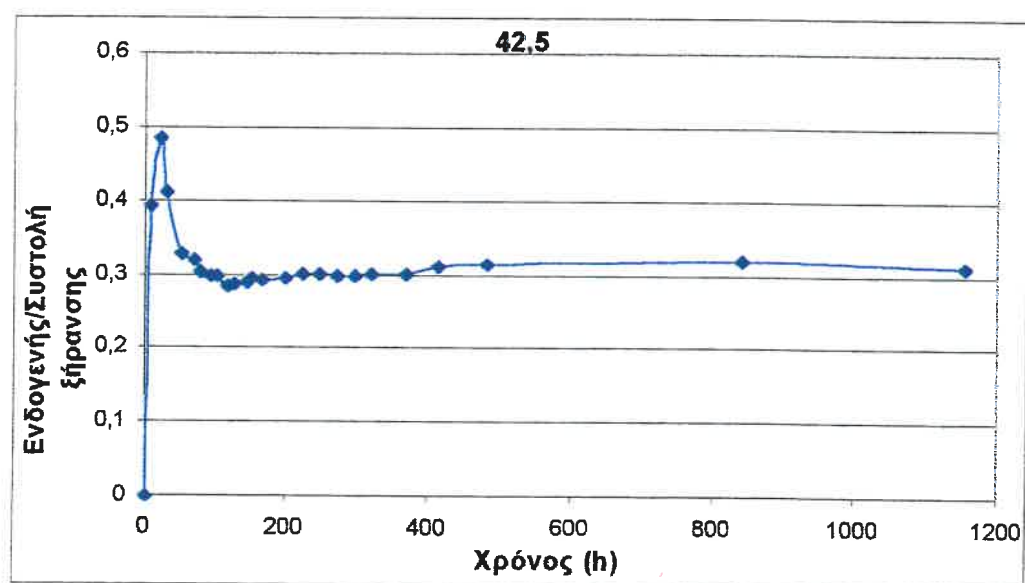
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.24

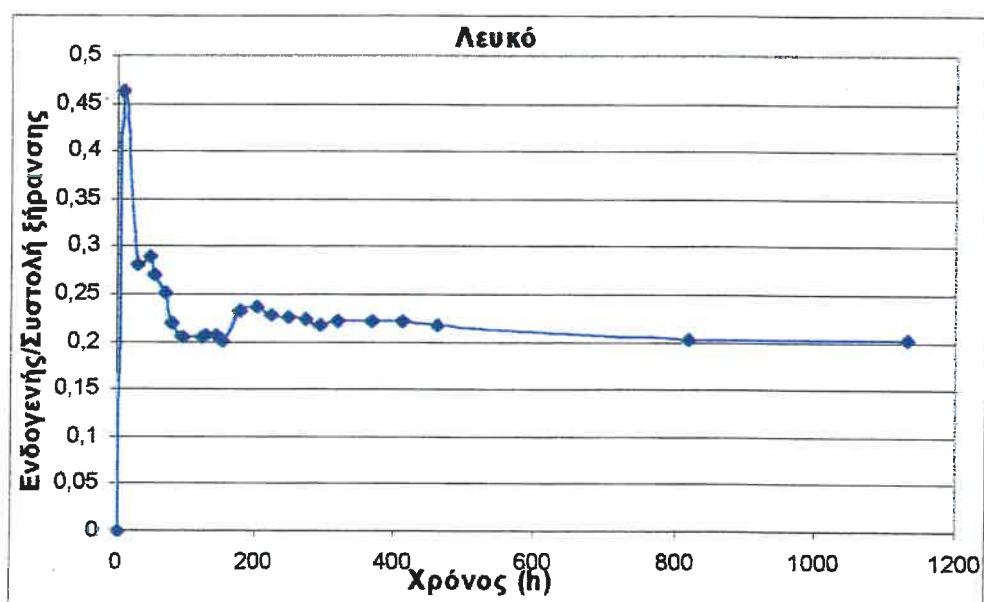
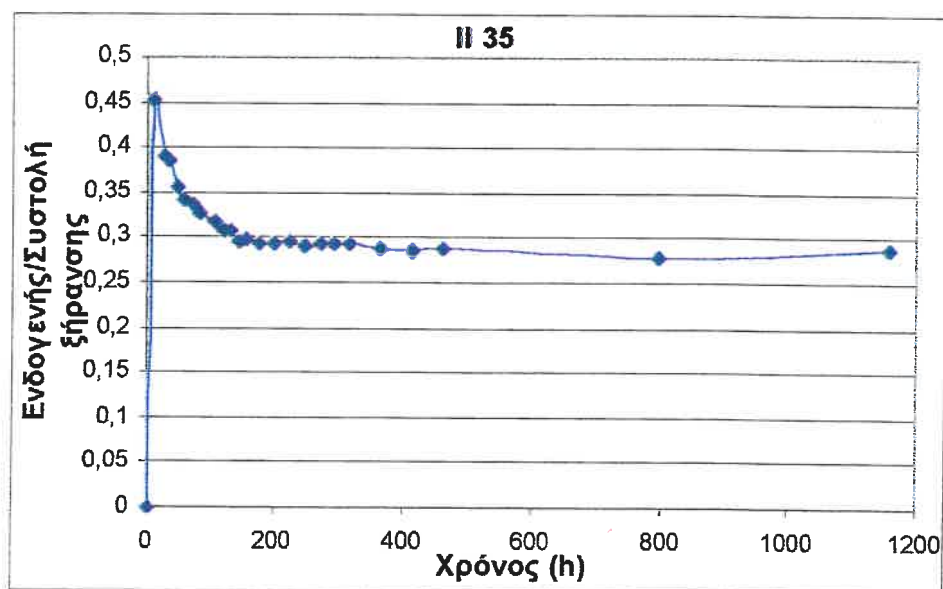


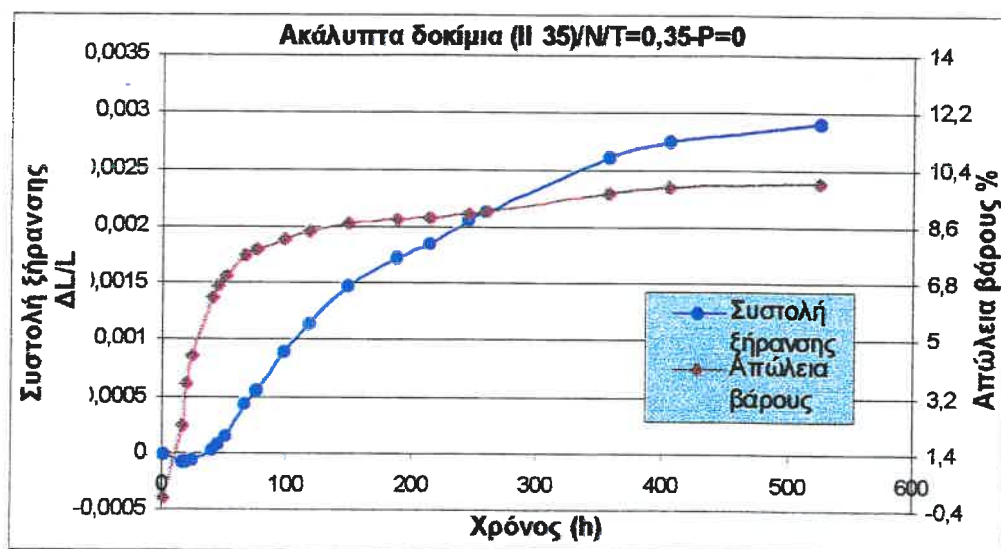
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.25



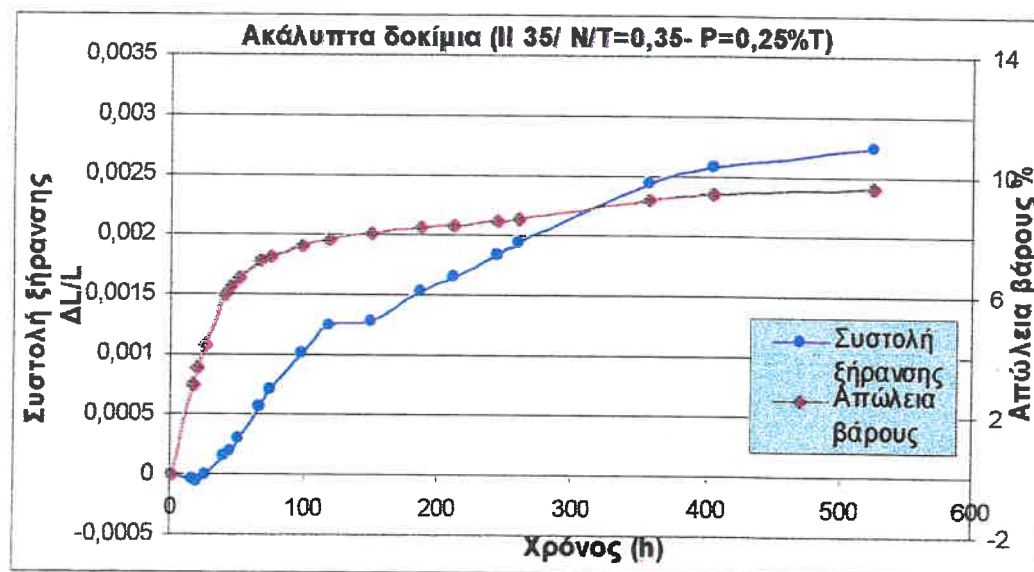
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.26

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.27ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.28

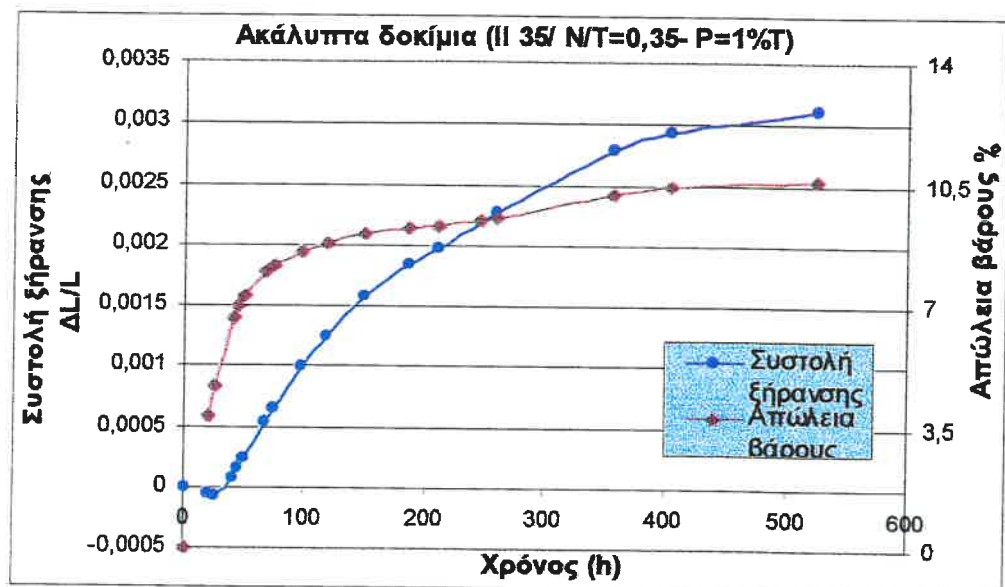
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.29ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1.30



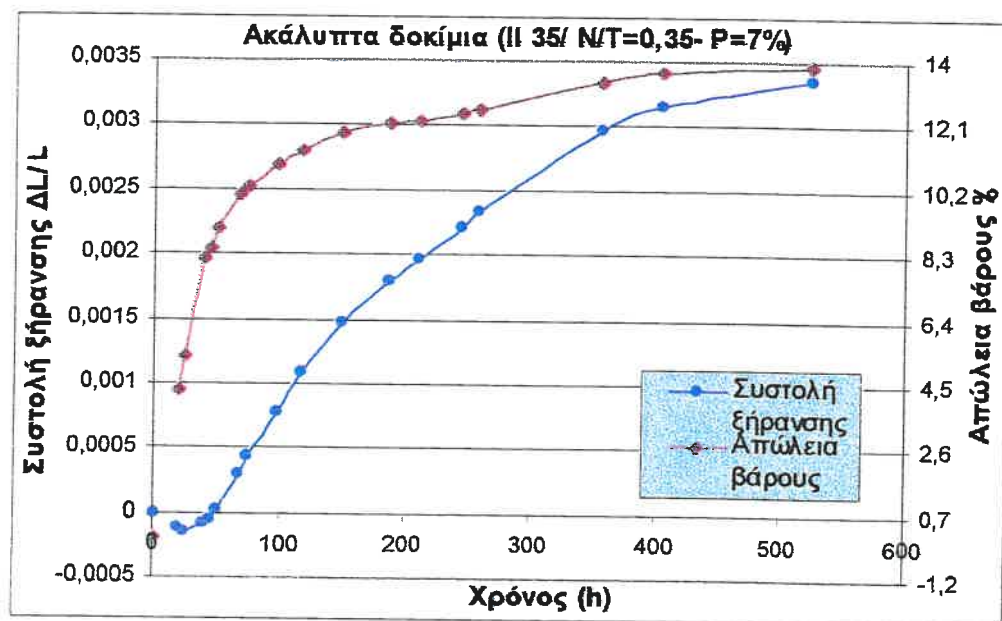
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2.1



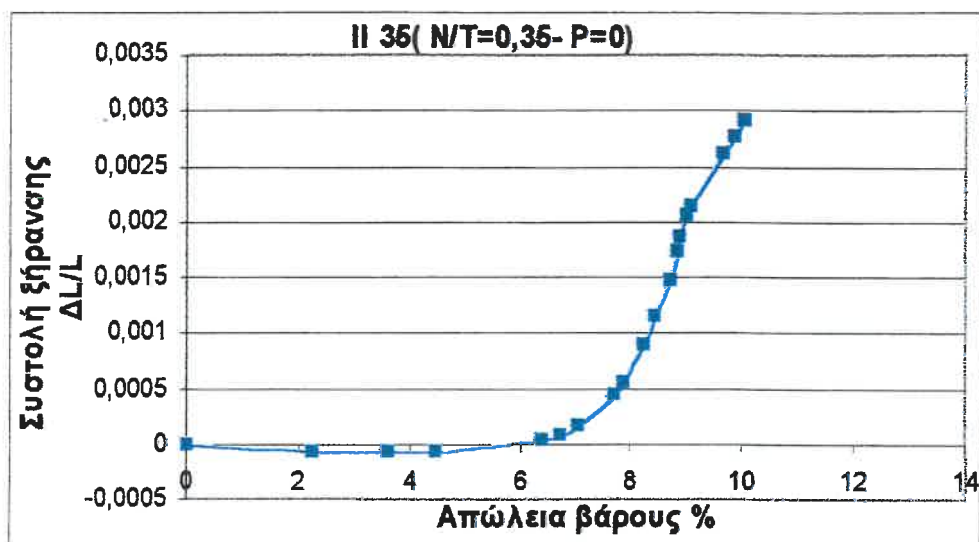
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2.2



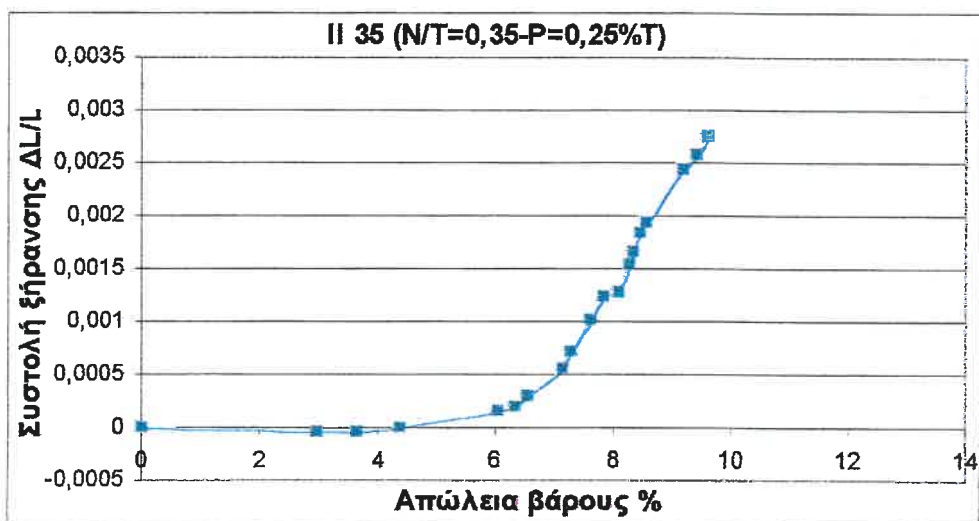
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2.3



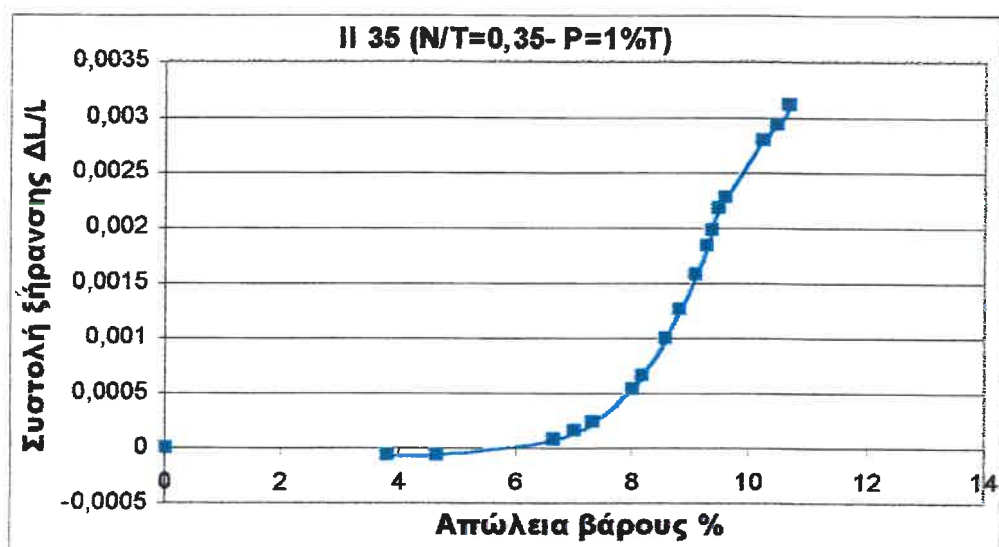
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2.4



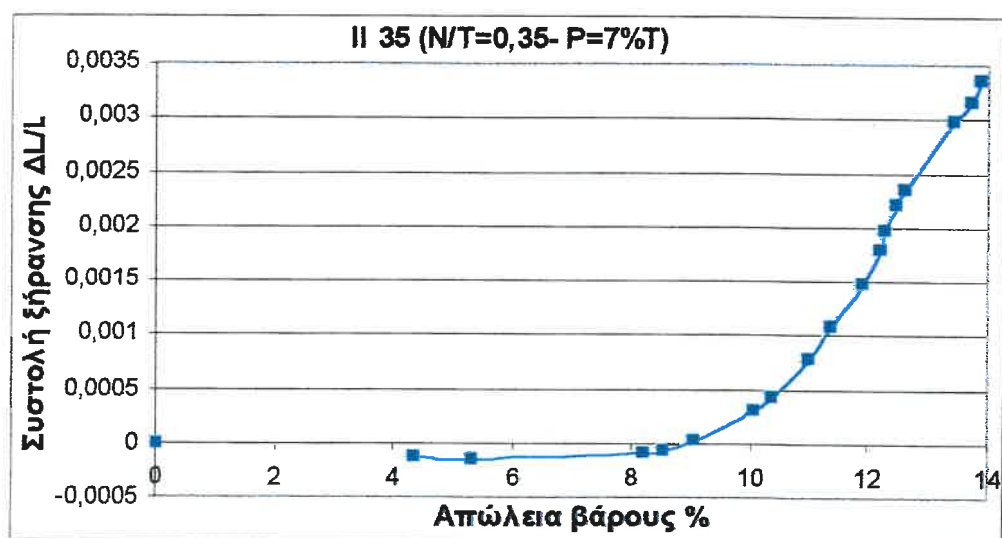
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2.5



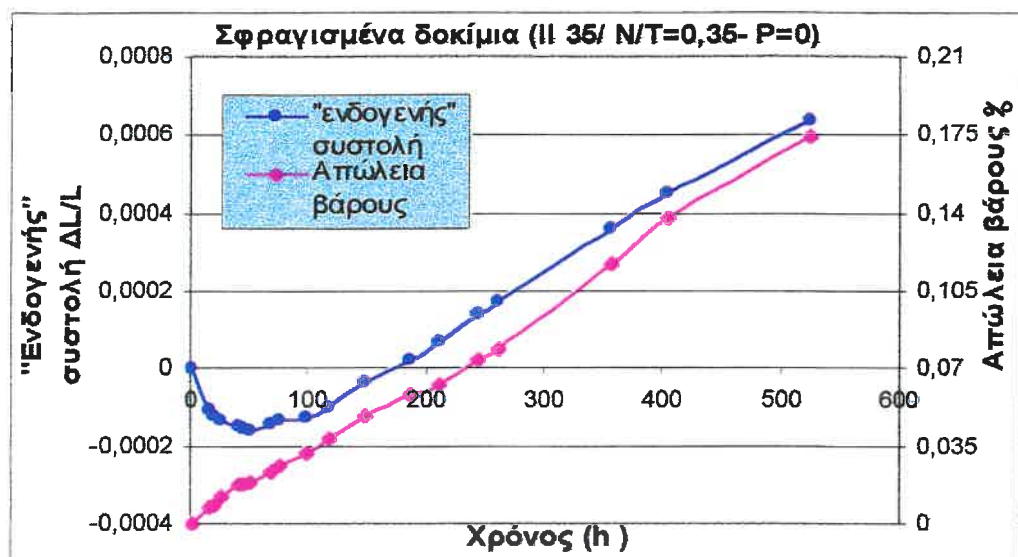
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2.6



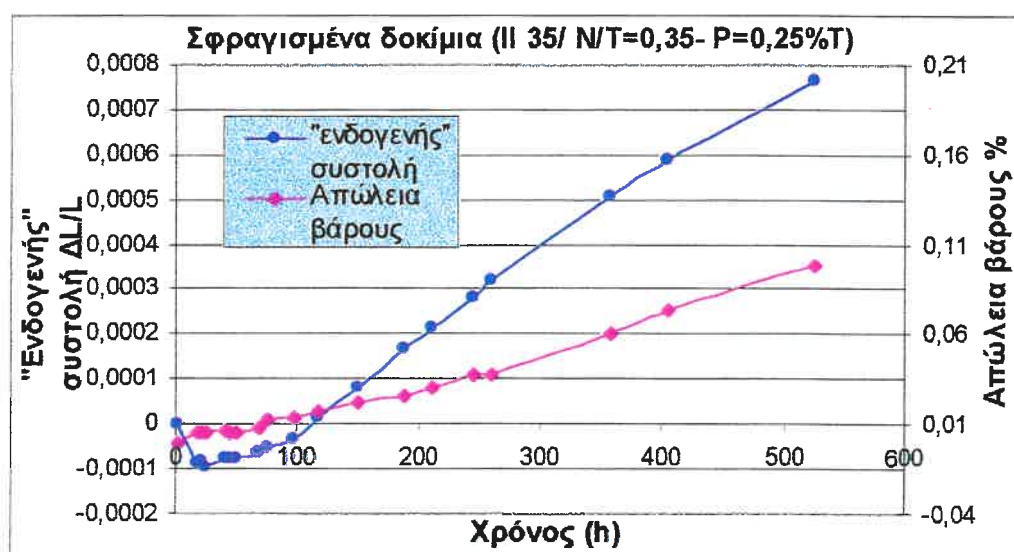
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2.7



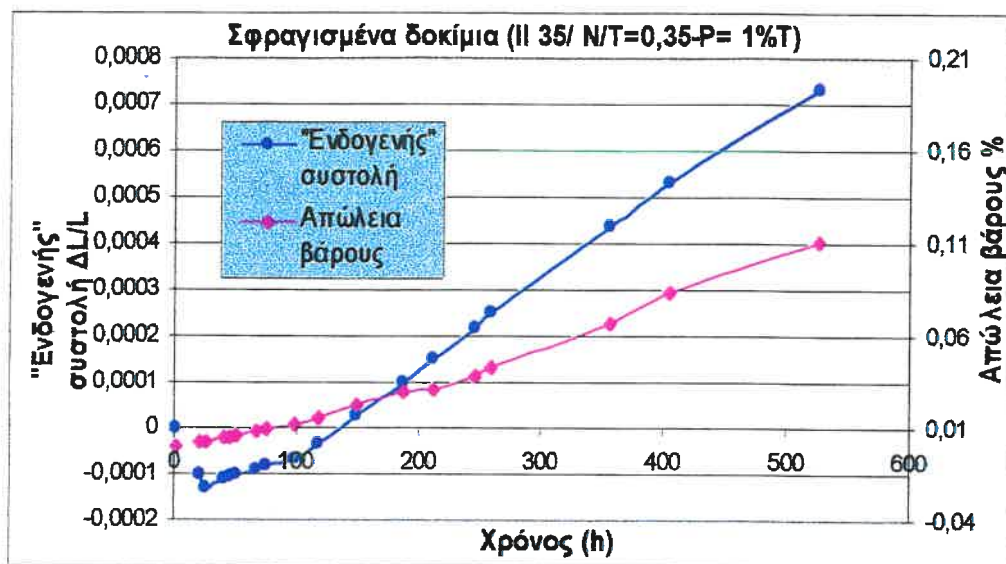
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2.8



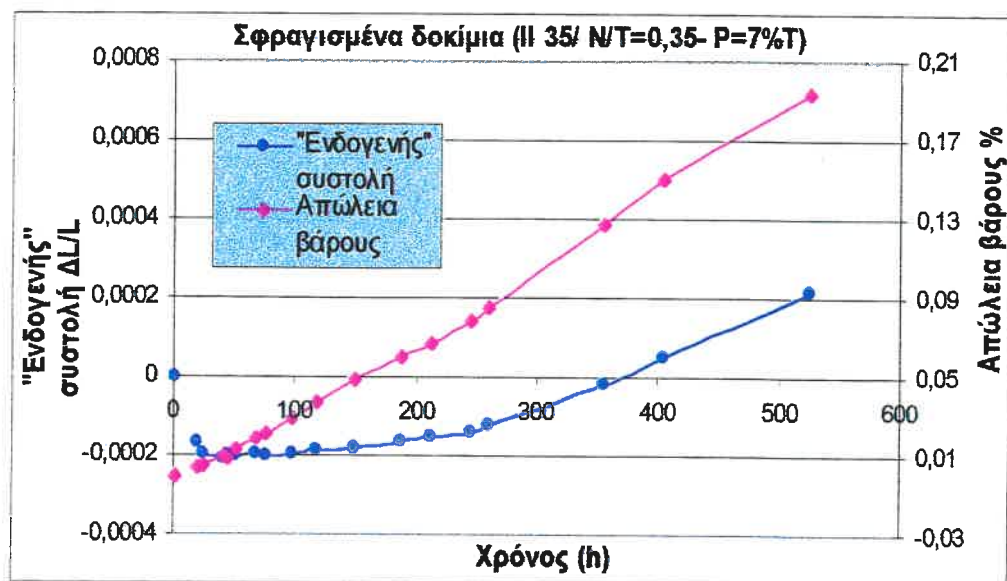
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2.9



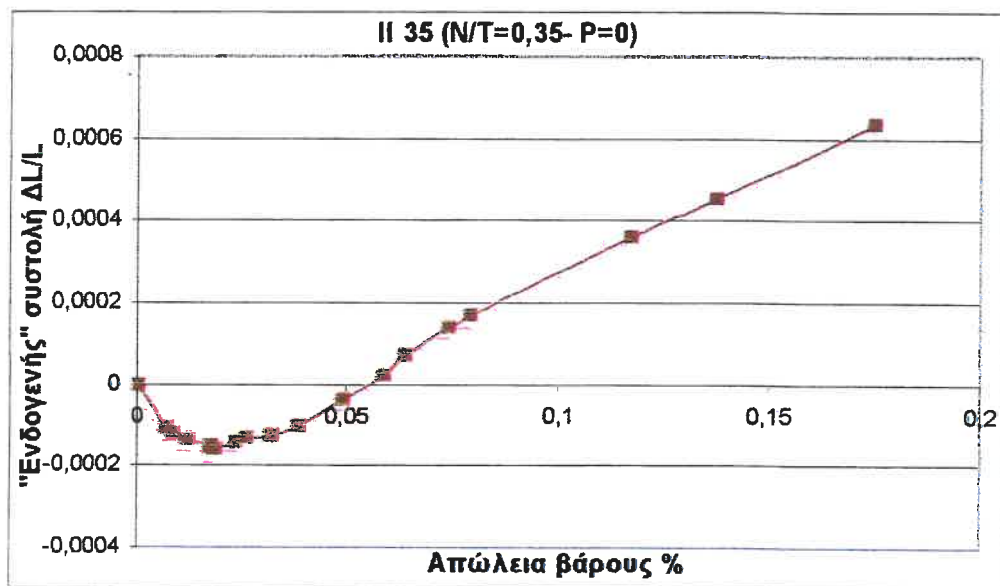
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2.10



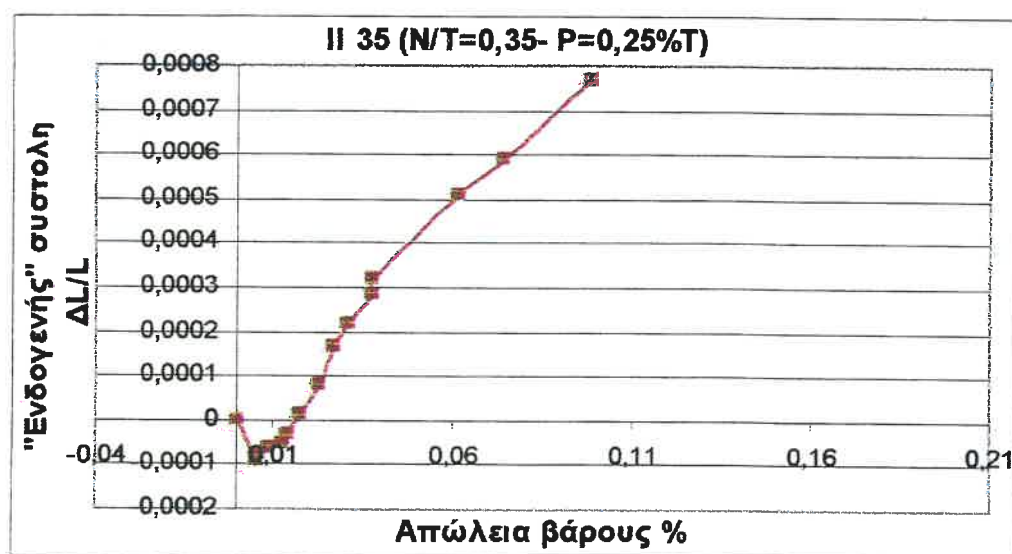
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2.11



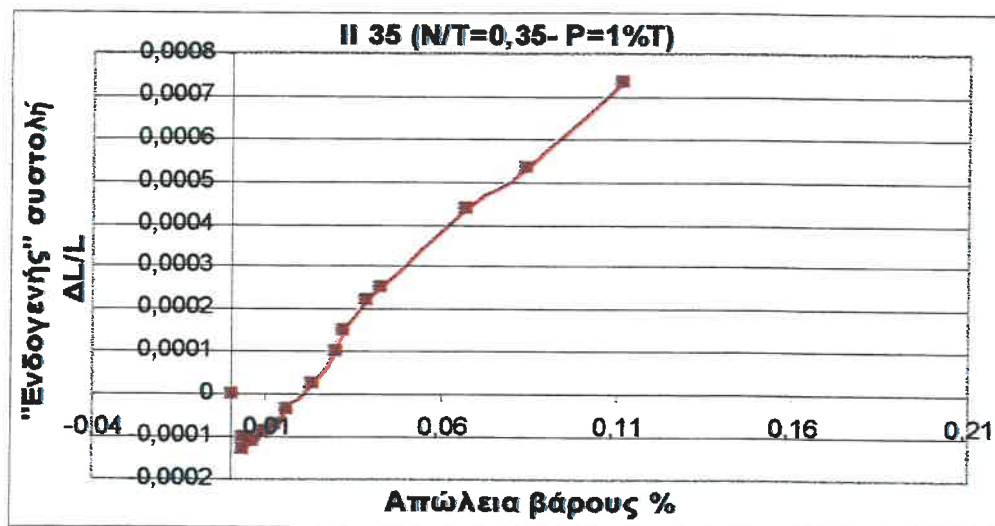
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2.12



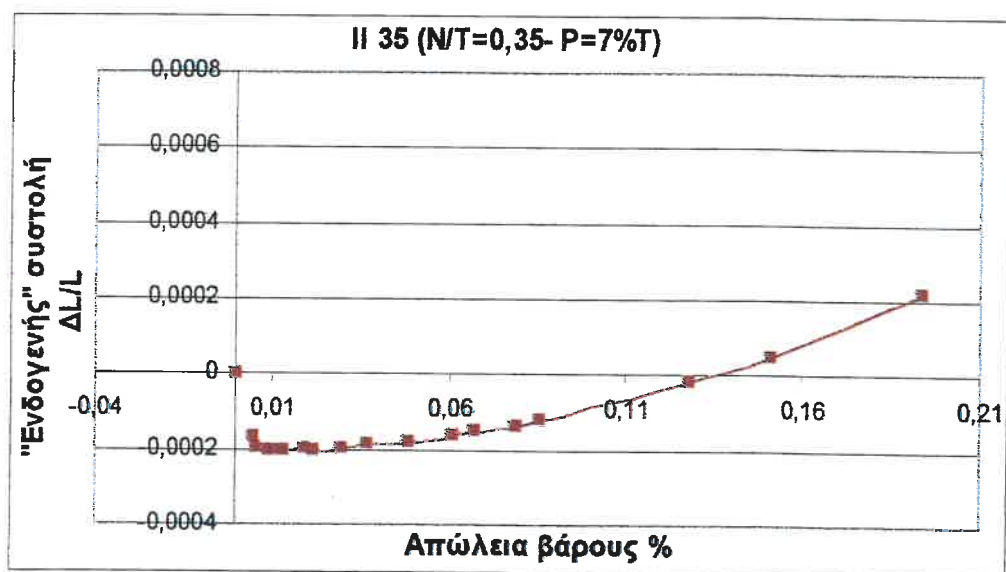
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2.13



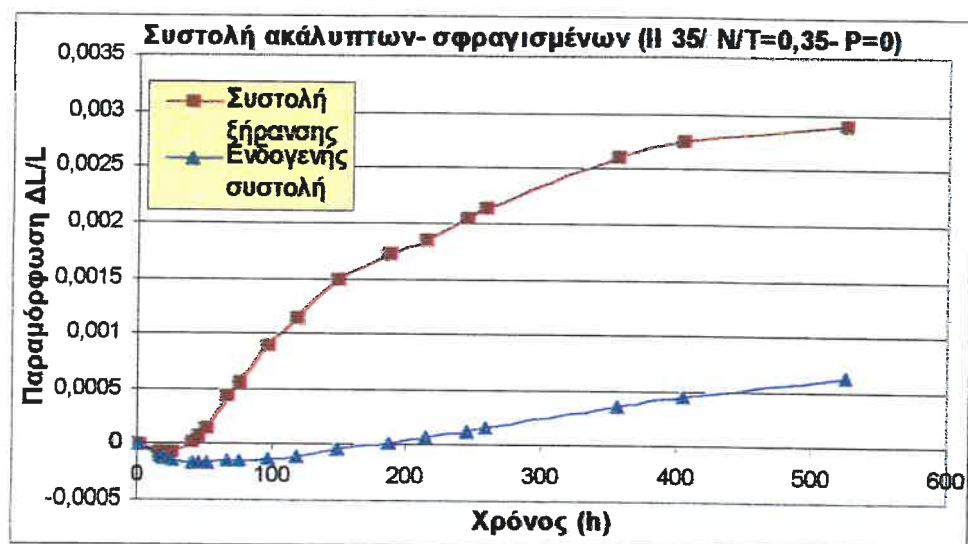
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2.14



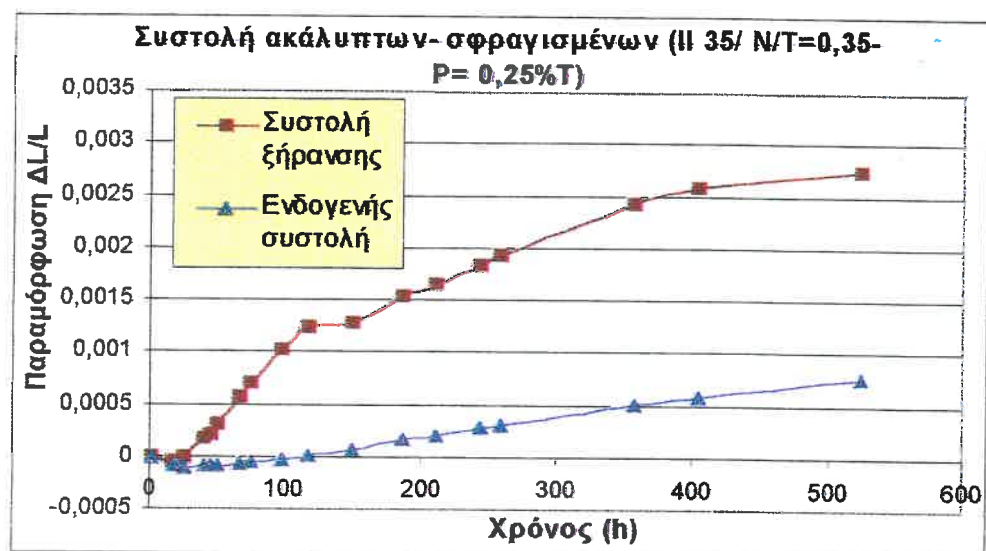
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2.15



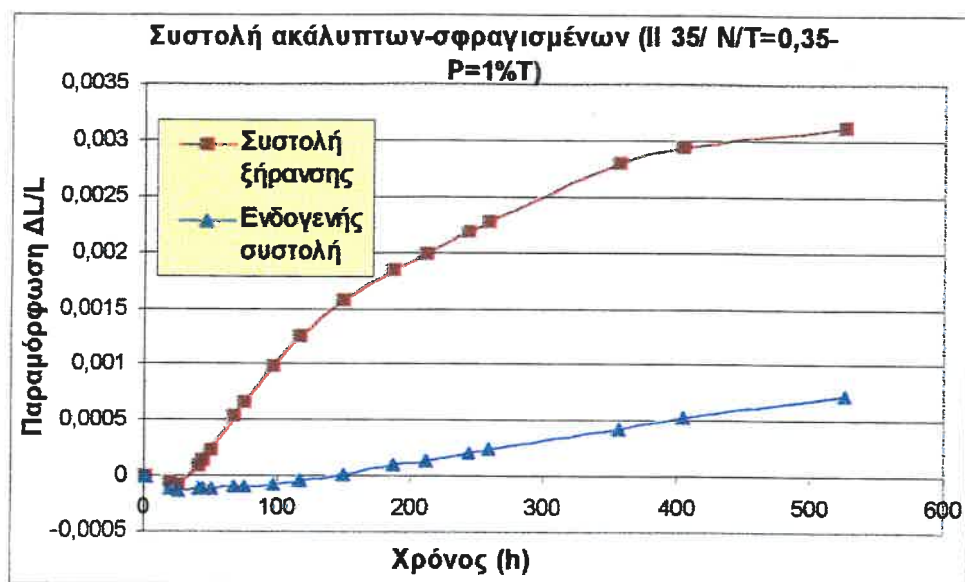
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2.16



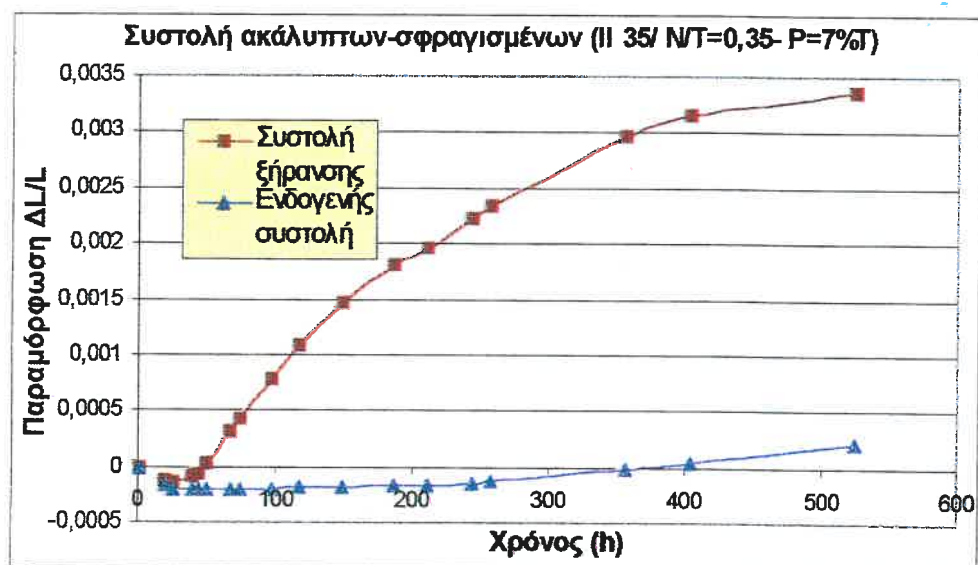
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2.17



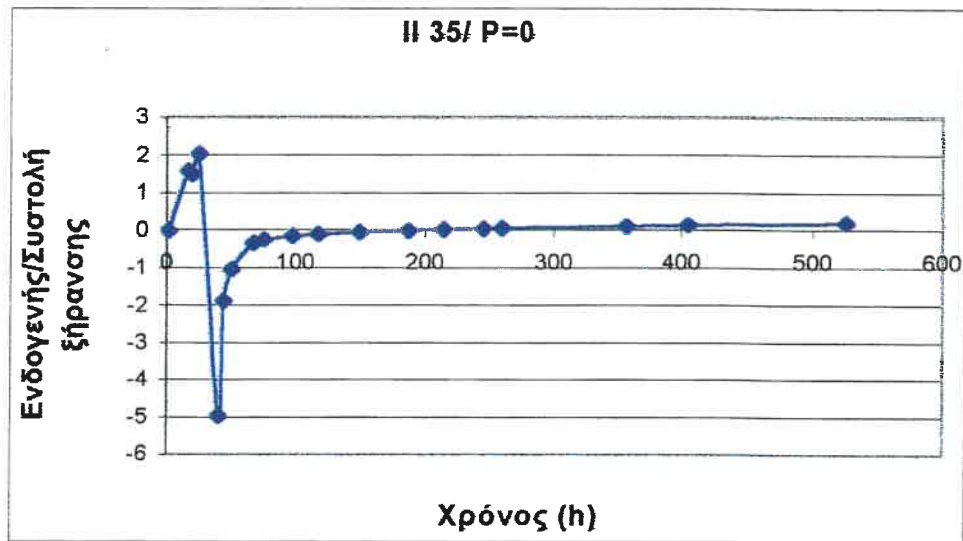
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2.18



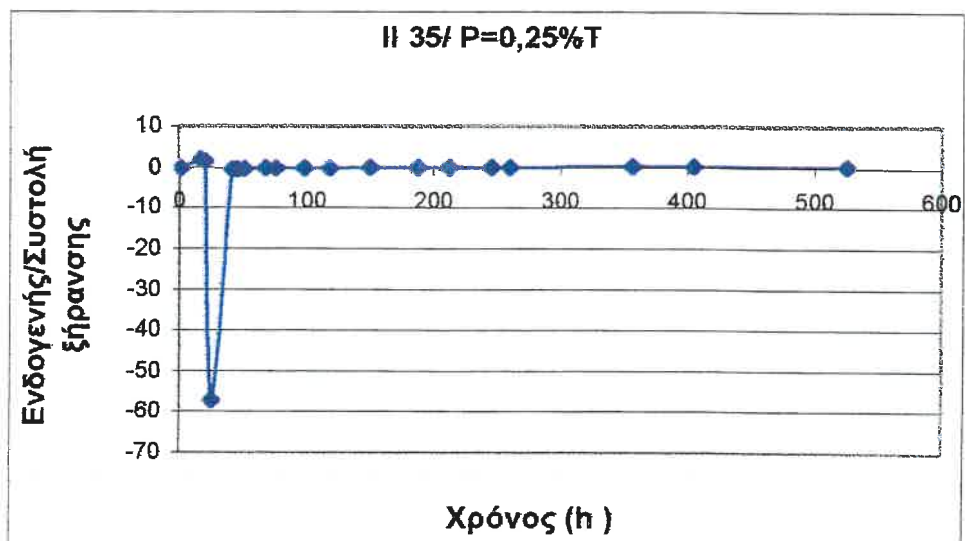
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2.19



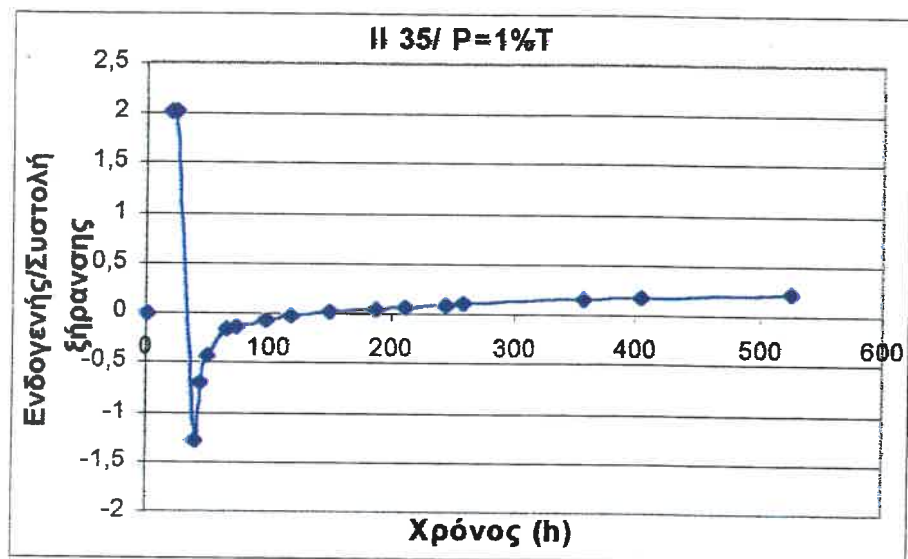
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2.20



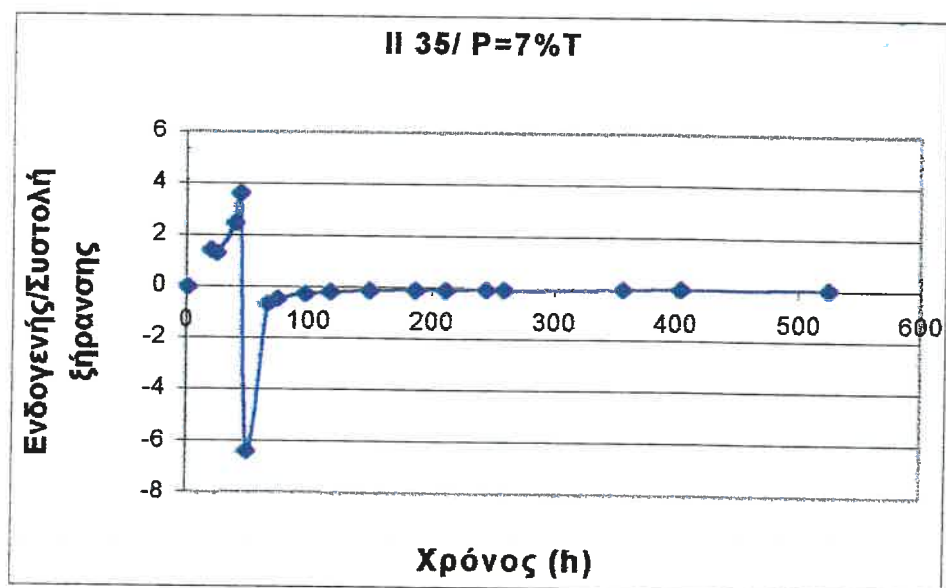
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2.21



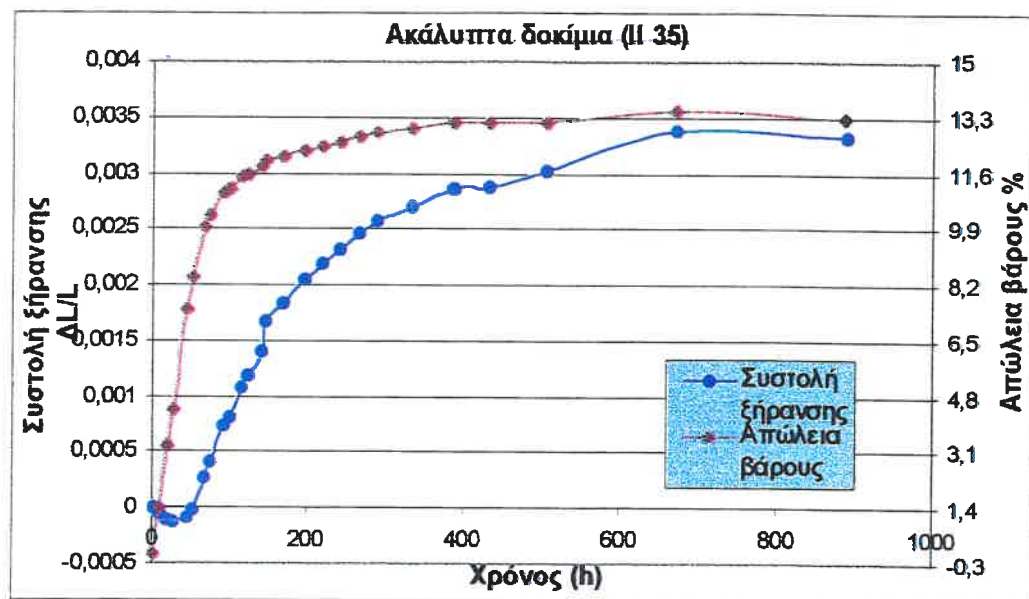
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2.22



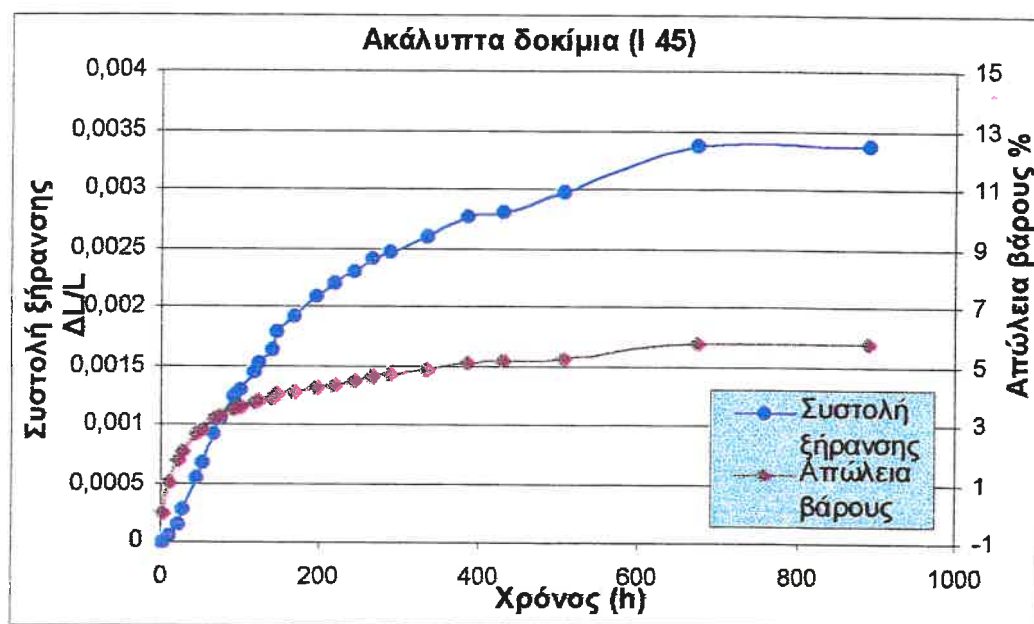
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2.23



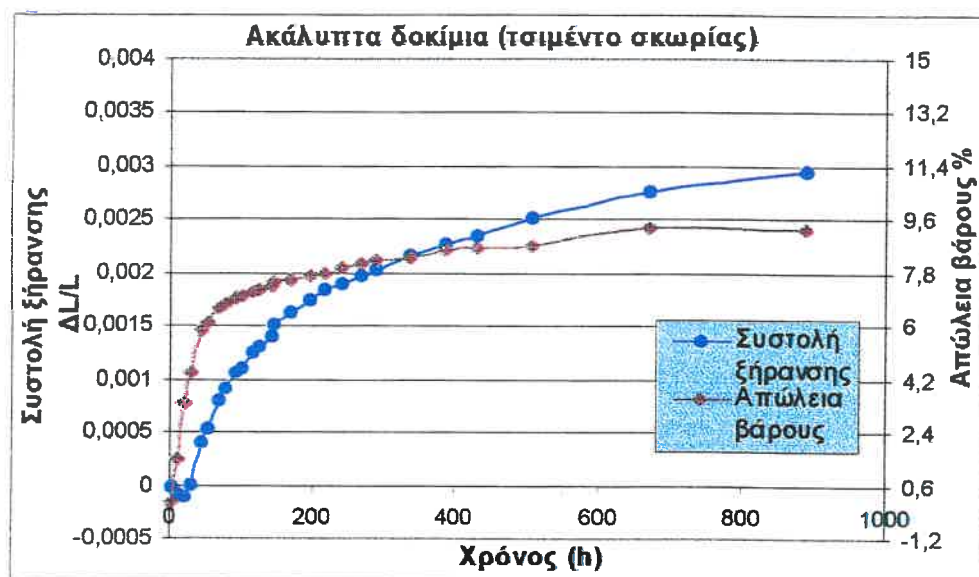
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2.24



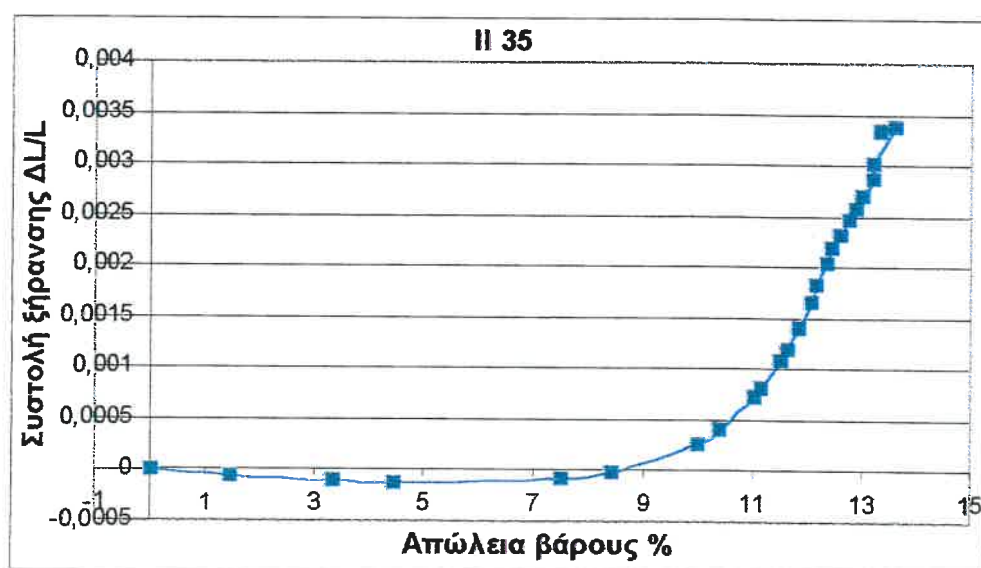
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.3.1



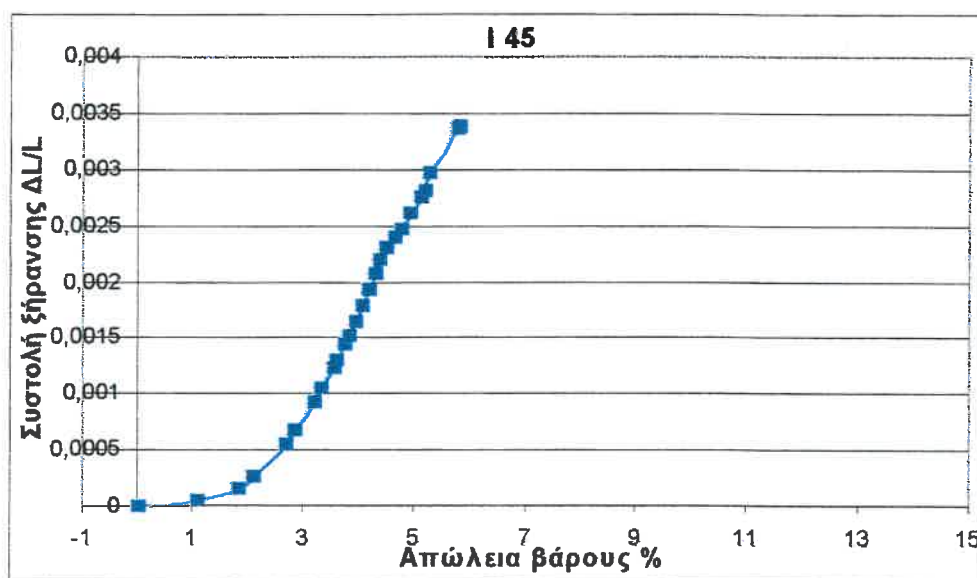
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.3.2



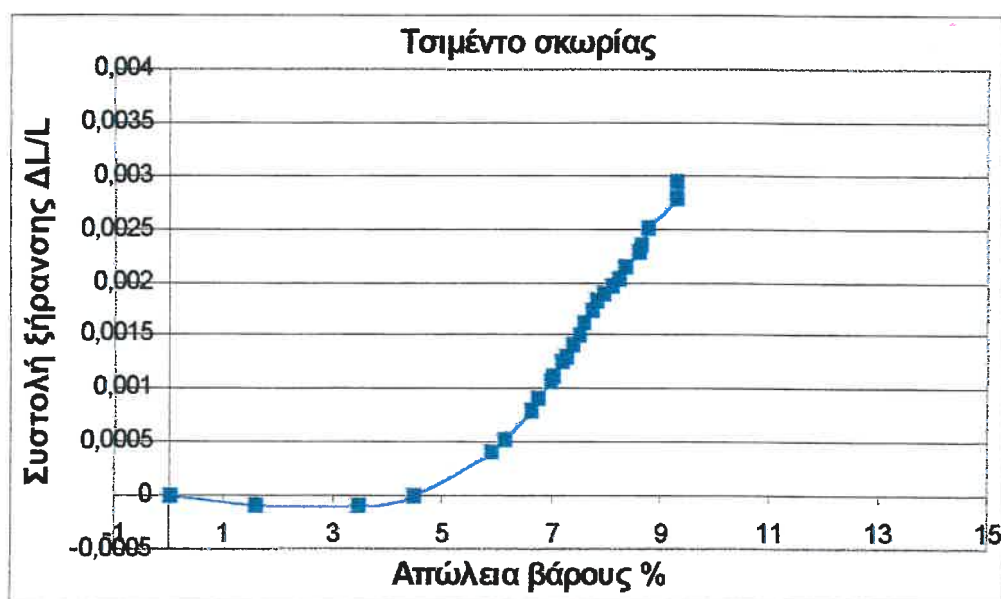
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.3.3



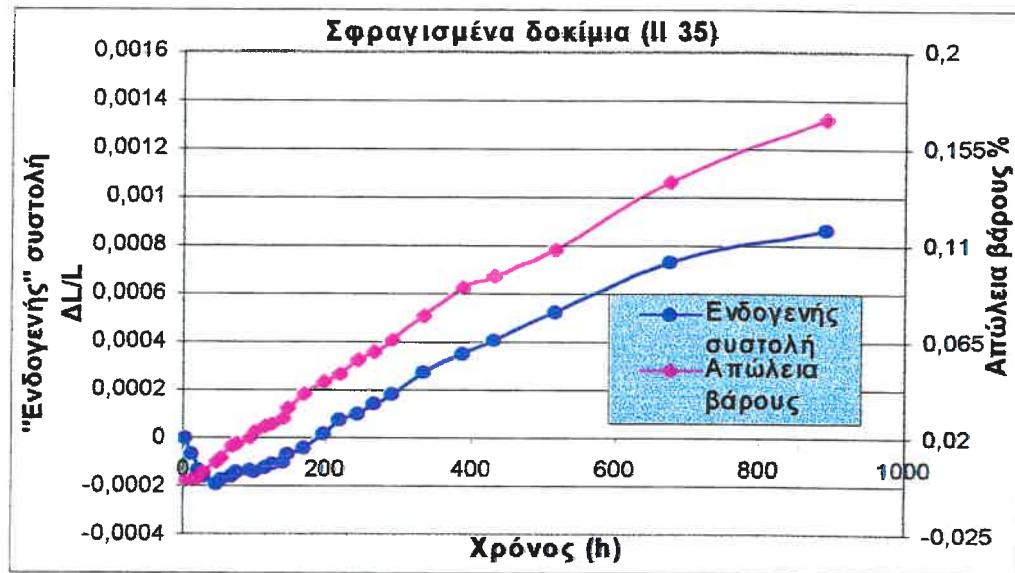
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.3.4



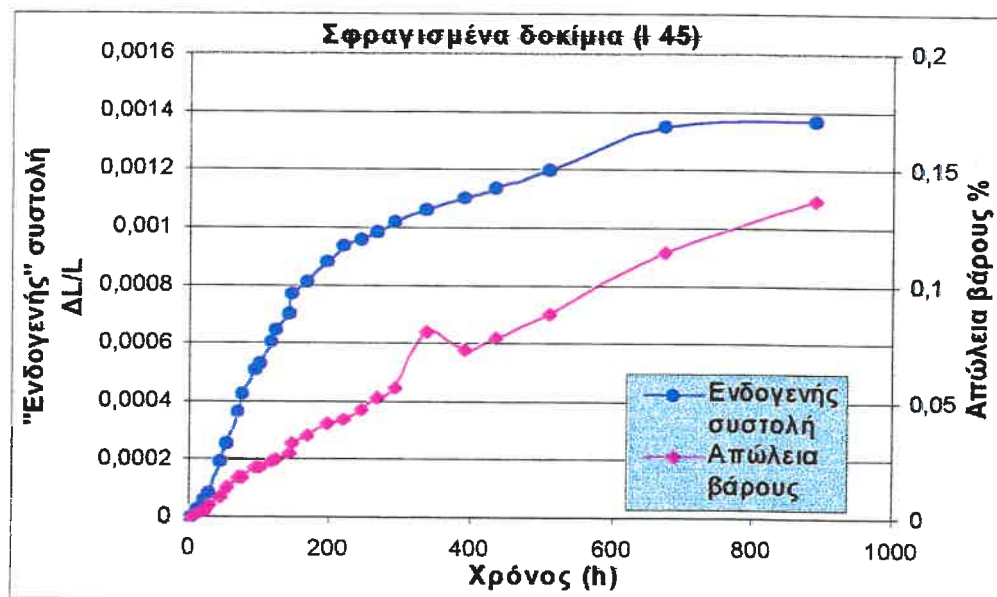
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.3.5



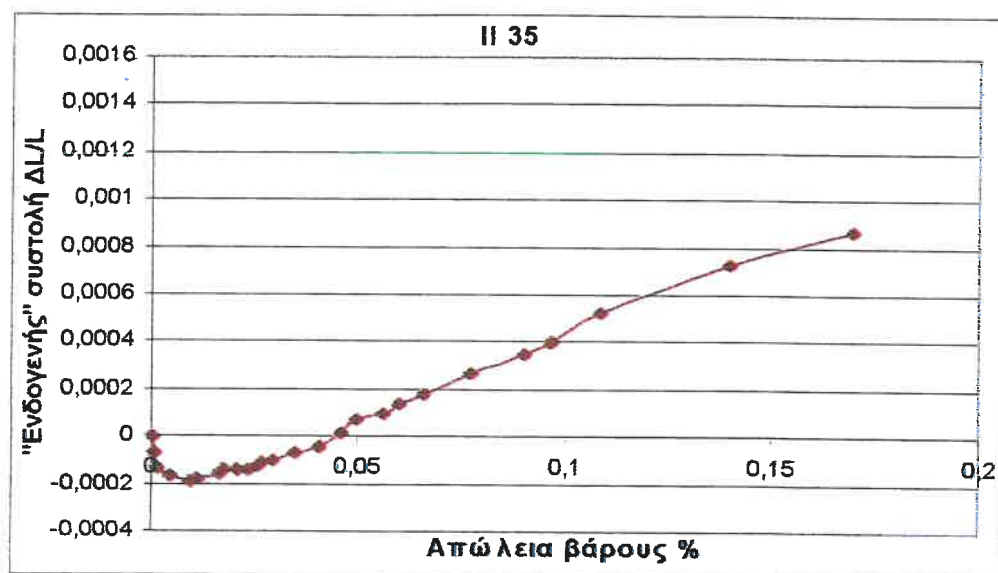
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.3.6



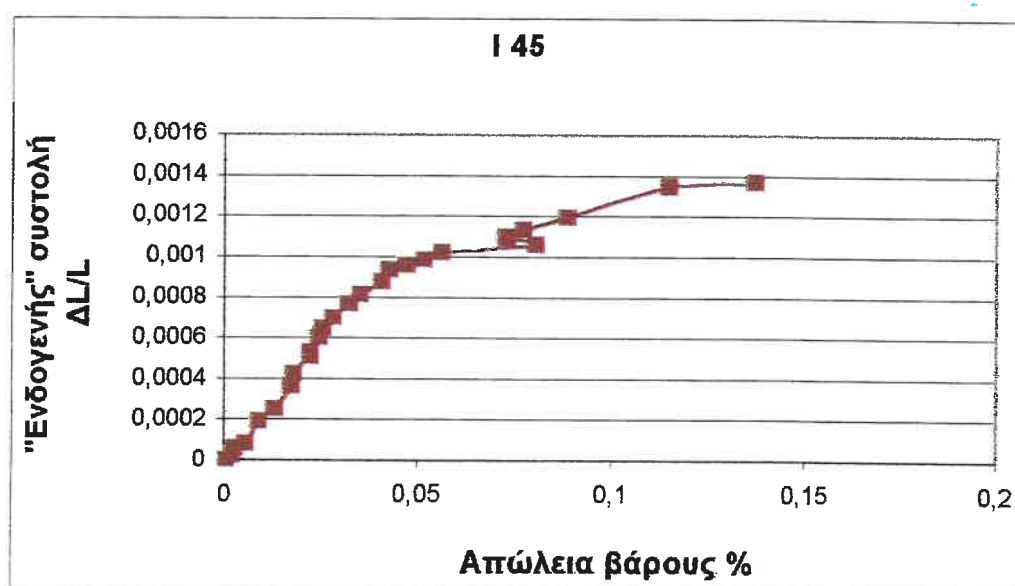
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.3.7



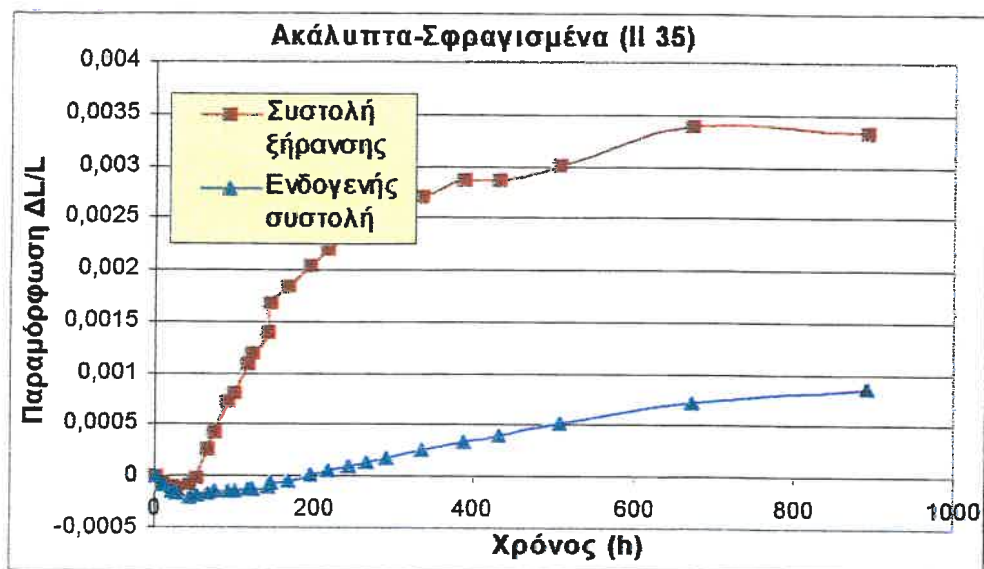
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.3.8



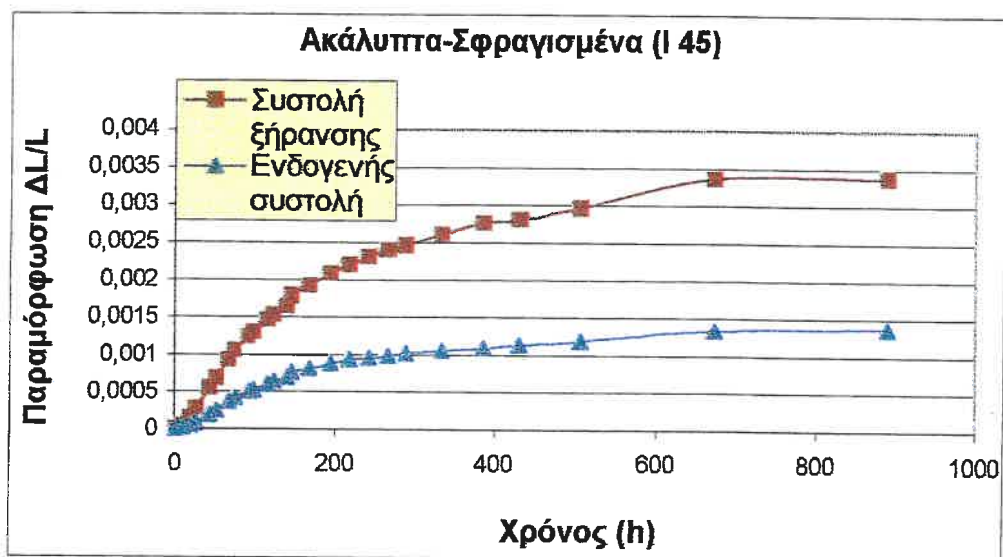
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.3.9



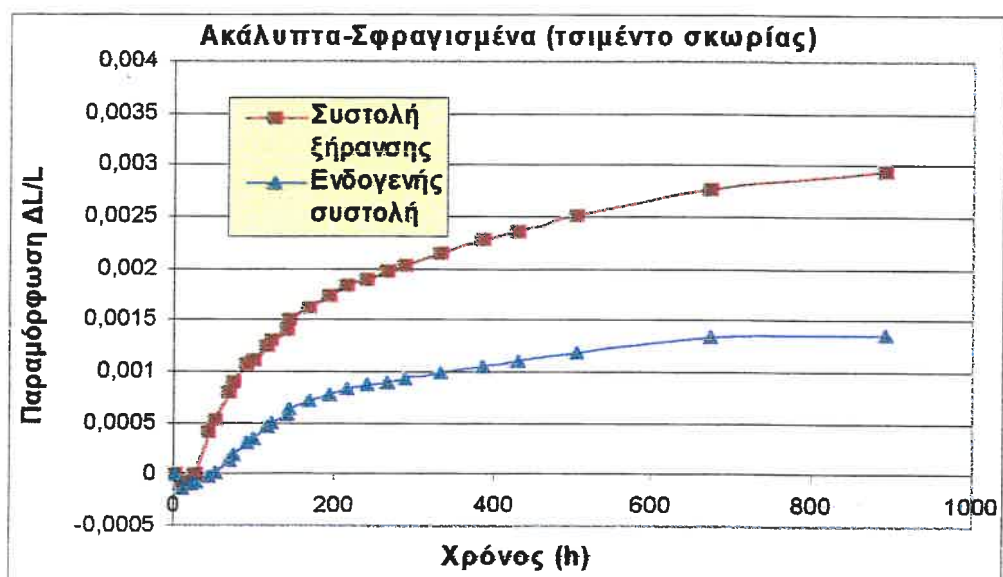
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.3.10



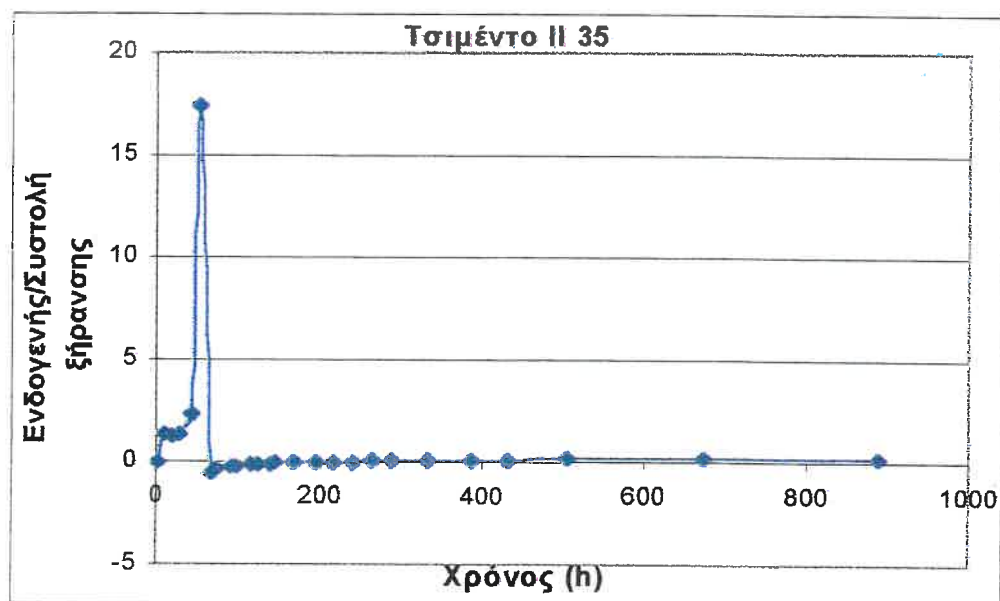
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.3.11



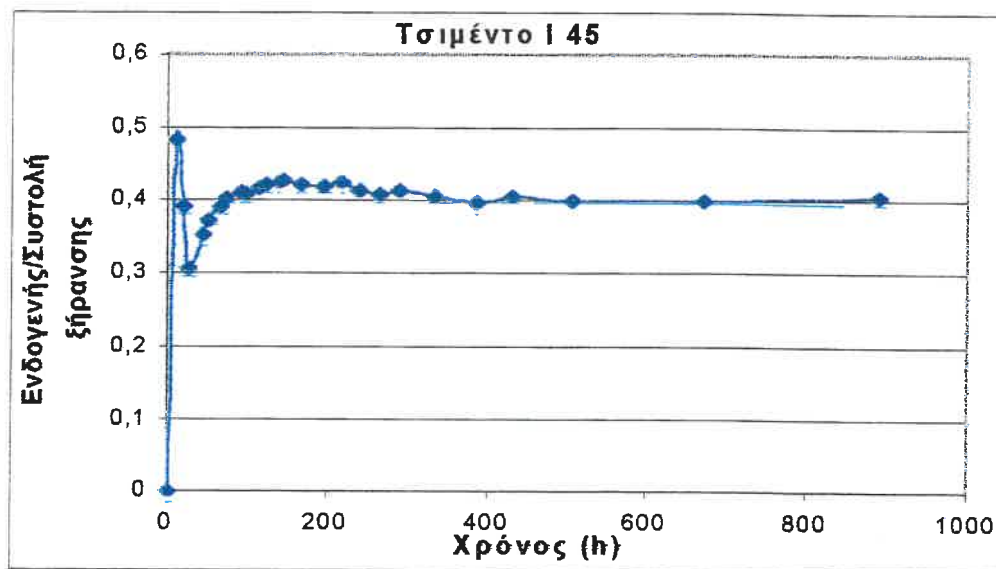
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.3.12



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.3.13



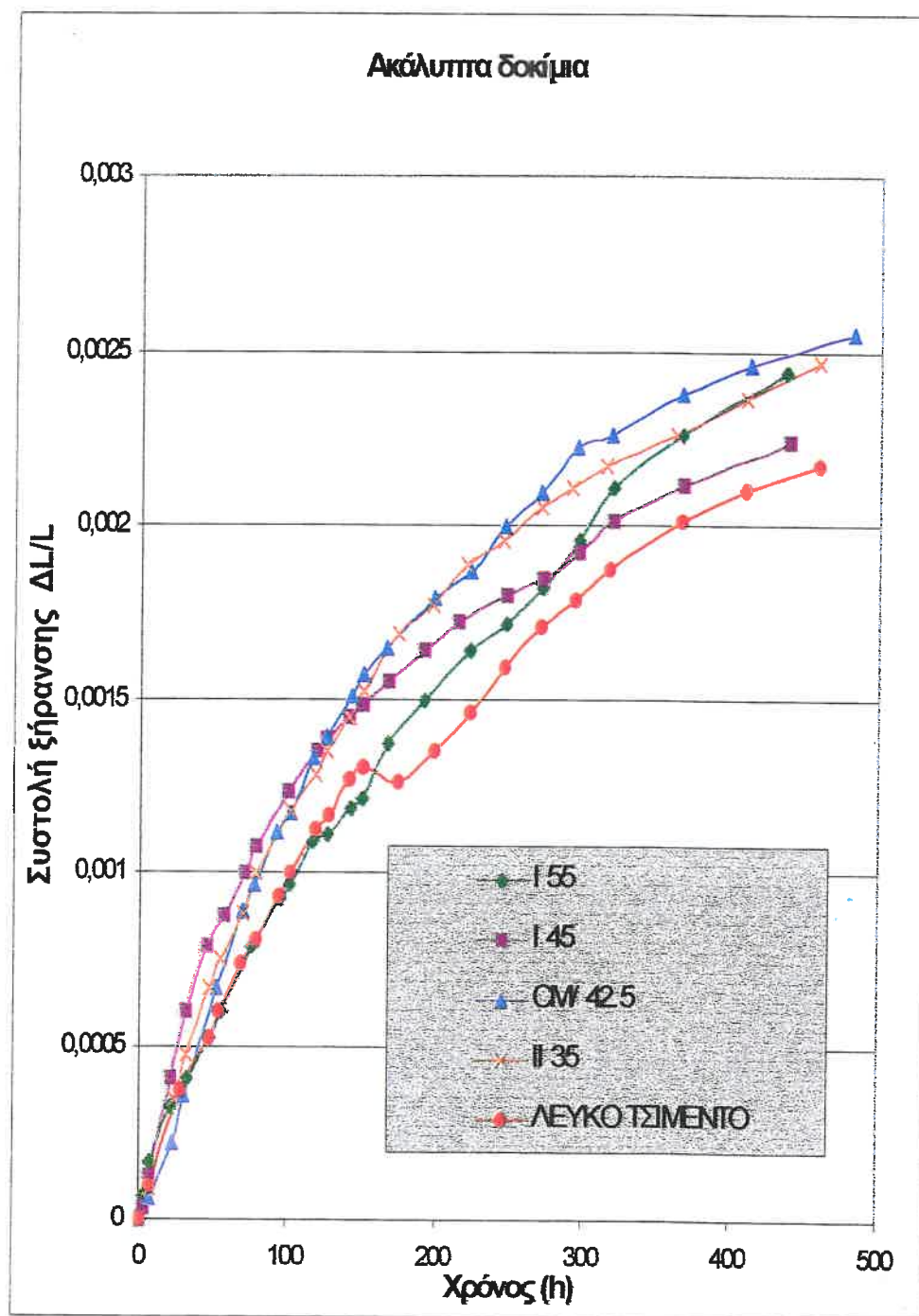
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.3.14

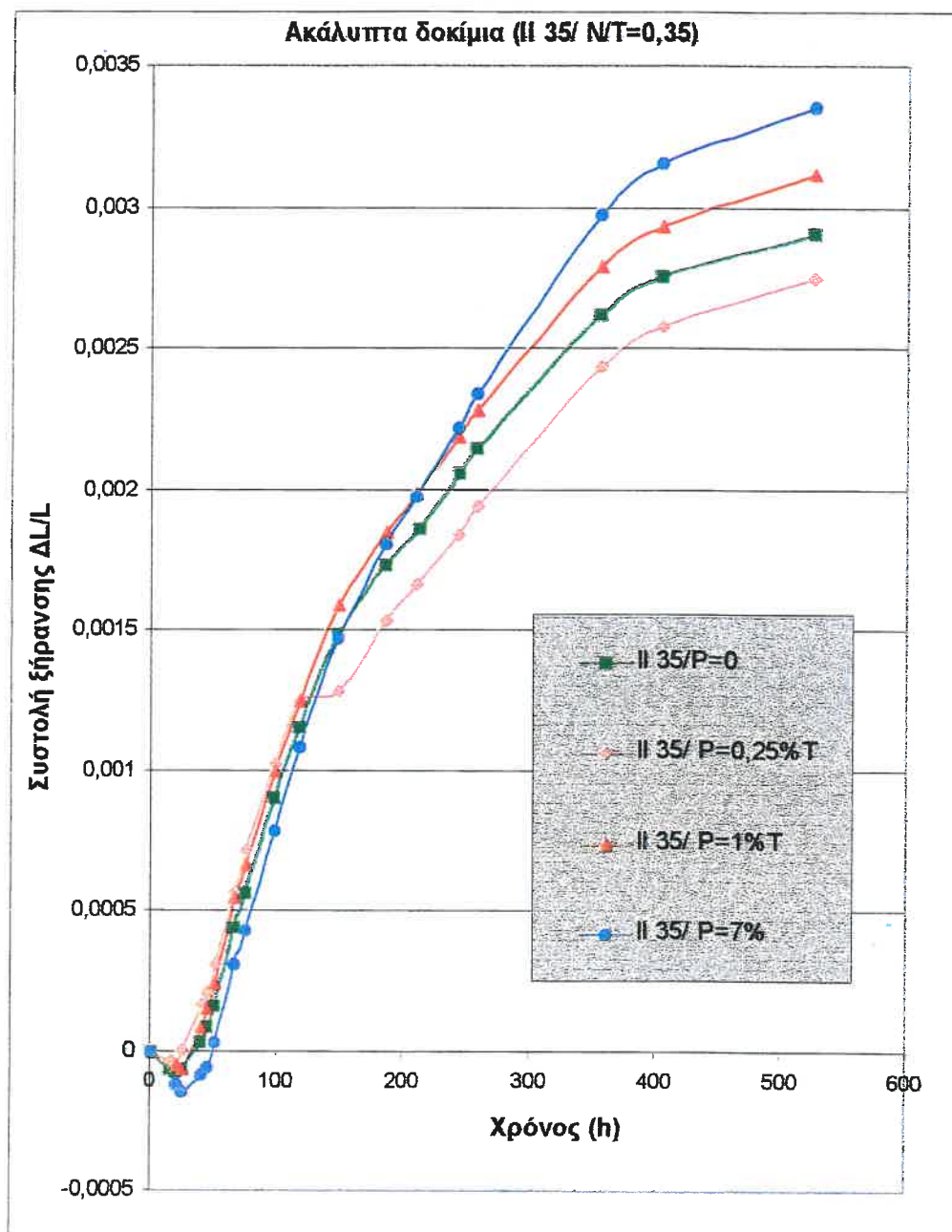


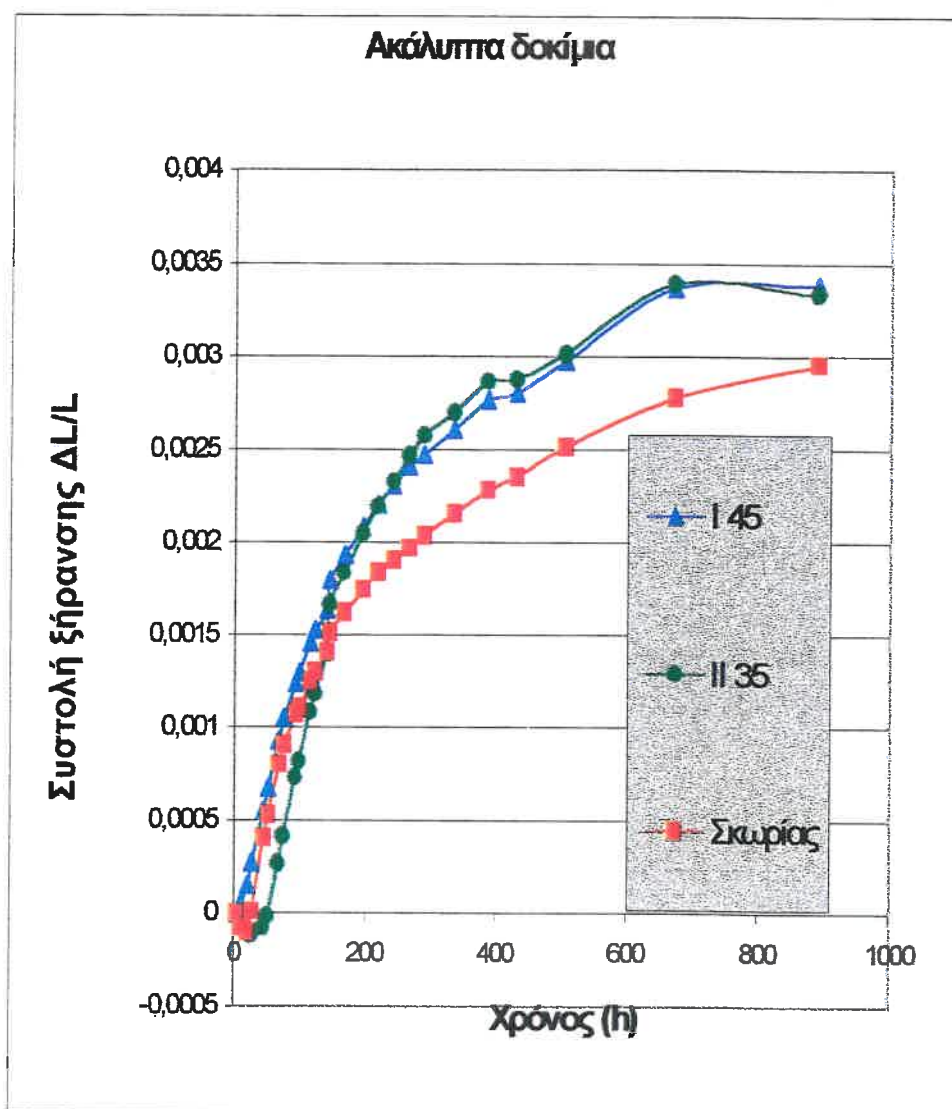
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.3.15



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.3.16

**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1**

**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2**

**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.3**

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΥΝΘΗΚΩΝ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

6.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Σκοπός της διπλωματικής εργασίας ήταν η μελέτη της συμπεριφοράς του τσιμεντοπολτού διαφόρων μιγμάτων έναντι γραμμικής συστολής δύο ειδών, της ξήρανσης των ακάλυπτων δοκιμίων και της ενδογενούς των σφραγισμένων-καλυμμένων.

Έγινε προσπάθεια οι μετρήσεις των τιμών συστολής να γίνουν όσο το δυνατό πιο αξιόπιστες ενώ δόθηκε έμφαση στην εύρεση των παραμέτρων εκείνων που επηρέασαν τις μετρήσεις αυτές, στους τρόπους βελτίωσης των μετρήσεων, στην επιρροή των διαφόρων παραγόντων στη συστολή, καθώς και στην εκτίμηση της επαναληψιμότητας των μετρήσεων.

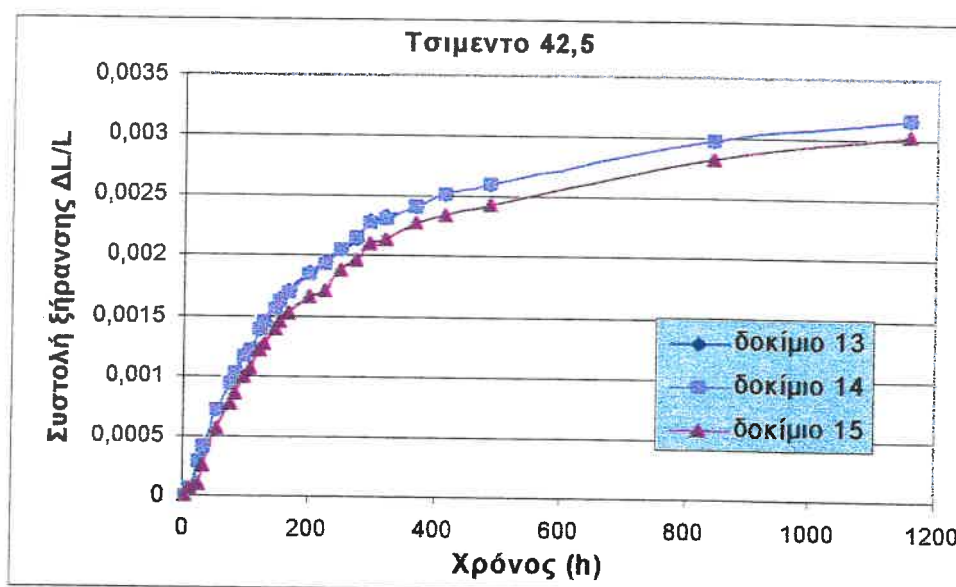
Για την διερεύνησή της, χωρίς όμως αυτή να γίνει αναλυτικά και σε μεγαλύτερο φάσμα μετρήσεων, έγινε επεξεργασία των αποτελεσμάτων για τα δοκίμια του κάθε μίγματος χωριστά, δηλ. ανάμεσα στα δοκίμια του ίδιου μίγματος.

6.2 ΣΥΣΤΟΛΗ ΞΗΡΑΝΣΗΣ

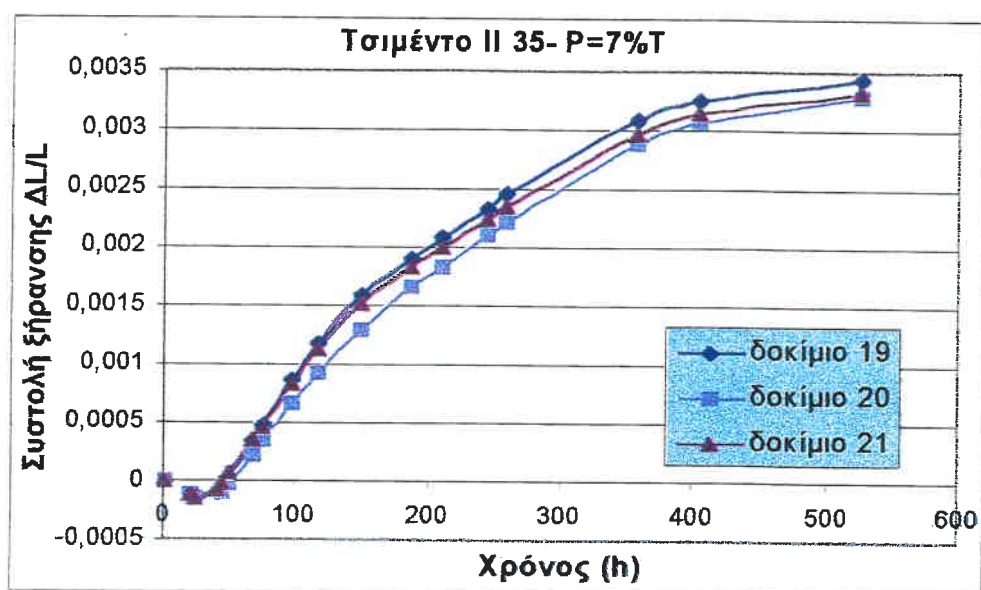
6.2.1 ΕΠΑΝΑΛΗΨΙΜΟΤΗΤΑ ΜΕΤΑΞΥ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΙΔΙΟ ΑΝΑΜΙΓΜΑ

Η επεξεργασία έγινε τόσο για τις κύριες μετρήσεις όσο και για τις δευτερεύουσες και προσδιορίστηκαν ο μέσος όρος, η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής μεταβλητότητας για κάθε τριάδα (ή δυάδα αν έσπασε κάποιο δοκίμιο) ακάλυπτων δοκιμίων με σκοπό να ευρεθεί η διασπορά των μετρήσεων συστολής ξήρανσης (παράγραφος 6.2.2). Τα παρατιθέμενα διαγράμματα έδειξαν αρκετά καλή επαναληψιμότητα, αφού οι τιμές συστολών για ίδιους χρόνους μεταξύ δοκιμίων από το ίδιο μίγμα σχεδόν ταυτίζονται. Στα διαγράμματα που ακολουθούν έχουν επιλεγεί μόνο αυτά που δίνουν τη μεγαλύτερη διασπορά τιμών (που οι καμπύλες αποκλίνουν περισσότερο μεταξύ τους), ένα διάγραμμα για κάθε κύκλο μετρήσεων. (Σχ. 6.1-6.2-6.3)

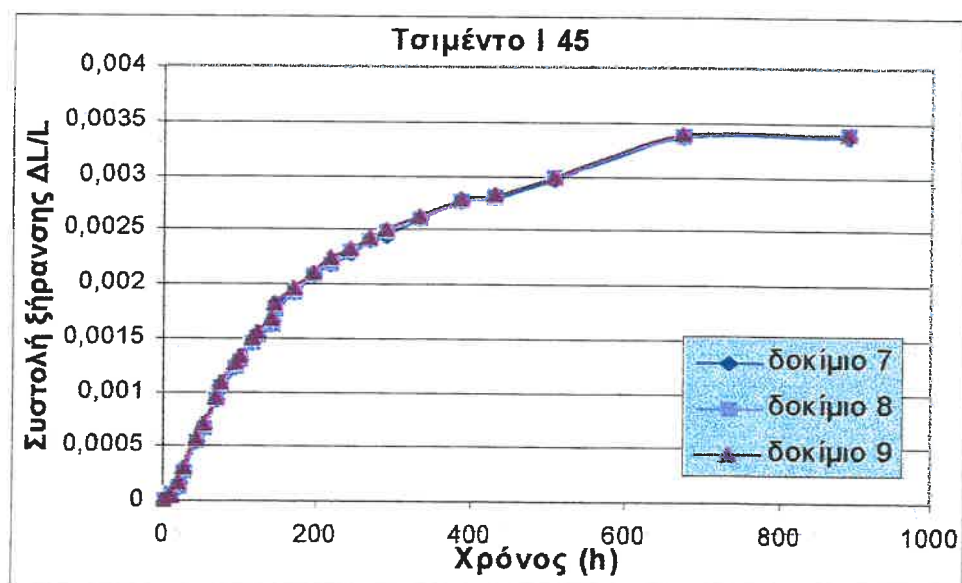
Έτσι έγινε επεξεργασία των τιμών συστολής των κύριων και δευτερεύουσων μετρήσεων για όλα τα μίγματα. Παρακάτω δίνεται το διάγραμμα για το τσιμέντο 42,5 από τις κύριες με τη μεγαλύτερη απόκλιση τιμών, καθώς και το (II 35) με $P=7\%$ T από τις δευτερεύουσες της πρώτης φάσης και το τσιμέντο I 45 για τη δεύτερη φάση των μετρήσεων.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6.1



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6.2



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6.3

6.2.2 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΑΚΑΛΥΠΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ

Παρατηρώντας τις τιμές της τυπικής απόκλισης με το χρόνο από τον πίνακα 6.2.1 για τα ακάλυπτα δοκίμια, βλέπουμε ότι για το τσιμέντο Ι 45 οι τιμές είναι πολύ μικρές (της τάξης 10^{-6}), σε σχέση μάλιστα με τις αντίστοιχες τιμές τυπικής απόκλισης για τα άλλα μίγματα, που σημαίνει ότι ελάχιστα αποκλίνουν από τη μέση τιμή (καλή επαναληψιμότητα). Το ίδιο ισχύει και για το τσιμέντο Ι 55 (πίνακας 6.2.2), μικρές τιμές Τ.Α. που σημαίνει καλή επαναληψιμότητα. Το τσιμέντο όμως 42,5 (πίνακας 6.2.3) παρουσιάζει αυξημένες τιμές τυπικής απόκλισης σε σχέση με τα δύο προηγούμενα, που σημαίνει ότι αυτές αποκλίνουν περισσότερο από τη μέση τιμή, όπως φάνηκε άλλωστε στην παράγραφο 6.2.1. Το (λευκό) (πιν. 6.2.4) έχει επίσης μεγάλες τιμές Τ.Α. αλλά είναι λιγότερο αυξημένες από τις τιμές του (42,5). Τέλος το ΙΙ 35 (πιν. 6.2.5) παρουσιάζει πολύ μικρές τιμές, ανάλογες των τσιμεντών Ι 45 και Ι 55.

Σχετικά με τον συντελεστή μεταβλητότητας, συγκρίνοντας τα διάφορα τσιμέντα βλέπουμε ότι τα (Ι 45) και (Ι 55) έχουν πολύ μειωμένες τιμές (με εξαίρεση την πρώτη τιμή από το Ι 45 που είναι περίπου 20,8!) όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο, ενώ το (42,5) δίνει μεγάλο συντελεστή μεταβλητότητας (αυξημένες τιμές) που όπως φαίνεται από τον αντίστοιχο πίνακα φτάνει και το 45,39% περίπου! Τα ίδια ισχύουν για το (λευκό) -όπως το (42,5)- που όμως ο Σ.Μ. δεν ξεπερνά το 23,3%. Για το τσιμέντο ΙΙ 35 οι τιμές είναι αρκετά μειωμένες, λίγο υψηλότερες όμως από τα δύο πρώτα.

Παρακάτω παρατίθενται οι πίνακες με τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης για τους πέντε τύπους τσιμεντών των κύριων δοκιμών.

όπου: Μ.Τ.=μέση τιμή
Τ.Α.=τυπική απόκλιση
Σ.Μ.=συντελεστής μεταβλητότητας

Ακάλυπτα						
Τσιμέντο (I 45)						
χρόνος	δοκίμιο 1	δοκίμιο 2	δοκίμιο 3	M.T.	T.A.	Σ.Μ.
0	0	0	0	0	0	0
2	4,5E-05	3,5E-05	0,00003	3,6667E-05	7,6E-06	20,8299
7	0,00013	0,00012	0,000115	0,00012167	7,6E-06	6,2775
21	0,00043	0,0004	0,000395	0,00040833	1,9E-05	4,63584
31	0,00062	0,00059	0,00059	0,00059833	1,4E-05	2,41233
45	0,00079	0,00079	0,00078	0,000785	5E-06	0,63694
56	0,00086	0,00089	0,000885	0,000875	1,7E-05	1,97949
70,5	0,00101	0,001	0,001	0,00100333	5,8E-06	0,57543
79	0,00108	0,00108	0,001075	0,00107833	2,9E-06	0,2677
100	0,00124	0,00124	0,001225	0,001235	8,7E-06	0,70124
119	0,00135	0,00136	0,00135	0,00135167	7,6E-06	0,56505
126	0,00138	0,00139	0,001385	0,00138333	7,6E-06	0,55212
141,5	0,00146	0,00146	0,001435	0,00144833	1,2E-05	0,79726
151	0,00148	0,00149	0,00149	0,001485	8,7E-06	0,58318
166,5	0,00155	0,00155	0,001545	0,00154833	2,9E-06	0,18644
191,5	0,00164	0,00165	0,001645	0,00164167	5,8E-06	0,35169
215	0,00172	0,00172	0,00173	0,00172333	5,8E-06	0,33502
247	0,0018	0,00182	0,00178	0,00179833	1,8E-05	0,97643
271	0,00185	0,00185	0,001845	0,00184833	2,9E-06	0,15618
295	0,00193	0,00193	0,001915	0,00192333	7,6E-06	0,3971
319	0,00201	0,00202	0,002015	0,00201167	5,8E-06	0,287
366	0,00212	0,00212	0,00211	0,002115	5E-06	0,23641
438,5	0,00224	0,00225	0,002235	0,00224	8,7E-06	0,38662
818,5	0,00259	0,00261	0,002585	0,00259167	1,2E-05	0,44554
1154	0,0028	0,00282	0,002805	0,00280667	7,6E-06	0,27212

Πίνακας 6.2.1

Τσιμέντο (I 55)						
χρόνος	δοκίμιο 7	δοκίμιο 8	δοκίμιο 9	M.T.	T.A.	Σ.Μ.
0	0	0	0	0	0	0
2	5,5E-05	0,00007	0,000075	6,6667E-05	1E-05	15,6125
7	0,00016	0,00017	0,00017	0,00016333	7,6E-06	4,6761
21	0,00032	0,00032	0,000325	0,00032167	2,9E-06	0,89744
32	0,00042	0,00041	0,000405	0,00041	5E-06	1,21951
46,5	0,00053	0,00053	0,00052	0,000525	5E-06	0,95238
55	0,00061	0,00061	0,00059	0,0006	8,7E-06	1,44338
76	0,00079	0,00079	0,000775	0,00078333	7,6E-06	0,97502
95	0,00092	0,00093	0,00092	0,00092333	5,8E-06	0,62529
102	0,00098	0,00097	0,000955	0,00096667	1E-05	1,07672
117,5	0,00109	0,0011	0,00108	0,00108667	7,6E-06	0,70285
127	0,0011	0,00113	0,001115	0,00111333	1,3E-05	1,13021
142,5	0,00122	0,00119	0,001145	0,001185	3,8E-05	3,18558

151	0,00129	0,00121	0,00115	0,00121667	7E-05	5,77296
167,5	0,00137	0,00139	0,001365	0,00137333	1E-05	0,75789
191	0,0015	0,00151	0,001495	0,0015	5E-06	0,33333
223	0,00163	0,00166	0,001635	0,00164	1,3E-05	0,80663
247	0,00172	0,00173	0,00172	0,00172	5E-06	0,2907
271	0,00181	0,00185	0,001805	0,00182167	2,5E-05	1,35395
295	0,00196	0,002	0,001925	0,00196	3,8E-05	1,92598
319	0,00209	0,00213	0,002115	0,00210833	2,1E-05	0,98735
365	0,00225	0,00228	0,00226	0,00226333	1,5E-05	0,6749
436	0,00243	0,00246	0,00244	0,00244167	1,8E-05	0,71916
794,5	0,00302	0,00306	0,00304	0,00303833	1,8E-05	0,57793
1130	0,00338	0,00345	0,00342	0,00341333	3,5E-05	1,03925

Πίνακας 6.2.2

		Τσιμέντο 42,5					
χρόνος	δοκ. 13	δοκ. 14	δοκ. 15	M.T.	T.A.	Σ.Μ.	
0	0	0	0	0	0	0	
7	5,5E-05	6,5E-05	0,00007	6,3333E-05	7,6E-06	12,0594	
21,5	0,00027	0,00029	0,000105	0,00022	1E-04	45,3977	
30	0,00041	0,00042	0,000255	0,00036	9,1E-05	25,3448	
51	0,00072	0,00073	0,00056	0,00066833	9,4E-05	14,0428	
70	0,00095	0,00095	0,000775	0,00089167	0,0001	11,3312	
77	0,00103	0,00103	0,000855	0,00096833	9,8E-05	10,1359	
92,5	0,00119	0,00118	0,001	0,00112	0,0001	9,28958	
102	0,00122	0,00123	0,00107	0,00117167	8,8E-05	7,51762	
117,5	0,00139	0,00139	0,001215	0,00132833	9,8E-05	7,38892	
126	0,00146	0,00145	0,001275	0,001395	0,0001	7,4583	
142,5	0,00157	0,00157	0,00139	0,00150833	0,0001	6,79625	
151	0,00164	0,00163	0,001455	0,001575	0,0001	6,60592	
166	0,00172	0,0017	0,001535	0,00165	1E-04	6,05303	
198	0,00187	0,00186	0,001665	0,001795	0,00011	6,27823	
222	0,00195	0,00194	0,00172	0,00186833	0,00013	6,88738	
246	0,00206	0,00206	0,00188	0,00199667	0,0001	5,06025	
270	0,00214	0,00217	0,001975	0,002095	0,00011	5,01193	
294	0,0023	0,00228	0,002105	0,0022667	0,00011	4,744	
317	0,00233	0,00232	0,002145	0,00226167	0,0001	4,4728	
365	0,00242	0,00243	0,002285	0,00237667	7,9E-05	3,34187	
411	0,00253	0,00252	0,002355	0,002465	9,5E-05	3,86994	
481	0,00262	0,0026	0,00244	0,00255167	9,7E-05	3,8013	
841	0,00298	0,00299	0,002835	0,00293333	8,5E-05	2,9044	
1153	0,00318	0,00318	0,00303	0,00312833	8,5E-05	2,72336	

Πίνακας 6.2.3

		Τσιμέντο (Λευκό)					
χρόνος	δοκ. 19	δοκ. 20	δοκ. 21	M.T.	T.A.	Σ.Μ.	
0	0	0	0	0	0	0	
6	0,00009	0,0001	0,00009	9,33E-05	5,77E-06	6,1859	
27	0,00037	0,00038	0,000375	0,00037167	5,77E-06	1,55341	
46	0,00052	0,00057	0,00049	0,00052333	3,82E-05	7,2971	
53	0,0006	0,00064	0,00056	0,0006	4,00E-05	6,6667	
68,5	0,00074	0,00078	0,0007	0,00073833	4,01E-05	5,4317	
78	0,00081	0,00085	0,00077	0,00081	4,00E-05	4,93827	
93,5	0,00094	0,00097	0,00089	0,00093167	4,01E-05	4,30455	
102	0,001	0,00105	0,00096	0,00100167	4,25E-05	4,24537	
118,5	0,00113	0,00117	0,00108	0,00112333	4,25E-05	3,78556	
127	0,00119	0,00118	0,001125	0,00116333	3,33E-05	2,86175	
142	0,00127	0,00131	0,001235	0,00127167	3,75E-05	2,95107	
150	0,0013	0,00134	0,001265	0,00130167	3,75E-05	2,88306	
174	0,00093	0,00147	0,001395	0,00126167	0,00029	23,2752	

198	0,00102	0,00156	0,00148	0,00135	0,00029	21,669
222	0,00112	0,00167	0,0016	0,00146167	0,0003	20,6788
246	0,00127	0,00179	0,001715	0,00159167	0,00028	17,6597
270	0,00139	0,00193	0,001825	0,00171167	0,00029	16,784
293	0,00146	0,00199	0,001905	0,001785	0,00028	15,9467
316	0,00155	0,00208	0,001995	0,001875	0,00028	15,1813
365,5	0,00169	0,00221	0,00214	0,00201167	0,00029	14,1703
409	0,00178	0,0023	0,00223	0,0021	0,00028	13,4918
457	0,00186	0,00235	0,002305	0,00217	0,00027	12,614
817	0,00289	0,00288	0,002825	0,00286167	3,21E-05	1,12331
1129	0,00319	0,00318	0,00313	0,00316333	2,93E-05	0,92615

Πίνακας 6.2.4

		Τσιμέντο ΙΙ 35					
χρόνος	δοκ. 25	δοκ. 26	δοκ. 27	M.T.	T.A	Σ.Μ.	
0	0	0	0	0	0	0	
6	0,000095	0,000065	0,000085	8,83E-05	5,77E-06	6,536041	
22,5	0,000335	0,000345	0,000345	0,000342	5,77E-06	1,689806	
31	0,000465	0,000485	0,000475	0,000475	1E-05	2,105263	
46	0,00066	0,000675	0,00068	0,000672	1,04E-05	1,549627	
54	0,00074	0,00076	0,000755	0,000752	1,04E-05	1,3847	
70	0,000865	0,0009	0,000875	0,00088	1,8E-05	2,048609	
78	0,00098	0,001015	0,001015	0,001003	2,02E-05	2,014013	
102	0,001145	0,001195	0,001205	0,001182	3,21E-05	2,720353	
118	0,001265	0,001275	0,00131	0,001283	2,36E-05	1,841227	
126	0,001335	0,001355	0,00137	0,001353	1,76E-05	1,297494	
142	0,00141	0,001455	0,001475	0,001447	3,33E-05	2,301265	
150	0,00148	0,001555	0,001545	0,001527	4,07E-05	2,667422	
174	0,00165	0,001705	0,001705	0,001687	3,18E-05	1,882664	
197	0,00174	0,001785	0,00179	0,001772	2,75E-05	1,554347	
220	0,001855	0,001905	0,0019	0,001887	2,75E-05	1,459604	
244	0,001915	0,00199	0,001975	0,00196	3,97E-05	2,02481	
269,5	0,00202	0,002075	0,002075	0,002057	3,18E-05	1,543967	
291	0,00208	0,00213	0,00213	0,002113	2,89E-05	1,365971	
313	0,00214	0,002195	0,00219	0,002175	3,04E-05	1,398336	
361	0,002225	0,00228	0,002275	0,00226	3,04E-05	1,345744	
409	0,002315	0,002385	0,002395	0,002365	4,36E-05	1,843086	
457	0,00243	0,002495	0,002485	0,00247	3,5E-05	1,417004	
793	0,00281	0,002855	0,00285	0,002838	2,47E-05	0,868975	
1154	0,00315	0,00316	0,003145	0,003152	7,64E-06	0,242336	

Πίνακας 6.2.5

6.2.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΣΑΝ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

- Λόγος N/T

Σε όλα τα πειράματα χρησιμοποιήθηκε σταθερός λόγος N/T ίσος με 0,35, δηλ. τσιμέντο όχι πλήρες ενυδατωμένο (<0,42). Βάσει των πειραμάτων αυτών επομένως που ο λόγος N/T δεν μεταβάλλονταν σε κανένα μίγμα, δεν μπορούμε να συμπεράνουμε για την επιρροή του στο μέγεθος της συστολής ξήρανσης ή και του ρυθμού αύξησής της. Από τη βιβλιογραφία [6] φαίνεται όμως ότι όσο ο λόγος N/T αυξάνει, ο ρυθμός και το μέγεθος της συστολής ξήρανσης επίσης αυξάνουν.

- Τύπος τσιμέντου

Από τις κύριες μετρήσεις των πέντε ειδών τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκαν, το λευκό τσιμέντο παρουσίασε τη μικρότερη συστολή ξήρανσης ενώ από τις δευτερεύουσες της πρώτης φάσης των δοκιμών με διάφορα ποσοστά πολυμερούς (P) για τον τύπο II 35, εντύπωση έκανε ότι το τσιμέντο με $P=7\%T$ (μεγάλο ποσοστό πολυμερούς) έδειξε τη μεγαλύτερη συστολή έναντι ξήρανσης. Από τη δεύτερη φάση τη μικρότερη συστολή παρουσίασε το τσιμέντο σκωρίας ενώ τα τσιμέντα I 45 και II 35 παρουσίασαν περίπου την ίδια τελική συστολή.

- Πολυμερές (P)

Έγινε χρήση πολυμερούς, χωρίς όμως όπως φάνηκε να επηρέασε τη συστολή ξήρανσης και αυτό φαίνεται χαρακτηριστικά στο τσιμέντο με ποσοστό (P) 7% όπως ειπώθηκε άλλωστε.

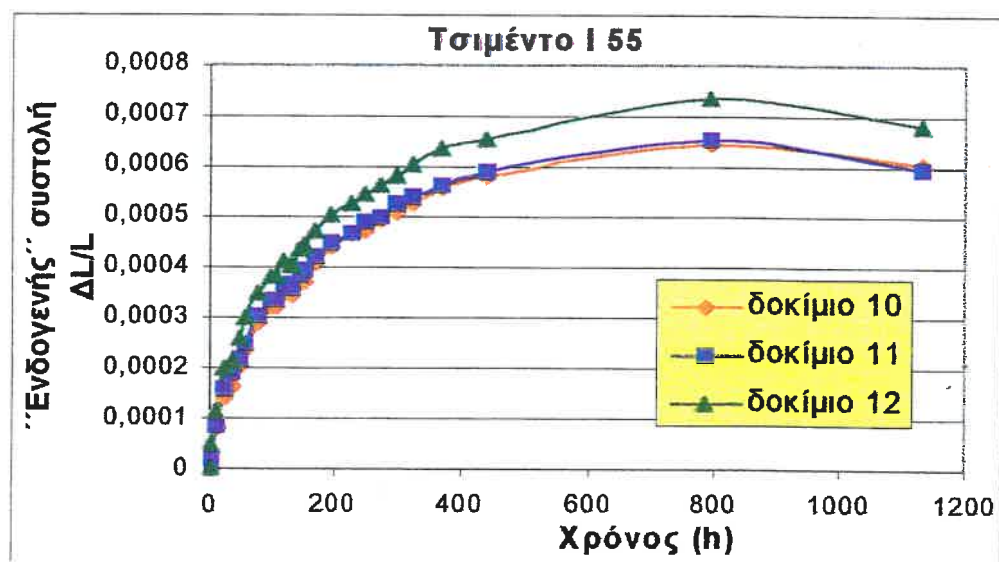
6.3 ΓΡΑΜΜΙΚΗ ΑΥΤΟΓΕΝΗΣ ΣΥΣΤΟΛΗ

6.3.1 ΕΠΑΝΑΛΗΨΙΜΟΤΗΤΑ ΣΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΑΠΟ ΤΟ ΙΔΙΟ ΑΝΑΜΙΓΜΑ

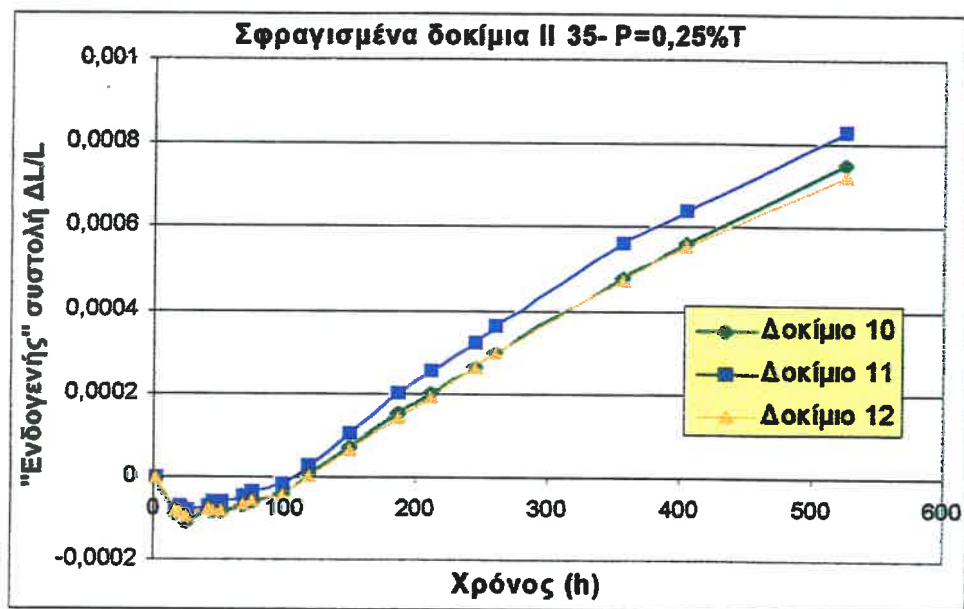
Ξανά έγινε επεξεργασία για όλες τις σειρές πειραμάτων προσδιορίζοντας τον μέσο όρο, την τυπική απόκλιση και τον συντελεστή μεταβλητότητας για κάθε τριάδα σφραγισμένων (καλυμένων) δοκιμίων (παράγραφος 6.3.2). Τα διαγράμματα που προέκυψαν από τις τιμές της “ένδογενούς” συστολής με τον χρόνο για το κάθε τσιμέντο παρουσίασαν και σ’αυτή την περίπτωση

αρκετά ικανοποιητική επαναληψιμότητα. Πάλι παρατίθενται τα διαγράμματα που οι καμπύλες τους έχουν τη μεγαλύτερη απόκλιση τιμών “ενδογενούς” συστολής, ένα διάγραμμα για κάθε κύκλο δοκιμών. (βλ. Σχ.6.4-6.5-6.6)

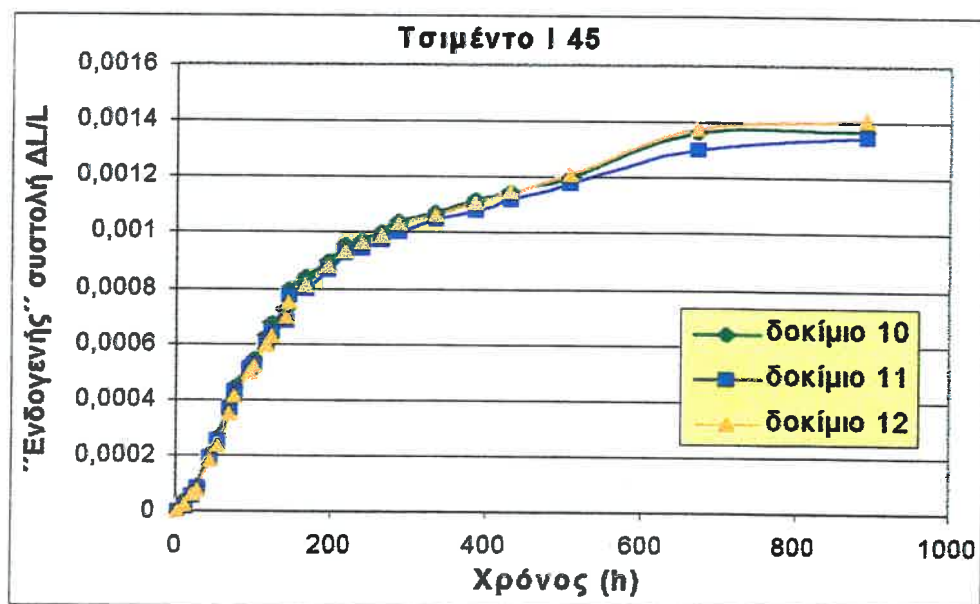
Εδώ από τις κύριες μετρήσεις ελήφθη το τσιμέντο Ι 55 και από τις δευτερεύουσες της πρώτης φάσης το ΙΙ 35 με $P=0.25\%T$ ενώ από τη δεύτερη φάση το Ι 45.



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6.4



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6.5



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6.6

6.3.2 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΤΩΝ ΚΥΡΙΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΑ ΣΦΡΑΓΙΣΜΕΝΑ ΔΟΚΙΜΙΑ

Παρατηρώντας τους πίνακες για τα καλυμένα δοκίμια (6.3.1-6.3.5) βλέπουμε χαρακτηριστικά ότι το τσιμέντο Ι 55 (πίνακας 6.3.2) παρουσιάζει την πιο μεγάλη τυπική απόκλιση απ'όλα τα υπόλοιπα (της τάξης 10^{-5}) που σημαίνει μεγαλύτερη απόκλιση καμπυλών των τριών σφραγισμένων δοκιμίων για την ενδογενή συστολή. Το (Ι 45) (πίνακας 6.3.1) δίνει πιο μειωμένες τις τιμές της τυπικής απόκλισης, ενώ το (42,5) (πίνακας 6.3.3) ακόμη μικρότερες και από το (Ι 45). Το λευκό τσιμέντο (πιν. 6.3.4) παρουσιάζει σχετικά μεγάλες τιμές Τ.Α. αλλά είναι μικρότερες από αυτές του (Ι 55), για το οποίο φαίνονται οι καμπύλες απόκλισης της ενδογενούς συστολής των τριών δοκιμίων στο Σχ.6.4 . Επίσης το τσιμέντο ΙΙ 35 (πιν 6.3.5) έχει τις πιο μειωμένες τιμές (καλή επαναληψιμότητα).

Ανάλογα ο συντελεστής μεταβλητότητας (για τους ίδιους πίνακες) παρουσιάζεται αυξημένος για το (Ι 55) ενώ οι τιμές του και για το (λευκό) είναι αρκετά υψηλές και ελαφρώς μικρότερες. Τις μικρότερες τιμές του Σ.Μ. δίνει το (ΙΙ 35) , ενώ για το τσιμέντο 42,5 , εντύπωση κάνει το γεγονός ότι η πρώτη τιμή του Σ.Μ. είναι πολύ μεγάλη, συγκεκριμένα 105,83 ενώ οι επόμενες μειώνονται πάρα πολύ! Για το (Ι 45) προέκυψαν ελαφρώς μεγαλύτερες τιμές από τα τσιμέντα 42,5 και ΙΙ 35.

Σφραγισμένα					
Τσιμέντο Ι 45					
χρόνος	δοκίμιο 4	δοκίμιο 5	M.T	T.A.	Σ.Μ.
0	0	0	0	0	0
2	0,00003	3,5E-05	3,3E-05	3,54E-06	10,8785659
7	0,00006	0,00007	6,5E-05	7,07E-06	10,8785659
21	0,00018	0,0002	0,00019	1,77E-05	9,42809042
31	0,00026	0,00028	0,00027	1,41E-05	5,23782801
45	0,00034	0,00036	0,00035	1,41E-05	4,04061018
56	0,00043	0,0004	0,00041	1,77E-05	4,28549564
70,5	0,00043	0,00045	0,00044	1,41E-05	3,25106566
79	0,00046	0,00048	0,00047	1,41E-05	3,04131949
100	0,00051	0,00053	0,00052	1,06E-05	2,04958487
119	0,00054	0,00056	0,00055	1,77E-05	3,22879809
126	0,00054	0,00056	0,00055	1,41E-05	2,57129739
141,5	0,00057	0,00056	0,00057	7,07E-06	1,25151643
151	0,00057	0,00059	0,00058	1,77E-05	3,06106832
166,5	0,00058	0,00061	0,00059	2,47E-05	4,17700208
191,5	0,00062	0,00064	0,00063	1,41E-05	2,24478343
215	0,00065	0,00066	0,00065	1,06E-05	1,62553283
247	0,00068	0,00069	0,00068	7,07E-06	1,03986291
271	0,00068	0,0007	0,00069	1,06E-05	1,54277843
295	0,0007	0,00072	0,00071	1,41E-05	2,00597668
319	0,00072	0,00073	0,00072	3,54E-06	0,48934725
366	0,00073	0,00075	0,00074	1,06E-05	1,43818328
438,5	0,00077	0,00078	0,00077	3,54E-06	0,45767429
818,5	0,00083	0,00082	0,00083	7,07E-06	0,85709913
1154	0,00078	0,00076	0,00077	1,77E-05	2,30327942

Πίνακας 6.3.1

Τσιμέντο Ι 55						
χρόνος	δοκ. 10	δοκ. 11	δοκ. 12	M.T.	T.A.	Σ.Μ.
0	0	0	0	0	0	0
2	0,00003	2,5E-05	0,00005	0,000035	1,3229E-05	37,7964
7	0,00008	8,5E-05	0,00012	9,33E-05	1,893E-05	20,2818
21	0,00014	0,00016	0,0002	0,000167	3,0551E-05	18,3303
32	0,00017	0,00019	0,00022	0,00019	2,5E-05	13,1579
46,5	0,00021	0,00022	0,00026	0,000228	2,8431E-05	12,4516
55	0,00024	0,00025	0,0003	0,000262	3,4034E-05	13,0067
76	0,00029	0,00031	0,00035	0,000315	3,1225E-05	9,9127
95	0,00033	0,00034	0,00038	0,000347	2,9297E-05	8,45115
102	0,00033	0,00034	0,00038	0,000347	2,9297E-05	8,45115
117,5	0,00035	0,00037	0,00042	0,000378	3,3292E-05	8,79955
127	0,00035	0,00036	0,00041	0,00037	3,1225E-05	8,43919
142,5	0,00037	0,00039	0,00044	0,000397	3,4034E-05	8,58007

151	0,00038	0,0004	0,00045	0,000405	3,6056E-05	8,9026
167,5	0,00041	0,00043	0,00048	0,000437	3,4034E-05	7,79411
191	0,00044	0,00045	0,00051	0,000465	3,5E-05	7,52688
223	0,00047	0,00047	0,00053	0,000488	3,1754E-05	6,50258
247	0,00048	0,00049	0,00055	0,000503	3,6856E-05	7,3223
271	0,0005	0,0005	0,00057	0,00052	3,9051E-05	7,50986
295	0,00051	0,00053	0,00058	0,000538	3,6856E-05	6,84624
319	0,00053	0,00054	0,00061	0,000557	4,2525E-05	7,63913
365	0,00056	0,00057	0,00064	0,000587	4,1932E-05	7,14758
436	0,00058	0,00059	0,00066	0,000608	4,0723E-05	6,69413
794,5	0,00065	0,00066	0,00074	0,000678	4,9329E-05	7,27206
1130	0,00061	0,0006	0,00068	0,000627	4,6458E-05	7,41349

Πίνακας 6.3.2

		Τσιμέντο 42,5				
χρόνος	δοκ.16	δοκ.17	δοκ.18	M.T.	T.A.	Σ.Μ.
0	0	0	0	0	0	0
7	-5E-06	3,5E-05	4,5E-05	2,5E-05	2,6458E-05	105,83
21,5	0,00012	0,0001	0,00011	0,00011	7,6376E-06	7,16027
30	0,00016	0,00014	0,00015	0,00015	7,6376E-06	5,14896
51	0,00022	0,00022	0,00023	0,00022	5E-06	2,27273
70	0,0003	0,00028	0,00029	0,00029	1E-05	3,50877
77	0,0003	0,00029	0,0003	0,00029	2,8868E-06	0,98412
92,5	0,00035	0,00032	0,00034	0,00034	1,3229E-05	3,94888
102	0,00035	0,00035	0,00035	0,00035	2,8868E-06	0,82873
117,5	0,00038	0,00038	0,00038	0,00038	2,8868E-06	0,76302
126	0,00041	0,00039	0,0004	0,0004	1E-05	2,5
142,5	0,00045	0,00044	0,00044	0,00044	5E-06	1,13636
151	0,00048	0,00046	0,00047	0,00047	1E-05	2,15054
166	0,0005	0,00048	0,00049	0,00049	1E-05	2,06186
198	0,00055	0,00052	0,00054	0,00053	1,5275E-05	2,87309
222	0,00057	0,00056	0,00057	0,00056	7,6376E-06	1,35579
246	0,00061	0,00059	0,00061	0,0006	8,6603E-06	1,44338
270	0,00064	0,00061	0,00064	0,00063	1,4434E-05	2,30326
294	0,00067	0,00066	0,00067	0,00067	8,6603E-06	1,30229
317	0,00069	0,00068	0,00069	0,00068	5,7735E-06	0,84697
365	0,00073	0,00071	0,00072	0,00072	1,0408E-05	1,44896
411	0,00078	0,00076	0,00077	0,00077	1,2583E-05	1,64127
481	0,00082	0,0008	0,00081	0,00081	7,6376E-06	0,94681
841	0,00096	0,00093	0,00095	0,00094	1,5275E-05	1,62215
1153	0,00101	0,00096	0,00098	0,00098	2,2913E-05	2,33805

Πίνακας 6.3.3

		Τσιμέντο λευκό				
χρόνος	δοκ. 22	δοκ.23	δοκ.24	M.T.	T.A.	Σ.Μ.

0	0	0	0	0	0	0
6	0,00003	0,00006	0,00004	4,3E-05	1,5275E-05	35,2506
27	9,5E-05	0,00013	9,5E-05	0,00011	1,7321E-05	16,4957
46	0,00013	0,00019	0,00014	0,00015	3,3292E-05	21,9505
53	0,00014	0,00021	0,00015	0,00016	4,0723E-05	24,9322
68,5	0,00017	0,00023	0,00017	0,00019	3,3292E-05	17,8348
78	0,00016	0,00022	0,00017	0,00018	3,2146E-05	18,0255
93,5	0,00018	0,00021	0,00019	0,00019	1,2583E-05	6,56507
102	0,00019	0,00096	0,00021	0,00312	0,00505615	162,229
118,5	0,00022	0,00025	0,00024	0,00023	1,5275E-05	6,59363
127	0,00022	0,00026	0,00025	0,00024	2,0207E-05	8,36162
142	0,00026	0,00029	0,00026	0,00027	1,7321E-05	6,53604
150	0,00026	0,00028	0,00026	0,00026	1,0408E-05	3,95253
174	0,00028	0,00032	0,00029	0,00029	2,0207E-05	6,88884
198	0,0003	0,00036	0,00031	0,00032	3,0414E-05	9,50432
222	0,00032	0,00035	0,00034	0,00033	1,2583E-05	3,77492
246	0,00035	0,0004	0,00035	0,00036	2,8868E-05	7,9818
270	0,00037	0,00042	0,00037	0,00039	3,0414E-05	7,89969
293	0,00038	0,00041	0,00039	0,00039	1,5275E-05	3,93354
316	0,0004	0,00044	0,00041	0,00042	2,0817E-05	4,996
365,5	0,00044	0,00047	0,00044	0,00045	1,6073E-05	3,59838
409	0,00046	0,00048	0,00046	0,00047	1,3229E-05	2,84489
457	0,00047	0,00049	0,00047	0,00048	1,3229E-05	2,785
817	0,00058	0,00059	0,00059	0,00059	8,6603E-06	1,48039
1129	0,00064	0,00065	0,00065	0,00064	5,7735E-06	0,89977

Πίνακας 6.3.4

Χρόνος	Τσιμέντο ΙΙ 35			Μ.Τ.	Τ.Α.	Σ.Μ.
	δοκ. 28	δοκ. 29	δοκ. 30			
0	0	0	0	0	0	0
6	0,000035	0,000035	0,00005	0,00004	8,66E-06	21,65064
22,5	0,000125	0,000135	0,00014	0,000133333	7,64E-06	5,72822
31	0,000175	0,000185	0,00019	0,000183333	7,64E-06	4,165978
46	0,00023	0,00024	0,00025	0,00024	1E-05	4,166667
54	0,000255	0,00025	0,000265	0,000256667	7,64E-06	2,975699
70	0,000295	0,000295	0,0003	0,000296667	2,89E-06	0,973062
78	0,000325	0,000325	0,000335	0,000328333	5,77E-06	1,758427
102	0,00037	0,00037	0,000385	0,000375	8,66E-06	2,309401
118	0,00039	0,00039	0,000405	0,000395	8,66E-06	2,192469
126	0,00041	0,00042	0,000425	0,000418333	7,64E-06	1,825727
142	0,00042	0,000425	0,000435	0,000426667	7,64E-06	1,790069
150	0,000455	0,000445	0,000465	0,000455	1E-05	2,197802
174	0,00049	0,00049	0,000505	0,000495	8,66E-06	1,749546
197	0,00051	0,000515	0,000535	0,00052	1,32E-05	2,543992
220	0,000555	0,000555	0,00057	0,00056	8,66E-06	1,546474
244	0,000565	0,000565	0,000585	0,000571667	1,15E-05	2,019884

269,5	0,0006	0,0006	0,000615	0,000605	8,66E-06	1,431447
291	0,00061	0,000615	0,00063	0,000618333	1,04E-05	1,683288
313	0,00063	0,00064	0,00065	0,00064	1E-05	1,5625
361	0,000655	0,00066	0,00065	0,000655	5E-06	0,763359
409	0,000675	0,000675	0,00068	0,000676667	2,89E-06	0,426613
457	0,00071	0,000705	0,00072	0,000711667	7,64E-06	1,073203
793	0,00079	0,000785	0,000805	0,000793333	1,04E-05	1,311974
1154	0,00091	0,000905	0,000905	0,000906667	2,89E-06	0,318392

Πίνακας 6.3.5

6.3.3 ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΣΑΝ ΤΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΩΝ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ

- Λόγος N/T

Όπως στην προηγούμενη περίπτωση της ξήρανσης έτσι και εδώ δεν μπορούμε να αποφανθούμε για την επίδρασή του στην “ενδογενή” συστολή παρά μόνο μέσα από τη βιβλιογραφία μπορούμε να πούμε ότι αύξηση του λόγου N/T προκαλεί μείωση στην αυτογενή γραμμική συστολή.

- Τύπος τσιμέντου

Από τις κύριες εργαστηριακές δοκιμές ξανά το λευκό τσιμέντο έχει τη μικρότερη “ενδογενή” αυτή τη φορά, συστολή ενώ από τις άλλες εργαστηριακές δοκιμές, γι’ αυτές της πρώτης φάσης το τσιμέντο II 35 με $P=7\%T$ παρουσίασε την πιο μικρή “ενδογενή” συστολή και γι’αυτές τις δεύτερης φάσης το II 35 είχε αρκετά μειωμένες τιμές συστολής σε σύγκριση με τα άλλα δύο είδη, I 45 και σκωρίας.

- Πολυμερές (P)

Τα ποσοστά πολυμερούς 0, 0,25%, και 1% έδωσαν τιμές συστολής που δεν διέφεραν από αυτές των μιγμάτων δίχως τη χρησιμοποίησή τους, ενώ για το μίγμα με $P=7\%T$ η προκύπτουσα καμπύλη έδειξε όχι μόνο μειωμένη συστολή αλλά και παρατεταμένη διαστολή.

6.4 ΣΧΟΛΙΑ ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΙΣ ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΚΑΙ ΤΗΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Σχετικά με τα αποτελέσματα των πειραμάτων, φάνηκε αυτά να επηρεάστηκαν από κάποιους παράγοντες που αναφέρονται είτε στις συνθήκες διεξαγωγής τους, είτε στον τρόπο, στη μέθοδο που εφαρμόζεται.

Θερμοκρασία

Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος, άρα και των υλικών παρασκευής πριν την ανάμιξη, επηρεάζει την ταχύτητα ενυδάτωσης με συνέπεια η αύξηση της θερμοκρασίας να συμβάλλει στην αύξηση του ρυθμού συστολής. Γι' αυτό το λόγο τα πειράματα εκτελέστηκαν σε περιβάλλον ελεγχόμενης θερμοκρασίας και τα δοκίμια πριν ή μετά τη λήψη των μετρήσεων αποθηκεύονταν σε ειδικό δωμάτιο αυστηρών ελεγχόμενων συνθηκών.

Αέρας

Ο τρόπος ανάμιξης του μίγματος τσιμεντοπολτού καθορίζει την ποσότητα του αέρα που εισάγεται σ' αυτό με αποτέλεσμα να επηρεάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Η ανάμιξη στον αναμικτήρα πρέπει να γίνεται έτσι ώστε να προκύπτει όσο το δυνατό πιο ομοιογενές μίγμα.

Επίσης ένας άλλος παράγοντας που επηρεάζει την ποσότητα αέρα που εισάγεται στο μίγμα είναι το είδος και το ποσοστό του υπερρευστοποιητικού. Η μείωση του αέρα στον τσιμεντοπολτό γίνεται με κατάλληλη δόνηση.

Τρόπος ανάμιξης τσιμεντοπολτού

Ο τρόπος με τον οποίο γίνεται η ανάμιξη θα πρέπει να είναι τέτοιος ώστε να τηρούνται κάποιοι 'κανόνες' γιατί μπορεί αλλιώς να επηρεάζεται το αποτέλεσμα του πειράματος π.χ. η ταχύτητα του αναμικτήρα έχει παρατηρηθεί ότι επηρεάζει τη θερμοκρασία του αναμίγματος (υψηλή ταχύτητα προκαλεί αύξηση της θερμοκρασίας του). [6]

Μορφή- μέγεθος δοκιμίων

Σχετικά με τη συστολή ξήρανσης, το μέγεθος και η μορφή των δοκιμίων επηρεάζουν τον ρυθμό ανάπτυξης και την τελική τιμή της συστολής.

Αυξανόμενου του όγκου του στοιχείου μειώνεται τόσο ο ρυθμός όσο και το μέγεθος της αρχικής συστολής και η χρονική διάρκεια του φαινομένου αυξάνεται, αφού περισσότερος χρόνος απαιτείται για να φθάσει η επίδραση της συστολής στο εσωτερικό του στοιχείου. Επίσης πολύ σημαντικό ρόλο παίζει ο λόγος όγκος/επιφάνεια των στοιχείων από σκυρόδεμα. Μια διατομή μορφής 'Τ' ξηραίνεται γρηγορότερα από μια συμπαγή ορθογωνική διατομή ίδιου ύψους και πλάτους, αλλά η τελική συστολή που θα αποκτήσει θα είναι ελαφρώς μικρότερη. Ακόμη όσο μικρότερη είναι η διατομή ενός στοιχείου τόσο γρηγορότερος είναι ο αρχικός ρυθμός συστολής, αλλά και τόσο μικρότερη είναι η τελική συστολή.

Στην περίπτωση της ενδογενούς συστολής, έχει παρατηρηθεί επίσης ότι η μορφή και οι διαστάσεις των δοκιμίων παίζουν σημαντικό ρόλο (μεγάλη επίδραση) στις μετρήσεις της ενδογενούς συστολής αφού δοκίμια από το ίδιο μίγμα με άλλες διαστάσεις ή σχήματα έδωσαν διαφορετικές τιμές συστολής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

7.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από τα σχόλια και τις αναλύσεις των διαγραμμάτων που προέκυψαν από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων καθώς και από την στατιστική ανάλυση των κύριων μετρήσεων, αλλά και από τις αποκλίσεις των τιμών της συστολής μεταξύ δοκιμίων από το ίδιο μίγμα για το σύνολό τους, μπορούμε να συμπεράνουμε τα εξής:

- Οι τιμές συστολής τόσο για την ξήρανση όσο και για την ενδογενή συστολή, έδειξαν πολύ μικρή απόκλιση μεταξύ δοκιμίων από το ίδιο μίγμα που σημαίνει καλή επαναληψιμότητα, άρα και αξιόπιστες μετρήσεις.
- Ο τύπος του τσιμέντου σαφώς επηρεάζει το αποτέλεσμα της μέτρησης σε μεγάλο ποσοστό, αλλά δεν είναι ο μοναδικός παράγοντας, εξαρτάται δηλ. και από μια σειρά άλλων παραμέτρων όπως η θερμοκρασία, ο αέρας στο μίγμα ή ο τρόπος διεξαγωγής του πειράματος.
- Η χρησιμοποίηση πολυμερούς (P) δεν επηρέασε τις μετρήσεις κάτι που ήταν μη αναμενόμενο και η δικαιολόγηση της συμπεριφοράς του μπορεί να γίνει με περαιτέρω έρευνα που όμως δεν είναι στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας.
- Στις δευτερεύουσες εργαστηριακές μετρήσεις παρατηρήσαμε κάποια αρχική διαστολή η οποία ήταν εντονότερη στην ενδογενή φάση. Το φαινόμενο αυτό έχει παρατηρηθεί και σε μετρήσεις από άλλους ερευνητές. Η εμφάνιση της αρχικής αυτής διαστολής έναντι συστολής θα μπορούσε να αποδοθεί στην αύξηση της θερμοκρασίας του μίγματος από τη θερμότητα που αναπτύσσεται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου.

Από τη σύγκριση μεταξύ των διαφόρων μιγμάτων τσιμεντοπολτού μπορούμε συμπερασματικά να πούμε ότι:

- Από τις κύριες μετρήσεις τη μεγαλύτερη συστολή έναντι ξήρανσης παρουσίασε το τσιμέντο I 55 που είχε όμως τη μικρότερη απώλεια βάρους από όλα, ενώ τη μικρότερη συστολή ξήρανσης είχε το Λευκό (αναμενόμενο καθώς διαθέτει υψηλή αντοχή) με εξίσου μικρή εξάτμιση νερού.

- Από τις δευτερεύουσες μετρήσεις της πρώτης φάσης, η χρήση πολυμερούς δεν ευνόησε τη μείωση της ξήρανσης.
- Από τις μετρήσεις της δεύτερης φάσης τη μεγαλύτερη συστολή έναντι ξήρανσης είχε το τσιμέντο I 45 (περίπου ίδια με αυτή του II 35), αλλά το I 45 παρουσίασε τη μικρότερη απώλεια, ενώ το τσιμέντο II 35 τη μεγαλύτερη. Το τσιμέντο σκωρίας είχε τη μικρότερη συστολή.
- Για την περίπτωση της “ένδογενούς” συστολής, από τις κύριες μετρήσεις φάνηκε ότι τη μεγαλύτερη συστολή είχε το τσιμέντο CEM/42,5, ενώ τη μικρότερη το Λευκό (με τη μικρότερη επίσης εξάτμιση).
- Στις δευτερεύουσες της πρώτης φάσης μεγαλύτερη “ένδογενή” συστολή είχε το τσιμέντο II 35 με $P=0,25\%T$ που παρουσίασε όμως τη μικρότερη απώλεια βάρους. Το τσιμέντο II 35 με ποσοστό πολυμερούς 7% του τσιμέντου είχε τη μικρότερη συστολή με μεγάλη μάλιστα διάρκεια αρχικής διαστολής και τη μεγαλύτερη απώλεια βάρους.
- Στις δευτερεύουσες μετρήσεις της δεύτερης φάσης την πιο μεγάλη “ένδογενή” συστολή είχε το τσιμέντο I 45, με τη μικρότερη πάντως απώλεια βάρους, ενώ το II 35 παρουσίασε μικρή συστολή.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Χ.Μ. Οικονόμου «Τεχνολογία του Σκυροδέματος »
Εκδόσεις Art of text, 2^η έκδοση 1978
2. Π. Κουφόπουλος – Χρ. Οικονόμου «Τα Υλικά»
10^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Σκυροδέματος 1990
3. Παρασκευοπούλου Αικατερίνη – Σπανάκη Φωτεινή «Επιρροή της ποσότητας του τσιμεντού και του νερού στην υδατοαπορρόφηση του σκυροδέματος»
Αθήνα, Μάρτιος 2001 Διπλωματική εργασία
4. Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Τσιμέντου 2001 «Τα Νέα Ευρωπαϊκά Πρότυπα Τσιμέντου»
5. Σ. Κόλιας «Φαινόμενα τριχοειδών – Ρόφηση – Συστολή»
Προχωρημένη Τεχνολογία Σκυροδέματος, σημειώσεις μεταπτυχιακού μαθήματος '97
6. Κοπανιά Γεωργία «Συστολή τσιμεντοπολτού. Παράγοντες επιρροής και μέθοδοι μετρήσεως»
Αθήνα, Μάρτιος 2001 Διπλωματική εργασία

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

“ ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ
ΤΟΥ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΤΟ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ”



ΦΟΙΤΗΤΡΙΑ :ΚΥΠΡΙΑΝΙΔΟΥ ΑΘΗΝΑ

ΑΘΗΝΑ 2000

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ	1
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	4
ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	5
ΚΥΛΙΝΔΡΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	6
1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	6
2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ Κ.Σ.	10
2.1 ΥΛΙΚΑ.....	10
2.1.1 ΑΔΡΑΝΗ	10
2.1.2 ΚΟΝΙΕΣ	12
2.1.2.1 ΤΣΙΜΕΝΤΟ	12
2.1.2.2 ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ	12
2.1.2.3 ΠΡΟΣΘΕΤΑ.....	12
2.1.3 ΑΝΑΛΟΓΙΕΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ Κ.Σ.	13
2.2 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	14
2.2.1 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ.....	14
2.2.2 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ	14
2.2.3 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΔΙΑΡΡΗΞΗ (ΑΝΤΙΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗ ΘΛΙΨΗ – SPLIT TENSILE STRENGTH).....	14
2.2.4 ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	14
2.2.5 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ	14
2.2.6 ΑΝΤΟΧΗ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ ΜΕΤΑΞΥ ΔΥΟ ΕΠΑΛΛΗΛΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ Κ.Σ. (BOND STRENGTH)	15
2.2.7 ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ (DURABILITY).....	15
2.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ.....	16
2.3.1 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΥΠΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΒΑΣΕΩΣ	16
2.3.2 ΜΙΞΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ	16
2.3.3 ΔΙΑΣΤΡΩΣΗ.....	16
2.3.4 ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ	17
2.3.5 ΑΡΜΟΙ	17
2.3.6 ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ.....	17
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΕΡΕΥΝΑ.....	19
1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ	19
2 ΥΛΙΚΑ.....	20
2.1 ΤΣΙΜΕΝΤΟ	20
2.2 ΑΔΡΑΝΗ	20
2.3 ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ.....	22
2.4 ΝΕΡΟ.....	22
3 ΑΝΑΜΙΓΜΑΤΑ.....	22
3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ	23
3.2 ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΑ ΑΝΑΜΙΓΜΑΤΑ.....	24
3.3 ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	26
3.3.1 ΠΡΟΕΡΓΑΣΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ	26
3.3.2 ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΜΙΓΜΑΤΩΝ.....	26
3.4 ΠΡΙΣΜΑΤΑ 10/10/50 (cm)	27
3.5 ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ 10/20 (cm).....	27

4	ΔΟΚΙΜΕΣ.....	29
4.1	ΘΛΙΨΗ.....	29
4.1.1	ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΨΑΘΥΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΘΛΙΠΤΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ.....	29
4.1.2	ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΟΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ.....	33
4.1.3	ΜΗΧΑΝΗ ΔΟΚΙΜΩΝ.....	33
4.1.4	ΣΚΟΠΟΣ – ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ.....	34
4.1.4.1.1	ΔΟΚΙΜΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΒΟΥ.....	34
4.1.4.1.2	ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ.....	35
4.1.4.1.2.1	ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	35
4.1.4.1.2.2	ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΔΟΚΙΜΗΣ.....	36
4.2	ΔΙΑΡΡΗΞΗ.....	36
4.2.1	ΣΧΟΛΙΑ ΠΑΝΩ ΣΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΣΕ ΔΙΑΡΡΗΞΗ.....	36
4.2.2	ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΟΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ.....	37
4.2.3	ΜΗΧΑΝΗ ΔΟΚΙΜΩΝ - ΔΟΚΙΜΙΑ.....	37
4.2.4	ΣΚΟΠΟΣ - ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ και εκτέλεση της ΔΟΚΙΜΗΣ.....	38
4.3	ΚΑΜΨΗ.....	38
4.3.1	ΣΧΟΛΙΑ ΠΑΝΩ ΣΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ.....	39
5	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	40
5.1	ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	42
5.1.1	ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΟΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ.....	42
5.1.2	ΣΚΟΠΟΣ – ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ.....	42
	ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ.....	43
1	ΘΛΙΨΗ.....	43
1.1	ΔΟΚΙΜΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΒΟΥ.....	43
1.2	ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ.....	43
2	ΚΑΜΨΗ.....	44
3	ΔΙΑΡΡΗΞΗ.....	44
	ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	46
1	ΑΝΤΟΧΕΣ-ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	46
1.1	ΘΛΙΨΗ.....	46
1.1.1	ΔΟΚΙΜΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΒΟΥ.....	46
1.1.2	ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ.....	47
1.2	ΔΙΑΡΡΗΞΗ.....	48
1.3	ΚΑΜΨΗ.....	48
	ΕΠΙΡΡΟΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ.....	50
1	ΑΝΑΛΟΓΙΕΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ – ΗΛΙΚΙΑ.....	50
2	ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΑΝΤΟΧΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΡΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	50
2.1	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ- ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΔΙΑΡΡΗΞΗ.....	50
2.2	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ- ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ (ΔΟΚΙΜΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΒΟΥ).....	51
2.3	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ - ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ.....	51
2.4	ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΔΙΑΡΡΗΞΗ – ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ (ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΒΟΥ).....	51
2.5	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΚΑΜΨΗ - ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ.....	51
2.6	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ - ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ.....	52
2.7	Μ. Ε. ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ –ΔΥΝΑΜΙΚΟ Μ. ΕΛ.....	52
2.8	Μ. Ε. ΣΕ ΚΑΜΨΗ –ΔΥΝΑΜΙΚΟ Μ. ΕΛ.....	52
2.9	Μ. Ε. ΣΕ ΚΑΜΨΗ – Μ. Ε. ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ.....	52
	ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	54

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	55
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	56

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Από την θέση αυτή θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου προς:

Την Ένωση Τσιμεντοβιομηχάνων Ελλάδος για την παραχώρηση του εργαστηρίου σκυροδέματος στο οποίο έγινε η διεξαγωγή της μελέτης αυτής καθώς και στο προσωπικό του εργαστηρίου.

Στον κ. Σ. Κόλια, Επ. Καθηγητή του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής του Ε.Μ.Π., επιβλέποντα καθηγητή για την βοήθεια που προσέφερε στην οργάνωση και στην εκτέλεση των πειραμάτων, για τις υποδείξεις του και τη συμβολή του στην επίλυση διαφόρων προβλημάτων που δημιουργήθηκαν κατά την διάρκεια της μελέτης και για την πολύτιμη επιστημονική καθοδήγηση καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Σε όλους εκείνους που βοήθησαν στην τελική διαμόρφωση και έκδοση της εργασίας αυτής.

ΑΘΗΝΑ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2000

ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Από την ανασκόπηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας σχετικά με το Κ.Σ. διαπιστώθηκε ότι αυτό αποτελεί ένα ενδιαφέρον υλικό για την κατασκευή οδοστρωμάτων, που βρίσκει εφαρμογή σε πολλές χώρες του εξωτερικού. Κρίθηκε ότι τα πλεονεκτήματα που διαθέτει κάνουν την εφαρμογή του στην οδοστρωσία ιδιαίτερα ελκυστική για την Ελλάδα. Για το λόγο αυτό αποφασίσθηκε να μελετηθούν οι ιδιότητες του υλικού με την διεξαγωγή δοκιμών στο εργαστήριο.

Προκειμένου λοιπόν να διερευνηθούν τα χαρακτηριστικά και η συμπεριφορά αυτού του νέου, χαμηλού κόστους υλικού επιλέχθηκαν ως υλικά: Τσιμέντο Πόρτλαντ σε δύο ποιότητες (II 35 και I45), αδρανή ασβεστολιθικά θραυστά λατομείου και ιπτάμενη τέφρα προέλευσης Α.Η.Σ. Πτολεμαΐδας.

Με κύριο κριτήριο το είδος της φόρτισης στην οποία υποβάλλεται ένα οδόστρωμα από σκυρόδεμα επιλέχθηκαν ορισμένες δοκιμές ώστε να εκτιμηθούν οι βασικές μηχανικές του ιδιότητες.

Η εύρεση της αντοχής σε κάμψη, της αντοχής σε θλίψη και της αντοχής σε διάρρηξη, ο καθορισμός των μέτρων ελαστικότητας τόσο στις παραπάνω καταπονήσεις όσο και με μη καταστρεπτικές μεθόδους, ο βαθμός συσχέτισης των χαρακτηριστικών αυτών και η μεταβολή τους σε σχέση με την σύνθεση και την ηλικία αποτελούν το αντικείμενο αυτής της εργασίας

ΚΥΛΙΝΔΡΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

ROLLER COMPACTED CONCRETE.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο όρος **Roller Compacted Concrete (RCC)** σε ακριβή μετάφραση σημαίνει "σκυρόδεμα συμπτυνούμενο με οδοστρωτήρα". Ο ακριβής ορισμός σύμφωνα με το Αμερικανικό Ινστιτούτο Σκυροδέματος (ACI) είναι: "σκυρόδεμα που συμπτυνώνεται με οδοστρωτήρα και που στη μη σκληρυμένη κατάσταση είναι αρκετά ύφυγρο, ώστε να μπορεί να φέρει το βάρος του οδοστρωτήρα που χρησιμοποιείται για την συμπίκνωση του, ενώ ταυτόχρονα η υγρασία του είναι επαρκής ώστε να μπορεί να επιτευχθεί η επιθυμητή συμπίκνωση".

Το Κ.Σ. έχει εκτεταμένα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή φραγμάτων και οδοστρωμάτων. Μπορεί να περιγραφεί σαν ένα σχετικά συμπαγές μίγμα αδρανών (μεγίστου μεγέθους κόκκου 20 mm), κονιών, νερού και ενδεχομένως προσθέτων (επιβραδυντικών) που συμπτυνώνεται με δονητικούς οδοστρωτήρες και σκληρύνεται στη μορφή σκυροδέματος. Όταν χρησιμοποιείται σαν επιφανειακή στρώση προδιαγράφεται γι' αυτό μια θλιπτική αντοχή 27,6 MPa[1].

Το Κ.Σ. είναι σκυρόδεμα με μηδενική κάθιση. Διαστρώνεται σε στρώσεις καθορισμένου πάχους μέχρι 25 εκ. Συμπτυνώνεται με δονητικούς οδοστρωτήρες με ατσάλινο κύλινδρο και η τελική συμπίκνωση γίνεται με οδοστρωτήρες με ελαστικά επίσωτρα. Η συντήρηση του γίνεται με νερό ή άλλα μέσα παρόμοια μ' αυτά που χρησιμοποιούνται για τα οδοστρώματα από συμβατικό σκυρόδεμα. Η κυκλοφορία διενεργείται είτε απ' ευθείας στην επιφάνεια του Κ.Σ., είτε χρησιμοποιείται λεπτό στρώμα ασφαλτικού υλικού για την παροχή λείας επιφάνειας ή για την αποκατάσταση υπάρχοντος οδοστρώματος. Σε οδοστρώματα Κ.Σ. συνήθως δεν κατασκευάζονται εγκάρσιοι και διαμήκεις αρμοί διαστολής (κυρίως κατά την πρακτική που εφαρμόζεται στις Η.Π.Α) για τον έλεγχο των ρωγμών.

Οδοστρώματα Κ.Σ. έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορες εφαρμογές, όπως:

1. Οδοστρώματα λιμένων εμπορευματοκιβωτίων.
2. Διαμετακομιστικούς σταθμούς διαφόρων μεταφορικών μέσων (intermodal yards) π.χ. πλοίο σε τραίνο ή φορτηγό, φορτηγό σε τραίνο κλπ.

3. Δρόμους εξυπηρέτησης υλοτομίας και εγκαταστάσεις διαχωρισμού κορμών.
4. Εγκαταστάσεις στάθμευσης φορτηγών
5. Εγκαταστάσεις στάθμευσης αρμάτων μάχης.
6. Εγκαταστάσεις αποθήκευσης χύδην υλικών (π.χ. άνθρακες, πριονίδια).
7. Βιομηχανικά οδοστρώματα με μικρή ταχύτητα κυκλοφορίας.
8. Δημοτικές οδούς χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου και μικρής ταχύτητας.
9. Βάσεις αυτοκινητοδρόμων που επικαλύπτονται με ασφαλική στρώση πάχους περίπου 6-12 cm
10. Δάπεδα σταθμεύσεως αεροσκαφών

ΙΣΤΟΡΙΚΟ

Η κατασκευή οδοστρωμάτων από Κ.Σ. δεν αποτελεί μια καινούργια τεχνική. Το πρώτο άκαμπτο σκυρόδεμα κατασκευάστηκε το 1865 στη Σκοτία, ενώ η τεχνική της συμπύκνωσης με δόνηση αναπτύχθηκε 50 χρόνια αργότερα. Έτσι σε πολλές χώρες η κατασκευή των άκαμπτων οδοστρωμάτων πραγματοποιούνταν με κυλίνδρωση πριν και μετά τον πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο[2]. Κατά τη δεκαετία του 30, η δόνηση του σκυροδέματος ως μέσο συμπύκνωσης υιοθετήθηκε βαθμιαία σε όλους τους τομείς της δραστηριότητας του πολιτικού μηχανικού συμπεριλαμβανομένης και της κατασκευής οδοστρωμάτων, οπότε η συμπύκνωση με στατικούς οδοστρωτήρες εγκαταλείφθηκε, αφού ο διαθέσιμος εξοπλισμός στη δεδομένη χρονική περίοδο δεν εξασφάλιζε την ίδια ποιότητα συμπύκνωσης με αυτή που επιτυγχάνονταν με τη χρήση δόνησης.

Παρ' όλα αυτά η κυλίνδρωση συνέχισε να χρησιμοποιείται ευρέως στην κατασκευή σταθεροποιημένων με τσιμέντο βάσεων και υποβάσεων. Η γνώση που αποκτήθηκε από τον τομέα αυτό υπήρξε σημαντική βοήθεια στη σύγχρονη ανάπτυξη του Κ.Σ. στην δεκαετία του εβδομήντα, όταν η αύξηση του κόστους της ασφάλτου (ως παραγώγου του πετρελαίου) προκάλεσε το ενδιαφέρον για τη διερεύνηση εναλλακτικών λύσεων οι οποίες θα επέτρεπαν την μείωση του ποσοστού χρησιμοποίησεως της στην κατασκευή οδοστρωμάτων.

Το πρώτο Κ.Σ. οδόστρωμα στις ΗΠΑ κατασκευάστηκε από το Σώμα Μηχανικών του Αμερικανικού Στρατού στο Σιάτλ και ήταν ένας διάδρομος στο αεροδρόμιο της Yakima, Washington, που κατασκευάστηκε το 1942.

Το πρώτο Κ.Σ. οδόστρωμα στον Καναδά κατασκευάστηκε το 1976 σε μια εγκατάσταση διαχωρισμού κορμών υλοτομίας στο Caycuse της νήσου Βανκούβερ στη Βρεττ. Κολούμπια. Η απόφαση για την κατασκευή ελήφθη σαν μετεξέλιξη ενός σχεδιασμού που πρότεινε την κατασκευή μιας βάσης από σταθεροποιημένα αδρανή με τσιμέντο (cement

stabilized aggregate base) πάχους 35 εκ. που επρόκειτο να επιστρωθεί με μια ασφαλική στρώση πάχους 5 εκ. Σαν εναλλακτική λύση στην ασφαλική στρώση οι ιδιοκτήτες αποφάσισαν να αυξήσουν το ποσοστό τσιμέντου των άνω 15εκ. της βάσης σε 13% για να βελτιωθεί η συμπεριφορά της στη φθορά από την κυκλοφορία και τον παγετό (εναλλαγές ψύξης-απόψυξης[ακ3]). Το ποσοστό τσιμέντου των υπόλοιπων 20 εκ. παρέμεινε στα 8%. Η τελική εφαρμογή κατελάμβανε έκταση περίπου 16 στρεμμάτων. Ανάμεσα στις δύο στρώσεις δεν χρησιμοποιήθηκε υλικό σύνδεσης και ο εργολάβος προσπάθησε η τοποθέτηση τους να γίνεται την ίδια ημέρα. Μετά από χρόνια σε μερικά σημεία παρατηρήθηκε αποκόλληση των δύο στρώσεων μεταξύ της επιφάνειας επαφής των. Αυτό οδήγησε στον καθορισμό προδιαγραφών για το μέγιστο χρόνο που πρέπει να μεσολαβεί ανάμεσα στις στρώσεις. Στην ίδια περιοχή κατασκευάστηκαν άλλα 20 στρέμματα Κ.Σ. το 1978.

Μετά την επιτυχία της πρώτης αυτής προσπάθειας, τρεις εγκαταστάσεις διαχωρισμού κορμών κατασκευάστηκαν στα νησιά Queen Charlotte της Βρετ. Κολούμπια από το 1976 έως το 1978. Η συνολική έκταση που είχε στρωθεί με Κ.Σ. στη Βρετ. Κολούμπια έφθανε τα 80 στρέμματα το 1980. Στη συνέχεια κατασκευάστηκε ένας δρόμος μήκους 18 χλμ. με πάχος Κ.Σ. 17,5 εκ. για ένα ορυχείο άνθρακα στο Tumbler Ridge στη Βρετ. Κολούμπια. Μαζί κατασκευάστηκε ένας χώρος αποθήκευσης [14]20 στρεμμάτων με πάχος Κ.Σ. 23 εκ. Ο δρόμος δέχθηκε και μια επίστρωση με ασφαλικό υλικό ενώ η περιοχή αποθήκευσης έχει ακόμα εκτεθειμένη την επιφάνεια του Κ.Σ.

Στις Η.Π.Α. μετά από μια σειρά μικρών πιλοτικών έργων που κατασκεύασε το Σώμα Μηχανικών του Αμερικανικού Στρατού από το 1980 μέχρι το 1984, το πρώτο σημαντικό έργο οδοστρωσίας με Κ.Σ. κατασκευάστηκε στο Ft.Hood στο Τέξας. Συνολικά κατασκευάστηκαν εκεί περίπου 15 στρέμματα με Κ.Σ. πάχους 25 εκ. με αντοχή σε εφελκυσμό 5.5 MPa . το 1986 κατασκευάστηκαν άλλα 22 στρέμματα Κ.Σ. στο Fort Lewis Washington. Το πάχος του Κ.Σ. ήταν 22 εκ.

Στη συνέχεια. το ενδιαφέρον για Κ.Σ. διευρύνεται. Η εταιρεία Burlington Northern Railroad επέλεξε το υλικό αυτό για την οδοστρωσία περίπου 44 στρεμμάτων σε μια καινούργια διαμετακομιστική εγκατάσταση (intermodal yard) στο Χιούστον, Τέξας, το 1985 και επίσης σε μια άλλη εγκατάσταση 107 στρεμμάτων στο Denver, Colorado το 1986[15]. Ακόμα, ο Οργανισμός Λιμένος Τακόμα, Washington κατασκεύασε συνολικά 50 στρέμματα Κ.Σ. Το ίδιο υλικό χρησιμοποιήθηκε επίσης σε μεγάλα τμήματα των Τερματικών Σταθμών Conley και Moran του Λιμένα της Βοστώνης (1986 - 1988).

Το μεγαλύτερο έργο Κ.Σ. μέχρι σήμερα συνιστά η επίστρωση επιφανείας περίπου 543 στρεμμάτων με Κ.Σ. πάχους 20 και 25 εκ. στο εργοστάσιο συναρμολόγησης αυτοκινήτων Saturn της General Motors στο Spring Hill. Tennessee, το 1988. Το 1988-

89 ένα άλλο μεγάλο έργο ήταν τα 360 στρέμματα Κ.Σ. πάχους 25 εκ. που κατασκευάστηκαν στο Ft. Drum της Νέας Υόρκης τόσο για χώρους στάθμευσης βαρέων οχημάτων του στρατού όσο και για συνδετήριες οδούς μέσα στο στρατόπεδο.

Ένα παράδειγμα εφαρμογής Κ.Σ. σε αεροδρόμιο έχουμε στο Portland, Oregon όπου Κ.Σ. πάχους 36 εκ. τοποθετήθηκε σε πίστα εκτάσεως 36 στρεμμάτων για τη στάθμευση αεροσκαφών σε περίπτωση πληρώσεως των συμβατικών χώρων σταθμεύσεως του αεροδρομίου.

Τέλος, Κ.Σ. έχει χρησιμοποιηθεί σε δημοτικές οδούς στις πόλεις Portland, Oregon, Regina-Saskatchewan και McKenzie-Brit.Columbia.

Στον ευρωπαϊκό χώρο τα πρώτα οδοστρώματα από Κ.Σ. κατασκευάσθηκαν στην Ισπανία το 1970, σε δρόμους χαμηλού κυκλοφοριακού φόρτου. Μετά το 1980, τουλάχιστον 10 ακόμη χώρες (Γαλλία, USA, Νορβηγία, Σουηδία, Φινλανδία, Δανία, Γερμανία, Αυστραλία).

Από τη μέχρι σήμερα εμπειρία τα ακόλουθα πλεονεκτήματα προκύπτουν από τη χρήση Κ.Σ. :

1. Οικονομία 20 ως 40%.
2. Ταχύτητα κατασκευής ως συνέπεια της χρήσης παρόμοιου εξοπλισμού με αυτόν που χρησιμοποιείται για την κατασκευή οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα.
3. Καλύτερη απόκριση σε βαρέα και σημειακά φορτία (σε σύγκριση με τους ασφαλικούς τάπητες).
4. Καμία επίδραση από χημικές ουσίες.
5. Υψηλή αντοχή σε μικρή ηλικία με αποτέλεσμα να μπορεί ο δρόμος να δοθεί στην κυκλοφορία σε σύντομο χρονικό διάστημα.
6. Μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ των αρμών αφού η συστολή ξηράνσεως είναι μικρή.
7. Μικρότερη ανάγκη συντηρήσεως κατά τη διάρκεια ζωής (και πάλι σε σύγκριση με ασφαλικούς τάπητες)

Τα μειονεκτήματα που έχουν παρουσιαστεί σε σχέση με τη χρήση "Κυλινδρούμενου Σκυροδέματος συμπτυκνόμενου" με οδοστρωτήρες μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

1. Ανώμαλη επιφάνεια.
2. Διασπορά των τιμών αντοχών του υλικού.
3. Αρμοί και ρωγμές.
4. Σχετική ανθεκτικότητα σε εναλλαγές ψύξεων και αποψύξεων σε χώρες με ψυχρά κλίματα.

2 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ Κ.Σ.

2.1 ΥΛΙΚΑ

Σαν βασικά υλικά για το Κ.Σ. είναι αδρανής, τσιμέντο, νερό συχνά ιπτάμενη τέφρα και τυχόν πρόσθετα.

2.1.1 ΑΔΡΑΝΗ

Τα αδρανή αποτελούν περίπου το 75 έως 85% του όγκου του μίγματος και συνεπώς επηρεάζουν σημαντικά τις ιδιότητες του νωπού όσο και του σκληρυμένου μίγματος. Οι ιδιότητες των αδρανών επηρεάζουν το εργάσιμο του μίγματος, την πιθανότητα διαχωρισμού χονδρόκοκκων από λεπτόκοκκα αδρανή, τον επιτυγχάνομενο βαθμό συμπίκνωσης από δονητικό οδοστρωτήρα, την αντοχή, το μέτρο ελαστικότητας, τις θερμικές ιδιότητες και την ανθεκτικότητα του σκληρυμένου σκυροδέματος. Τα χονδρόκοκκα αδρανή αποτελούνται από θραυστά ή φυσικά υλικά. Τα λεπτόκοκκα μπορεί να είναι φυσική ή θραυστή άμμος λατομείου ή συνδυασμός των δύο.

Για Κ.Σ. υψηλής ποιότητας τα αδρανή πρέπει να αποτελούνται από σκληρούς και ανθεκτικούς κόκκους και η ποιότητα τους συνίσταται να αξιολογείται με δοκιμές όπως αυτά του ASTM C33 [16]. Σύμφωνα με το άρθρο 28 της Τ.Σ.Υ. πρέπει να ικανοποιούν τις απαιτήσεις που προδιαγράφονται για “Κατεργασμένα Θραυστά Αδρανή Αμμοχάλικα”(παραγ.26.2.2 της Τ.Σ.Υ.) με μερικές αποκλίσεις.

Το Κ.Σ. που περιέχει θραυστούς χάλικες μπορεί να χρειάζεται περισσότερη ενέργεια για συμπίκνωση ενώ ταυτόχρονα είναι πιο δύσκολος ο διαχωρισμός χονδρόκοκκων από λεπτόκοκκα αδρανή. Επίσης έχει υψηλότερη εφελκυστική αντοχή και εν γένει παρουσιάζει βελτιωμένη ευστάθεια. Γι’ αυτό τον λόγο τα 2/3 των αδρανών που χρησιμοποιούνται πρέπει να είναι θραυστά ώστε να αποκτήσει το οδόστρωμα επαρκή φέρουσα ικανότητα.

Τα μίγματα Κ.Σ. δεν είναι τόσο συνεκτικά όσο το συμβατικό σκυρόδεμα και συνεπώς το μέγεθος των αδρανών πρέπει να αποτελεί σημαντικό σημείο προβληματισμού. Για τη μείωση της πιθανότητας διαχωρισμού το ονομαστικό μέγιστο μέγεθος αδρανών να μην ξεπερνά τα 20-22 mm. ή τα 19 mm σύμφωνα με [17] ενώ

Για να επιτευχθούν όσο το δυνατόν πιο ομαλές τελικές επιφάνειες, τα χονδρόκοκκα και λεπτόκοκκα αδρανή (άμμος, γαρμπίλι) πρέπει να συνδυάζονται έτσι ώστε να πλησιάζουν μια κοκκομετρική διαβάθμιση μέγιστης πυκνότητας, καθώς και να τηρούν τους περιορισμούς σχετικά με τη μέγιστη διάμετρο των αδρανών. Εξαίρεση αποτελεί η κατασκευή οδοστρωμάτων στην Ισπανία, όπου χρησιμοποιήθηκαν αδρανή μεγέθους έως και 38 mm. Στην περίπτωση αυτή όμως η τελική διαμόρφωση της επιφάνειας γίνεται με μηχανικά μέσα (mechanical trowelling) διαδικασία που επιτρέπει την πλήρωση των πιθανών σχηματιζόμενων κενών στην επιφάνεια.

Η χρήση λεπτόκοκκων αδρανών μικρότερων των 75 μικρομέτρων (No 200), σε περίπτωση που αυτά είναι μη πλαστικά, μπορεί να συνεισφέρει στην μείωση των κενών, την επίτευξη επίπεδης υψής της επιφάνειας του οδοστρώματος, ενώ έχουν σημαντική επιρροή στην ευστάθεια (άμεση φέρουσα ικανότητα) του μίγματος. Σχετικά μεγάλο ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού, και ιδιαίτερα υλικού με στρογγυλεμένους κόκκους καθιστά το μίγμα ευκολότερα συμπακνώσιμο αλλά λιγότερο ευσταθές. Πάντως η επίδραση τους πρέπει να μελετηθεί στις μελέτες σύνθεσης όπου καθορίζονται οι αναλογίες του μίγματος και γι' αυτό οι κανονισμοί καθορίζουν περιορισμούς σχετικά με τις αναλογίες τους.

Διάφορες χώρες έχουν καθορίσει όρια για τις κοκκομετρικές διαβαθμίσεις. Τα όρια των κοκκομετρικών σύμφωνα με τους Ισπανικούς κανονισμούς (το ποσοστό των κονιών περιλαμβάνεται επίσης στην κοκκομετρική διαβάθμιση.) παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα για μέγιστο μέγεθος αδρανών 16 mm(5/8'') και 20 mm (3/4'').

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. : ΟΡΙΑ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΕΩΝ (ΙΣΠΑΝΙΚΟΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ)

ΜΕΓΕΘΟΣ ΚΟΣΚΙΝΟΥ	ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟ ΠΟΣΟΣΤΟ %	
	Μέγιστο μέγεθος: 16 mm(5/8'')	Μέγιστο μέγεθος: 20 mm (3/4'')
25 mm (1'')	---	100
20 mm (3/4'')	100	85-100
16 mm (5/8'')	88-100	75-100
10 mm (3/8'')	70-87	60-83
5 mm (No 4)	50-70	42-63
2 mm (No 10)	35-50	30-47
400 μm (No 40)	18-30	16-27
80 μm (No 200)	10-20	9-19

Τα αδρανή πρέπει να προέρχονται από δύο κατηγορίες τουλάχιστον όπως απαιτεί ο κανονισμός [ΑΚΒ] οι οποίες να διαχωρίζονται από το κόσκινο Νο4. αν πρόκειται για σχεδιασμό οδών ταχείας κυκλοφορίας.

Για τις επιφανειακές στρώσεις και κυρίως όσον αφορά τις αποκαταστάσεις παλαιότερων οδοστρωμάτων, το Κ.Σ. παρουσιάζει το πλεονέκτημα της εμφάνισης υψηλής ευστάθειας αμέσως μετά την συμπύκνωση. Η ευστάθεια εκτιμάται με τη δοκιμή διείσδυσης C.B.R. (να μην είναι μικρότερη από 65[19]) σε δοκίμια που έχουν συμπυκνωθεί στην ελάχιστη πυκνότητα που απαιτείται (φυσιολογικά στο 95% της τροποποιημένης δοκιμής Proctor).

2.1.2 ΚΟΝΙΕΣ

Από πλευράς τσιμέντου και άλλων ανάλογων συνδετικών κονιών στο Κ.Σ. έχουν χρησιμοποιηθεί με επιτυχία τσιμέντο Πόρτλαντ τύπου I ή II και ιπτάμενη τέφρα κλάσεως F και C.

2.1.2.1.1 ΤΣΙΜΕΝΤΟ

Η χρησιμοποιούμενη ποσότητα τσιμέντου κυμαίνεται σε ποσοστά 10% με 15% του συνολικού βάρους των αδρανών υλικών, ενώ 300 ± 30 kg ανά m^3 είναι η πιο συνηθισμένη αναλογία.

Ειδικότερα συνίσταται η χρήση τσιμέντου τύπου II ή τύπου III, ενώ δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται τσιμέντα κατηγορίας αντοχής ανώτερης του 35.[10]

2.1.2.1.2 ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ

Η χρήση ιπτάμενης τέφρας είναι ένας αποτελεσματικός τρόπος παροχής λεπτόκοκκου υλικού που είναι απαραίτητο για την εξασφάλιση της συμπύκνωσης. Η ιπτάμενη τέφρα φθάνει σε ποσοστό 15-20% των συνδετικών υλικών. Κατευθυντήριες οδηγίες στη χρήση ποζολανικού υλικού δίδονται στο κείμενο ACI 226R.

2.1.2.1.3 ΠΡΟΣΘΕΤΑ

Όσον αφορά τα χημικά πρόσθετα, έχουν γίνει σε δοκιμαστικό επίπεδο προσπάθειες για τη χρήση αερακτικών πρόσθετων που προκαλούν τη δημιουργία μικροσκοπικών πόρων (air entraining admixtures) πράγμα που έχει αποδειχθεί ευεργετικό, όσον αφορά τη συμπεριφορά του συμβατικού σκυροδέματος, στην περιοδική δράση του παγετού. Μέχρι

σήμερα οι προσπάθειες αυτές δεν έχουν καταλήξει σε εφαρμογές σε έργα πλήρους κλίμακος.

Οι προσπάθειες για τη μείωση των βλαβών στην περιοδική δράση του παγετού, έως τώρα στέφονται από σχετική επιτυχία με τη χρήση μικρών λόγων W/C (νερό/ κονίες) έτσι ώστε η διαπερατότητα της κλειστής φάσης (matrix - μήτρας) να είναι χαμηλή.

Άλλα χημικά πρόσθετα, πχ. για τη μείωση του νερού (πλαστικοποιητές) ή για την καθυστέρηση έναρξης σκλήρυνσης (retarding agents) έχουν περιορισμένα χρησιμοποιηθεί σε έργα Κ.Σ. στην Αμερική, σε αντίθεση με την αρκετά εκτεταμένη χρήση των επιβραδυντικών προσθέτων στις Ευρωπαϊκές χώρες και ιδίως στην Ισπανία και την Γαλλία.

2.1.3 ΑΝΑΛΟΓΙΕΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ Κ.Σ.

Οι διαδικασίες προσδιορισμού των αναλογιών μιγμάτων Κ.Σ. διαφέρουν από αυτές του συμβατικού σκυροδέματος λόγω της απαίτησης για μηδενική κάθιση και της χρήσης μη συμβατικά κοκκομετρικά διαβαθμισμένων αδρανών. Οι κύριες διαφορές στις αναλογίες μιγμάτων Κ.Σ. και συμβατικού σκυροδέματος για τα οδοστρώματα είναι:

1. Το Κ.Σ. γενικά δεν περιέχει εγκλεισμένο αέρα.
2. Το Κ.Σ. περιέχει λιγότερο νερό.
3. Το Κ.Σ. έχει χαμηλότερο ποσοστό τσιμέντου
4. Το Κ.Σ. χρειάζεται περισσότερα λεπτότερα αδρανή για να έχει μια καλά διαβαθμισμένη κοκκομετρική καμπύλη ώστε να παρουσιάζει ευστάθεια κάτω από τη δράση δονητικού οδοστρωτήρα.
5. Το ονομαστικό μέγιστο μέγεθος αδρανών δεν υπερβαίνει τα 19 χιλ. για να περιοριστεί η πιθανότητα διαχωρισμού των υλικών η πιθανότητα διαχωρισμού των υλικών και να παραχθεί μια σχετικά λεία επιφάνεια[L11].

Το Κ.Σ. διαφέρει από τα σταθεροποιημένα με τσιμέντο εδαφικά υλικά (soil-cement) και τις βάσεις από κατεργασμένα με τσιμέντο αδρανή (cement treated bases) γιατί έχει υψηλότερο ποσοστό τσιμέντου και αδρανή υψηλής ποιότητας υψηλής ποιότητας. Για να συμπυκνωθεί ικανοποιητικά το Κ.Σ. πρέπει να είναι αρκετά στεγνό ώστε να υποστηρίξει το βάρος δονητικού οδοστρωτήρα και αρκετά υγρό ώστε να υπάρχει επαρκής κατανομή του τσιμεντοπολτού (paste) κατά τη διάρκεια της πήξεως και της συμπύκνωσης.

Για τον καθορισμό των αναλογιών μιγμάτων έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες μέθοδοι που βασικά εμπίπτουν σε δύο ευρείες κατηγορίες.

- A. Καθορισμός αναλογιών με τη χρήση δοκιμών εργασιμότητας σκυροδέματος.

- Β. Καθορισμός αναλογιών με τη χρήση δοκιμών συμπύκνωσης του εδαφικού υλικού (Proctor).

2.2 ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

2.2.1 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ

Η αντοχή σε θλίψη είναι συγκρίσιμη με αυτή του συμβατικού σκυροδέματος με ανάλογα ποσοστά τσιμέντου (30-35 MPa) προδιαγεγραμμένη αντοχή σε θλίψη [L12]).

2.2.2 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ

Λόγω της δυσκολίας αποκοπής δοκών για δοκιμές από οδοστρώματα Κ.Σ., δεν υπάρχουν αρκετά δεδομένα για την καμπτική αντοχή όσα για την αντοχή σε θλίψη. Από τα διαθέσιμα πάντως δεδομένα έχει προκύψει η εμπειρική σχέση:

$$f_r = C \times \sqrt{f_c} \quad [AK13]$$

όπου f_r : αντοχή σε εφελκυσμό (φόρτιση σε δύο σημεία)

f_c : αντοχή σε θλίψη

C: σταθερά κυμαινόμενη από 9 ως 11.

2.2.3 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΔΙΑΡΡΗΞΗ (ΑΝΤΙΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗ ΘΛΙΨΗ – SPLIT TENSILE STRENGTH)

Έχει βρεθεί να κυμαίνεται από 2,8 μέχρι πάνω από 4,1 MPa.

2.2.4 ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Έχουν διενεργηθεί ελάχιστες δοκιμές. Εκτιμάται ότι οι τιμές του μέτρου Ελαστικότητας είναι παρόμοιες ή ελαφρά υψηλότερες των τιμών συμβατικού σκυροδέματος.

2.2.5 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΟΠΩΣΗ

Το Κ.Σ. όπως και τα άλλα κατασκευαστικά υλικά υπόκειται σε κόπωση. Η αστοχία σε κόπωση ορίζεται σαν “η θραύση του υλικού ύστερα από ένα αριθμό επαναλήψεων φορτίου που προκαλεί τάσεις μικρότερες από την αντοχή του υλικού”.

Αποτελέσματα από δοκιμές αντοχής σε δοκούς που ελήφθησαν από δοκιμαστικό τμήμα Κ.Σ., πλήρους κλίμακας, με 4 διαφορετικά μίγματα Κ.Σ. δείχνουν ότι η συμπεριφορά σε κόπωση του Κ.Σ. είναι παρόμοια με αυτή του συμβατικού σκυροδέματος [14][3].

2.2.6 ΑΝΤΟΧΗ ΣΥΝΑΦΕΙΑΣ ΜΕΤΑΞΥ ΔΥΟ ΕΠΑΛΛΗΛΩΝ ΣΤΡΩΣΕΩΝ Κ.Σ. (BOND STRENGTH)

Μια κρίσιμη ιδιότητα για το Κ.Σ. είναι η αντοχή συνδέσεως στη διεπιφάνεια δύο στρωμάτων Κ.Σ. Η φέρουσα ικανότητα μερικά συνδεδεμένων η μη συνδεδεμένων στρωμάτων είναι σημαντικά χαμηλότερη από αυτή συνδεδεμένων στρωμάτων ίσου συνολικού πάχους. Η αντοχή συνδέσεως είναι χαμηλή για τους ψυχρούς αρμούς. Ιδανικά η αντοχή συνδέσεως πρέπει να είναι τουλάχιστον ίση με το 50% της αντοχής του μητρικού υλικού Κ.Σ. Ο τρόπος κατασκευής επηρεάζει ιδιαίτερα αυτή την μηχανική ιδιότητα του Κ.Σ.

2.2.7 ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ (DURABILITY)

Με τον όρο αυτό γίνεται αναφορά στην ανθεκτικότητα σε περιβαλλοντικές δράσεις και κυρίως τις εναλλαγές ψύξης απόψυξης. Επειδή στην πράξη δεν έχει καταστεί δυνατός ο εγκλεισμός αέρα σε μικρές φυσαλίδες στη μάζα των μίγματος Κ.Σ., όπως στα μίγματα συμβατικού σκυροδέματος η κατάλληλη συμπίκνωση είναι κρίσιμη για την ανθεκτικότητα του σκληρυμένου μίγματος, κατ’ αναλογία με τις σταθεροποιημένες / κατεργασμένες βάσεις, όπου αν δεν επιτευχθεί η μέγιστη πυκνότητα μειώνεται σημαντικά η ανθεκτικότητα.

2.3 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ

Η κατασκευή περιλαμβάνει τη διάστρωση και συμπύκνωση ενός πολύ ύφυγρου μίγματος με μηχανήματα και τεχνικές παρόμοιες που χρησιμοποιούνται για τη διάστρωση ασφαλικών ταπήτων. Κατά συνέπεια μεγάλες ποσότητες Κ.Σ. μπορεί να τοποθετηθούν γρήγορα με μικρό εργατικό κόστος. Επίσης στο Κ.Σ. δεν υπάρχουν βλήτρα και οπλισμοί πράγμα που μειώνει ακόμα περισσότερο το κόστος.

Η κατασκευή περιλαμβάνει την προετοιμασία του υπεδάφους και της βάσεως, τη μίξη των υλικών και τη μεταφορά, την τοποθέτηση, συμπύκνωση την κατασκευή των αρμών και τη συντήρηση και προστασία.

2.3.1 ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΤΟΥ ΥΠΕΔΑΦΟΥΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΒΑΣΕΩΣ

Το υπέδαφος και η βάση (όπου υπάρχει) προετοιμάζονται όπως και για τα οδοστρώματα από συμβατικό σκυρόδεμα. Κρίσιμο είναι το υπέδαφος και η βάση να διαθέτουν επαρκή φέρουσα ικανότητα για να είναι δυνατή η συμπύκνωση του Κ.Σ. Η βάση συχνά χρησιμοποιείται για την αποστράγγιση νερού, ώστε να μειώνονται οι επιδράσεις από τις εναλλαγές ψύξης-απόψυξης ύδατος. Η επιφάνεια της βάσης υγραίνεται πριν τη διάστρωση του Κ.Σ.

2.3.2 ΜΙΞΗ ΚΑΙ ΜΕΤΑΦΟΡΑ

Χρησιμοποιούνται αναμικτήρες συνεχούς ή ασυνεχούς (κατά παρτίδες) αναμίξεως. Στην πρώτη περίπτωση έχουμε συνεχή τροφοδοσία πρώτων υλών, ενώ στη δεύτερη, γίνεται ζύγιση για κάθε φορτίο ξεχωριστά. Το μίγμα μεταφέρεται στα μηχανήματα διαστρώσεως με φορτηγά με μηχανισμό ανατροπής για το ξεφόρτωμα.

2.3.3 ΔΙΑΣΤΡΩΣΗ

Το μίγμα διαστρώνεται με τροποποιημένα μηχανήματα διαστρώσεως ασφαλικών ταπήτων. Η συνεχής τροφοδοσία τους είναι σημαντική για την αποφυγή ανωμαλιών στην επιφάνεια. Τα μηχανήματα αυτά παρέχουν και την πρώτη συμπύκνωση.

Γενικά η διάστρωση πρέπει να γίνεται με μηχανήματα που εξασφαλίζουν υψηλή προσυμπύκνωση και δεν προκαλούν απόμιξη στο μίγμα.

2.3.4 ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ

Το Κ.Σ. συνήθως συμπτυκνώνεται με λείο βαρύ δονητικό οδοστρωτήρα δύο κυλίνδρων 7-10 τόννων. κατά κανόνα, γίνονται πρώτα δύο στατικές διελεύσεις (χωρίς δόνηση) και μετά αρχίζουν οι διελεύσεις με δόνηση μέχρι να επιτευχθεί η προδιαγεγραμμένη πυκνότητα. Ακολουθούν διελεύσεις οδοστρωτήρων 10 ως 20 τόννων με ελαστικά επίσωτρα. Για την διαμόρφωση της τελικής επιφάνειας είναι αναγκαίο να γίνουν μία ή δύο διελεύσεις οδοστρωτήρα με λείους χαλύβδινους κυλίνδρους για να σβήσουν τα ίχνη από τους προηγούμενους οδοστρωτήρες.

2.3.5 ΑΡΜΟΙ

Η κατασκευή των αρμών είναι το πιο κρίσιμο σημείο στη κατασκευή Κ.Σ. Οι "φρέσκοι αρμοί" (fresh joints) σχηματίζονται όταν οι λωρίδες του οδοστρώματος τοποθετούνται σε χρόνο λιγότερο 45-60 min ανάλογα με τον άνεμο, τη θερμοκρασία την υγρασία.

2.3.6 ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΚΑΙ ΠΡΟΣΤΑΣΙΑ

Η μειωμένη περιεκτικότητα του Κ.Σ. σε νερό καθιστά πολύ σημαντικό το ρόλο της συντήρησης.

Η υγρή συντήρηση έχει χρησιμοποιηθεί στα περισσότερα έργα και είναι η πιο συνηθισμένη σε περιπτώσεις όπου αφήνεται ασκέπαστο. Αυτό γίνεται συνήθως για ένα χρονικό διάστημα 7 ημερών αλλά και μικρότερο εξαρτώμενο πάντα από την ποιότητα του χρησιμοποιούμενου τσιμέντου (P.C. η ταχείας **ακτινιπρήξεως-high early strength**). Η χρήση μεμβρανών συντήρησης ή ασφαλικού γαλακτώματος δεν έχει αποδειχθεί επιτυχημένη μέχρι σήμερα. Θεωρείται κρίσιμο να μην επιβληθούν φορτία στο οδόστρωμα τουλάχιστον 14 ημέρες με εξαίρεση τα βυτιοφόρα που χρησιμοποιούνται για την υγρή συντήρηση. Ιδιαίτερη μέριμνα πρέπει να λαμβάνεται για σκυροδέτηση σε θερμές ή ψυχρές ημέρες ($T < 4,4\text{ }^{\circ}\text{C}$). Επίσης ιδιαίτερη προσοχή χρειάζεται ώστε η επιφάνεια να διατηρείται μόνιμα υγρή ανεξαρτήτως κλιματολογικών συνθηκών.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΑΚΗ ΕΡΕΥΝΑ**1 ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ**

Το Κυλινδρούμενο Σκυρόδεμα έχει χρησιμοποιηθεί περιορισμένα στον Ελλαδικό χώρο κυρίως στην κατασκευή φραγμάτων όπως στο Πουρνάρι και στο φράγμα του Μαυρορέματος[16], ενώ στην οδοστρωσία Κ.Σ δεν έχει χρησιμοποιηθεί ποτέ ως τώρα. Στην έως τώρα εφαρμογή του στο εξωτερικό, το Κ.Σ., έχει φανεί αξιοσημείωτα φθινό. Αυτό οφείλεται σε τρεις σημαντικούς λόγους:

1. Χαμηλό κόστος για διάστρωση, που βρίσκεται κοντά σ' εκείνο μιας σταθεροποιημένης βάσης σαν αποτέλεσμα της χρησιμοποίησης του υπάρχοντος συνηθισμένου εξοπλισμού για ασφατικά οδοστρώματα.
2. Το κόστος της ασφάλτου είναι συγκριτικά υψηλότερο από αυτό του τσιμέντου αφού η ΕΛΛΑΔΑ είναι μια χώρα με ισχυρά ανεπτυγμένη τσιμεντοβιομηχανία.
3. Το ποσοστό νερού είναι περίπου 100 kg λιγότερο από ότι αυτού του συμβατικού σκυροδέματος οδοστρωμάτων, γεγονός το οποίο επιτρέπει τη μείωση της περιεκτικότητας σε τσιμέντο στα 250-300 kg. Με αποτέλεσμα το μίγμα να γίνεται πολύ πιο οικονομικό.
4. Στην αντικατάσταση ενός σημαντικού ποσοστού τσιμέντου με ιπτάμενη τέφρα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στην Ελλάδα όπου η διάδοση των οδοστρωμάτων από συμβατικά δονημένο σκυρόδεμα είναι πολύ μικρή

Προκειμένου λοιπόν να ερευνηθούν τα χαρακτηριστικά και η συμπεριφορά αυτού του νέου, χαμηλού κόστους υλικού επιλέχθηκαν ως υλικά: Τσιμέντο P.C. σε δύο ποιότητες (II 35 και I45), αδρανή ασβεστολιθικά θραυστά λατομείου και ιπτάμενη τέφρα προέλευσης Α.Η.Σ. Πτολεμαΐδας.

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τις μηχανικές του ιδιότητες και τη συμπεριφορά του εξεταζόμενου υλικού κάτω από διάφορες καταπονήσεις καθώς και οι μεταβολές αυτών ανάλογα με τις διαφοροποιήσεις στην σύνθεση του μίγματος και την ηλικία.

Με κύριο κριτήριο το είδος της φόρτισης στην οποία υποβάλλεται ένα οδόστρωμα από σκυρόδεμα επιλέχθηκαν ορισμένες δοκιμές ώστε να εκτιμηθούν οι βασικές μηχανικές του ιδιότητες. Τα οδοστρώματα από σκυρόδεμα επιπονούνται σε κάμψη τόσο από τα φορτία της κυκλοφορίας όσο και από την μεταβολή της θερμοκρασίας καθ' ύψος της διατομής

του οδοστρώματος. Επομένως η αντοχή σε κάμψη είναι εκείνο το μηχανικό χαρακτηριστικό που ενδιαφέρει περισσότερο. Επειδή όμως ή δοκιμή σε κάμψη παρουσιάζει ορισμένες πρακτικές δυσκολίες προκειμένου να, εκτελεστεί (μεγάλο μέγεθος δοκιμίων που δύσκολα παρασκευάζονται συντηρούνται και μεταφέρονται, ειδικές διατάξεις φόρτισης και ειδική μικρή κλίμακα φορτίου) συνήθως τόσο στη μελέτη σύνθεσης όσο και στον έλεγχο ποιότητας κατά την κατασκευή, προτιμούνται άλλες δοκιμές όπως η δοκιμή σε θλίψη και η δοκιμή σε διάρρηξη γι 'αυτό και κρίθηκε απαραίτητο να εκτελεσθούν.

Η εύρεση της αντοχής σε κάμψη, της αντοχής σε θλίψη και της αντοχής σε διάρρηξη, ο καθορισμός των μέτρων ελαστικότητας τόσο στις παραπάνω καταπονήσεις όσο και με μη καταστρεπτικές μεθόδους, ο βαθμός συσχέτισης των χαρακτηριστικών αυτών και η μεταβολή τους σε σχέση με την σύνθεση και την ηλικία αποτελούν το αντικείμενο αυτής της εργασίας

2 ΥΛΙΚΑ

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

2.1 ΤΣΙΜΕΝΤΟ

Χρησιμοποιήθηκε καθαρό τσιμέντο Portland σε δύο ποιότητες Ι45 και ΙΙ35 (ονομασία εμπορίου Π35) και σε δύο ποσοστά 10 και 15% του βάρους των ξηρών υλικών. Χρήση τσιμέντου Ι45 δεν συνίσταται από τον υπάρχοντα ελληνικό κανονισμό, εν τούτοις η χρήση του κρίθηκε σκόπιμη για τους σκοπούς της έρευνας.

2.2 ΑΔΡΑΝΗ

Τα διαθέσιμα υλικά ήταν δύο (2) ειδών θραυστές άμμοι λατομείου καθώς και χαλίκι. Για αυτά πραγματοποιήθηκε η κοκκομετρική τους ανάλυση. Η διαδικασία αυτή έγινε με την βοήθεια της συσκευής που φαίνεται στην φωτογραφία 117 και ο χρόνος κοσκινίσματος του κάθε υλικού στην μηχανή ήταν 5 λεπτά και καθορίστηκε η κοκκομετρική διαβάθμιση τους μετά από κοσκίνισμα με τα κόσκινα. Επιλέχθηκε η άμμος η οποία περιείχε υψηλό ποσοστό παιπάλης λαμβάνοντας υπόψη: ότι η κοκκομετρική διαβάθμιση τον υλικού

πρέπει να βρίσκεται μέσα σε μία ζώνη που καθορίζεται από τις προδιαγραφές πίνακας 1.

Για την επίτευξη ομοιομορφίας διαβάθμισης και μίγματος χρησιμοποιήθηκε ακόμα ένα κλάσμα αδρανών ψηφίδα το οποίο συγκεντρώθηκε μετά από κοσκίνισμα σε κόσκινο 3/8 και Νο 4. Μέγιστος κόκκος αδρανούς ήταν τα 20mm

Ύστερα από διάφορες δοκιμές που παρουσιάζονται η τελική αναλογία που καθορίστηκε είναι:

Άμμος 60%

Χαλίκι 20%

Γαρμπίλι 20%

2.3 ΙΠΤΑΜΕΝΗ ΤΕΦΡΑ

Η προέλευσή της είναι από τον ΑΗΣ Πτολεμαΐδας παραγωγής 4/99. Η χημική σύσταση της τέφρας παρουσιάζεται στον παρακάτω πίνακα.

Σημειώνεται επίσης ότι η ιπτάμενη τέφρα που χρησιμοποιήθηκε δεν είχε υποστεί καμία περαιτέρω κατεργασία ή ομογενοποίηση.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2. ΧΗΜΙΚΗ ΑΝΑΛΥΣΗ ΑΚΑΤΕΡΓΑΣΤΗΣ ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΠΡΟΕΛΕΥΣΗΣ (1) ΜΟΝΑΔΑΣ ΑΗΣ ΠΤΟΛΕΜΑΙΔΑΣ

<u>ΟΞΕΙΔΙΟ</u>	<u>ΠΟΣΟΣΤΟ</u>
SiO ₂ %W/W	31,98
Fe ₂ O ₃ %W/W	7,39
CaO (ΔΙΑΘ.) %W/W	7,21
SO ₃ %W/W	7,58 (LECO) 7,09 (ΣΤΑΘΜ.)
Al ₂ O ₃ %W/W	14,86
MgO %W/W	3,39
CaO %W/W	26,71
ΑΠΩΛΕΙΑ ΠΥΡΩΣΗΣ (L.O.I.) %W/W 2,38	
ΑΔΙΑΛΥΤΟ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑ %W/W 12,96	

2.4 ΝΕΡΟ

Χρησιμοποιήθηκε [ΑΚ18]νερό δικτύου ύδρευσης.

3 ΑΝΑΜΙΓΜΑΤΑ

3.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο καθορισμός του είδους των μιγμάτων είχε σαν σκοπό:

- i. Την εύρεση της αντοχής ενός σκυροδέματος με τυπικές αναλογίες αδρανών για δύο περιεκτικότητες τσιμέντου.
- ii. Την μελέτη της μεταβολής των μηχανικών αντοχών του τυπικού αυτού μίγματος για διάφορες ποιότητες τσιμέντου, διάφορα ποσοστά τέφρας, που αντικαθιστά το τσιμέντο.
- iii. Την συσχέτιση των αντοχών σε θλίψη, σε διάρρηξη και σε εφελκυσμό εκ κάμψης, για τα διάφορα αυτά μίγματα.

Για τον σκοπό αυτό επιλέχθηκε ποσοστό τσιμέντου 10% και 15% του βάρους των αδρανών υλικών. Η ποσότητα αυτή του τσιμέντου μεταβλήθηκε στα επόμενα μίγματα ή αντικαταστάθηκε μερικά με ένα ποσοστό τέφρας,

Για τον έλεγχο των της αντοχής των δοκιμίων και την μεταβολή της με το χρόνο, επιλέχθηκαν οι 7, 28 και 56 ημέρες. Το ανώτερο όριο των 56 ημερών επιλέχθηκε διότι στο χρόνο αναμένεται να έχει συντελεστεί στο μεγαλύτερο ποσοστό η χημική δραστηριότητα που αναπτύσσεται μέσα στο μίγμα λόγω της ποζολανικής αντίδρασης. Τα χρονικά αυτά όρια αρχίζουν ευθύς αμέσως μετά την ανάμιξη του μίγματος.

Παρασκευάσθηκαν μίγματα, με τις συνθέσεις που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

ΠΙΝΑΚΑΣ 3. ΣΥΝΘΕΣΗ ΚΑΤΑΣΚΕΥΑΣΘΕΝΤΩΝ ΜΙΓΜΑΤΩΝ

ΜΙΓΜΑ	ΤΣΙΜΕΝΤΟ		Ι.Τ	ΑΔΡΑΝΗ			ΝΕΡΟ	$\frac{N}{(T+I.T.)}$
	ΠΟΣΟΣΤ Ο	ΤΥΠΟΣ/ ΠΟΙΟΤΗΤ Α		ΓΑΡΜΠΙΛΙ	ΧΑΛΙΚΙ	ΑΜΜΟΣ [ΑΚ19]		
1	15%	I45	-	20%	20%	60%	5,5%	0,422
2	10%	I45	-	20%	20%	60%	5,5%	0,605
3	15%	II35	-	20%	20%	60%	5,5%	0,422
4	10%	II35	-	20%	20%	60%	5,5%	0,605
5	10%	I45	5%	20%	20%	60%	5,5%	0,422

Για πρακτικούς λόγους κυρίως χωρητικότητας του αναμικτήρα αλλά και αδυναμίας κατασκευής του απαιτούμενου αριθμού δοκιμίων σε ένα εύλογο χρονικό διάστημα μετά την παρασκευή του μίγματος, ο συνολικός αριθμός δοκιμίων για κάθε σύνθεση παρασκευάστηκε σε δύο αναμίγματα.

Συνολικά παρασκευάσθηκαν 11 μίγματα.

3.2 ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΑ ΑΝΑΜΙΓΜΑΤΑ

Πριν από την παρασκευή των μιγμάτων της έρευνας παρασκευάστηκε το ακόλουθο δοκιμαστικό μίγμα. Η ανάμιξη έγινε με το χέρι.

Τα ποσοστά συμμετοχής της άμμου, τον γαρμπιλιού και του χαλικιού φαίνονται στον Πίνακα 4

ΠΙΝΑΚΑΣ 4. ΣΥΝΘΕΣΗ ΔΟΚΙΜΑΣΤΙΚΟΥ ΑΝΑΜΙΓΜΑΤΟΣ

ΤΣΙΜΕΝΤΟ	ΠΟΣΟΣΤΟ	ΤΟΥ ΒΑΡΟΥΣ ΤΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ	15%
	ΤΥΠΟΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑ		Ι45
ΑΔΡΑΝΗ	ΧΑΛΙΚΙ	ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΑΝΑΜΙΞΗΣ	20%
	ΨΗΦΙΔΑ		20%
	ΑΜΜΟΣ		60%
ΝΕΡΟ		ΤΟΥ ΒΑΡΟΥΣ ΤΩΝ ΞΗΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ	5,5%

Το μίγμα αυτό κατασκευάσθηκε με σκοπό την μελέτη της διαφοράς που υπάρχει ως προς το επιτυγχανόμενο αποτέλεσμα της συμπίκνωσης χρησιμοποιώντας Ηλεκτρόσφυρα (Τύπος KANGO 950) ή την Δονητική Τράπεζα. καθώς και την εξοικείωση με την διαδικασία παραγωγής μιγμάτων σκυροδέματος και την παρασκευή δοκιμών καθώς και τον τρόπο λειτουργίας του χρησιμοποιούμενου εξοπλισμού.

Η ανάμιξη έγινε με το χέρι.

Από την ποσότητα τον μίγματος κατασκευάσθηκαν 2 δοκίμια κυβικά ακμής 10 cm. Από αυτά τα δυο δοκίμια, το ένα συμπτκνώθηκε με ηλεκτρόσφυρα Kango 950 ενώ [120]τα δεύτερο με την Δονητική Τράπεζα[121] με βάρος πάνω του 22 kg. Παρατηρήθηκε ότι το δοκίμια που συμπτκνώθηκαν με ηλεκτρόσφυρα Kango 950 παρουσίαζαν μία επιφάνεια πολύ πιο κλειστή από αυτή που είχαν τα δοκίμια που είχαν συμπτκνωθεί με την Δονητική Τράπεζα ενώ τα βάρη τους ήταν τα εξής

ΠΙΝΑΚΑΣ 5. ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ ΕΙΔΙΚΑ ΒΑΡΗ

ΔΟΚΙΜΙΟ	A1	A2
ΗΛΙΚΙΑ (ΗΜΕΡΕΣ)	2	2
ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ	ΗΛΕΚΤΡΟΣΦΥΡΑ	ΔΟΝΗΤΙΚΗ ΤΡΑΠΕΖΑ
ΒΑΡΟΣ (kg)	2,49	2,25
ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	24,50538	22,06269

Όπως προκύπτει από τον παραπάνω πίνακα το φαινόμενο ειδικό βάρος αυξάνεται κατά 10% με την χρήση ηλεκτρόσφυρας σε σχέση με την χρήση δονητικής τράπεζας ως μέσο συμπίκνωσης, γεγονός που δικαιολογεί την χρήση της.

3.3 ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ**3.3.1 ΠΡΟΕΡΓΑΣΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ**

Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των δοκιμών εξήχθησαν από τις συσκευασίες τους και απλώθηκαν μέσα σε μεγάλες λαμαρίνες μέσα στο εργαστήριο και αφέθηκαν αρκετές μέρες ώστε πριν από την παρασκευή των δοκιμών να έχουν ξηρανθεί. Η διαδικασία αυτή έγινε επειδή ο τόπος αποθήκευσης των αδρανών ήταν το εξωτερικό περιβάλλον με αποτέλεσμα να περιέχουν μεγάλη υγρασία.

Κατόπιν ακολούθησε η προετοιμασία των μητρών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των δοκιμών. Αφού λύθηκαν οι μήτρες, λαδώθηκαν καλά για να μην κολλήσει το δοκίμιο στα τοιχώματά τους και βιδώθηκαν επιμελώς για να μην ξεβιδωθούν κατά την διαδικασία της συμπύκνωσης.

Η παρασκευή των μιγμάτων πραγματοποιήθηκε σε ένα εργαστηριακό αναμικτήρα που φαίνεται στην φωτογραφία 2. [122]

3.3.2 ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΜΙΓΜΑΤΩΝ

Παρασκευάστηκαν συνολικά έντεκα (11) αναμίγματα.

Η παραγωγή των μιγμάτων έγινε με την εξής διαδικασία για την οποία έγινε μεγάλη προσπάθεια να είναι τυποποιημένη ώστε τα αποτελέσματα μεταξύ αναμιγμάτων με την ίδια σύνθεση να είναι συγκρίσιμα:

1. Αρχικά ζυγίζονταν τα υλικά στις ποσότητες τις οποίες είχαν καθορισθεί.
2. Τα τοιχώματα του αναμικτήρα διαβρέχονταν με ένα βρεγμένο πανί ώστε να μην απορροφάται νερό και μεταβληθεί το ποσοστό νερού στο μίγμα.
3. Ρίψη των αδρανών στον αναμικτήρα της αμμου, της ψηφίδας και τέλος του χαλικιού.
4. Ανάμιξη για 90 sec ενώ παράλληλα προσθέτονταν το 1/3 της ποσότητας του νερού
5. Το μίγμα σκεπάζονταν με πλαστικές μεμβράνες ώστε να εμποδίζεται η εξάτμιση του νερού και αφηνόταν περίπου 20 min ,κατάλληλο χρονικό διάστημα ώστε να ολοκληρωθεί η απορρόφηση νερού από τα αδρανή.
6. Ρίψη του τσιμέντου και της ιπτάμενης τέφρας και το μίγμα 60 sec.

7. Προσθήκη της υπόλοιπης ποσότητας νερού και ανάμιξη για 90 sec όλων των υλικών. Ο αναμικτήρας ήταν γεμισμένος στα $\frac{3}{4}$ περίπου της χωρητικότητας του.

3.4 ΠΡΙΣΜΑΤΑ 10/10/50 (CM)

Από τα μίγματα 1-11 κατασκευάσθηκαν για το καθένα 3 πρισματικά δοκίμια.

Τα τρία αυτά δοκίμια παρήχθησαν σε μήτρες διαστάσεων 10X10X50 (cm). Η συμπίκνωση τους έγινε, με την βοήθεια της Ηλεκτρόσφυρας σε 2 στρώσεις για 90 sec. Για να είναι επίπεδη η επιφάνεια των δοκιμίων και για να επιτευχθεί σωστή συμπίκνωση της επάνω στρώσης η πλάκα που έφερε η ηλεκτρόσφυρα δεν ήταν επαρκής (10x5 cm) και για τον σκοπό αυτό το δοκίμιο υποβλήθηκε σε περαιτέρω συμπίκνωση με μία πλάκα διαστάσεων (10x50 cm). Η πλάκα αυτή τοποθετήθηκε στην επιφάνεια του ήδη συμπτυκνωμένου δοκιμίου και στο πάνω μέρος της εφαρμόστηκε η δονητική πλάκα της ηλεκτρόσφυρας και ετίθετο σε κίνηση για μερικά δευτερόλεπτα.

Η παραμονή του δοκιμίου μέσα στην μήτρα διαρκούσε 24-48 ώρες και μετά από αυτό το διάστημα ακολουθούσε η διαδικασία του αφαίρεσης των τύπων από τις μήτρες. Οι μήτρες έπρεπε να ήταν καλά λαδωμένες ώστε τα δοκίμια να ξεκαλουπώνονται εύκολα και να μην καταστρέφονται (π.χ. ρηγματώσεις, απώλεια υλικού).

Τα πρισματικά αυτά δοκίμια φυλάχτηκαν στο θάλαμο συντήρησης υπό συνθήκες περιβάλλοντος σταθερές με θερμοκρασία ± 20 °C και >95% σχετική υγρασία.

3.5 ΚΥΛΙΝΔΡΟΙ 10/20 (CM)

Ανάλογη διαδικασία ακολουθήθηκε και για την κατεργασία των κυλινδρικών δοκιμίων 10/20cm.

Για τα δοκίμια αυτά ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία: Συμπυκνώθηκαν τα δοκίμια σε 2 στρώσεις, και για την συμπίκνωση της κάθε στρώσης χρησιμοποιήθηκε η ηλεκτρόσφυρα για 60 sec.

Τα δοκίμια παρέμειναν μέσα στις μήτρες για 24-48 ώρες.

Στην διάρκεια των ωρών αυτών ήταν σκεπασμένα με πλαστικά φύλλα και πάνω από αυτά είχαν απλωθεί βρεγμένες λινάτσες ώστε τα δοκίμια να βρίσκονται σε κορεσμένο περιβάλλον. Η πρακτική αυτή εφαρμόστηκε και για τα πρισματικά δοκίμια. Μετά το

πέρας των είκοσι τεσσάρων ωρών τα δοκίμια αποχωρίστηκαν από τις μήτρες και τοποθετήθηκαν στο θάλαμο συντήρησης (στον οποίο επικρατούσαν σταθερές συνθήκες περιβάλλοντος) και παρέμειναν εκεί μέχρι την ημέρα της θραύσης των. Για την σειρά 1 λόγω εσφαλμένης εκτίμησης της απαιτούμενης ποσότητας

4 ΔΟΚΙΜΕΣ

4.1 ΘΛΙΨΗ

4.1.1 ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΨΑΘΥΡΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΕ ΘΛΙΠΤΙΚΑ ΦΟΡΤΙΑ

Τα ψαθυρά υλικά συμπεριφέρονται εντελώς διαφορετικά από τα όλκιμα σε θλιπτικές καταπονήσεις. Ισχύει ότι η κλίση του ευθύγραμμου τμήματος είναι ίδια τόσο για τον εφελκυσμό όσο και για τη θλίψη και επομένως ισχύει

$$E^E = E^{\Theta}$$

Το διάγραμμα $\sigma=f(\epsilon)$ δεν έχει καθόλου ευθύγραμμο τμήμα ή τούτο περιορίζεται πολύ κοντά στην αρχή των αξόνων. Ο νόμος ($\sigma=E\epsilon$) του Hooke επομένως ισχύει για πολύ μικρό τμήμα αυτού του διαγράμματος. Ο Bach πρότεινε τη σχέση:

$$\sigma^n = E\epsilon$$

όπου n είναι σταθερά του υλικού. Με τη σχέση αυτή προσεγγίζεται καλύτερα το διάγραμμα $\sigma = f(\epsilon)$ ψαθυρών υλικών. Η σχέση αυτή δίνει όμως μια καμπύλη που διαφέρει από την πραγματική, ιδιαίτερα για μικρές τιμές των τάσεων, οπότε εμφανίζεται ευθύγραμμο τμήμα στην καμπύλη. Καλύτερη προσέγγιση παρέχει η σχέση

$$E\epsilon = \sigma + \alpha\sigma^2 + \beta\sigma^3 + \dots$$

όπου α , β ,.. σταθερές του υλικού. Στη σχέση αυτή για μικρές τιμές των τάσεων μηδενίζονται όλοι οι όροι ανωτέρου βαθμού και παίρνει τη μορφή:

$$\sigma = E\epsilon$$

η οποία ικανοποιεί το νόμο του Hooke.

στα ψαθυρά υλικά επέρχεται αστοχία (δημιουργία ρωγμής και θραύση) αμέσως μετά την είσοδο του υλικού στην περιοχή διαρροής έτσι ώστε να καθίσταται αδύνατη η διάκριση

ανάμεσα στο όριο διαρροής και στο όριο θραύσης. Για τα ψαθυρά υλικά θεωρούμε λοιπόν κατά κανόνα ότι τα δύο αυτά όρια ταυτίζονται.

Η αστοχία κατά τη δοκιμή της θλίψης οφείλεται σε διατμητικές και εφελκυστικές δυνάμεις που εισάγονται στο δοκίμιο από τη θλιπτική δύναμη στην πραγματικότητα ανακριβής καθ' ότι το σκυροδέμα δεν αστοχεί -σε καθαρή θλίψη.

Οι διατμητικές δυνάμεις οφείλονται στη διαφορά μεταξύ της πλευρικής διαστολής των χαλύβδινων πλακών μεταξύ των οποίων θλίβεται το δοκίμιο και του σκυροδέματος. Η πλευρική διαστολή εξαρτάται από τις ελαστικές ιδιότητες του υλικού και είναι μεγαλύτερη για υλικά που έχουν μικρότερο μέτρο ελαστικότητας E και μεγαλύτερο λόγο του Poisson ν , δηλαδή μεγαλύτερο λόγο ν/E .

Οι χαλύβδινες πλάκες έχουν πλευρική διαστολή μικρότερη από αυτή του σκυροδέματος. Αυτή η μικρότερη πλευρική διαστολή εμποδίζει τη διαστολή του σκυροδέματος, οι ρωγμές οι παράλληλες με τη διεύθυνση τον φορτίου εμποδίζονται να επεκταθούν και το δοκίμιο αστοχεί υπό μεγαλύτερο φορτίο. Ο βαθμός της παρεμπόδισης της πλευρικής διαστολής του σκυροδέματος εξαρτάται από την τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ των χαλύβδινων πλακών και τον δοκιμίου.

Η υψηλή τριβή αυξάνει την παρεμπόδιση της πλευρικής διαστολής και δίνει για το λόγο αυτό μεγαλύτερη αντοχή. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές όταν η τριβή μειώνεται στο ελάχιστο με την χρήση για παράδειγμα κάποιου λιπαντικού. Στην περίπτωση αυτή παρατηρούνται μεγάλες εγκάρσιες παραμορφώσεις και το δοκίμιο αστοχεί υπό χαμηλότερο φορτίο. Ακόμη η μορφή της θραύσης αλλάζει και χαρακτηρίζεται από ρωγμές παράλληλες με τη διεύθυνση του φορτίου (Σχήμα.). Η αντοχή που προκύπτει με τέτοιου είδους διατάξεις πλησιάζει τη μονοαξονική αντοχή σε θλίψη στο βαθμό που επιτυγχάνεται με την πειραματική διάταξη η εξάλειψη της τριβής.

Στην συνηθισμένη περίπτωση όπου οι χαλύβδινες πλάκες περιορίζουν την πλευρική παραμόρφωση, η θραύση παίρνει την μορφή δύο πυραμίδων οι βάσεις των οποίων συμπίπτουν με την κορυφή και την βάση τον κύβου και οι κορυφές τους δείχνουν προς το εσωτερικό του.

Μια από τις δυσκολίες κατά τη θραύση δοκιμίων σκυροδέματος για τον προσδιορισμό της αντοχής του σε θλίψη, είναι ότι η τιμή του φορτίου θραύσης εξαρτάται από το σχήμα του δοκιμίου. Όπως αναφέρθηκε, η τριβή μεταξύ του δοκιμίων και των πλακών της διάταξης θραύσης παρεμποδίζει την εγκάρσια παραμόρφωση στα άκρα του δοκιμίου και προκαλεί αύξηση της αντοχής του.

Το μέγεθος της διατμητικής τάσης που εισάγεται με την αλληλεπίδραση μεταξύ δοκιμίου σκυροδέματος και χαλύβδινων πλακών της διάταξης θλίψης, μειώνεται και η πλευρική

διαστολή αυξάνεται με την αύξηση της απόστασης από τις επιφάνειες φόρτισης τον δοκιμίου. Το φαινόμενο γίνεται αμελητέο σε μια απόσταση 1,7-2 φορές τη μέγιστη πλευρική διάσταση του δοκιμίου. Δηλαδή, εάν ένα κυλινδρικό δοκίμιο είναι μακρύτερο από 1,7 διαμέτρους του, ένα τμήμα του είναι ελεύθερο από πλευρική παρεμπόδιση, και πράγματι δοκίμια μεγαλύτερου μήκους παρουσιάζουν μια περισσότερο ομοιόμορφη αν και μικρότερη αντοχή από αυτά των οποίων το μήκος είναι μικρότερο από περίπου 1,7 διαμέτρους. Στις ΗΠΑ, τον Καναδά και άλλες χώρες, το τυποποιημένο δοκίμιο είναι ένας κύλινδρος με λόγο ύψους προς διάμετρο ίσο με 2, κατασκευασμένο σύμφωνα με τον κανονισμό ASTM C192-69. Στη Γαλλία χρησιμοποιείται ένα πρίσμα με λόγο ύψους , προς πλάτος ίσο με 5, αλλά σε πολλές άλλες χώρες έχουν τυποποιηθεί δοκίμια σε σχήμα κύβου.

Η αντοχή ενός κυλίνδρου με λόγο ύψους προς διάμετρο ίσο με δεν επηρεάζεται από το φαινόμενο παρεμπόδισης της πλευρικής διαστολής και για το λόγο αυτό θα είναι μικρότερη από αυτή ενός παρόμοιου κύβου, δηλαδή ενός κύβου με ακμή ίση με τη διάμετρο κυλίνδρου. Καθώς ο βαθμός της παρεμπόδισης της πλευρικής διαστολής μειώνεται με την αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος, η διαφορά μεταξύ αντοχών κυλίνδρου και κύβου θα μειώνεται επίσης.

Τα αποτελέσματα της εργασίας του Evans για κύβους ακμής ιντσών και κυλίνδρων 6 X 12 ιντσών δείχνουν ότι ο λόγος της αντοχής κυλίνδρου προς αντοχή κύβου κυμαίνεται από 0,75 έως 0,95. Ο κανονισμός Bs1881, 1970 αμελεί την επίδραση της αντοχής του σκυροδέματος στο λόγο αυτό και προτείνει μία τιμή ίση με 0,80 για γενική χρήση. Ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης είναι το μέγεθος των δοκιμών που χρησιμοποιούνται. Στο Σχήμα απεικονίζονται οι αντοχές σε θλίψη κυλίνδρων διαφόρων μεγεθών. Παρατηρείται μία σημαντική αύξηση της θλιπτικής αντοχής με τη μείωση του μεγέθους των δοκιμών κάτω από ένα όριο. Η εξήγηση του φαινομένου σχετίζεται κυρίως με την πιθανότητα εμφάνισης ενός ασθενούς στοιχείου. Όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος τον σκυροδέματος που υποβάλλεται σε μια ορισμένη ένταση τόσο πιθανότερο είναι να περιέχει αυτός ένα στοιχείο μιας ακραίας μικρής αντοχής. Άλλοι λόγοι για τους οποίους τα μικρότερα δοκίμια παρουσιάζουν μεγαλύτερες αντοχές είναι η ενδεχόμενη καλύτερη συμπίκνωση και καλύτερη ενυδάτωση που οδηγούν σ' ένα σκυρόδεμα καλύτερης ποιότητας και κατά συνέπεια μεγαλύτερης αντοχής.

Στην εργασία αυτή οι δοκιμές σε θλίψη έγιναν σε "ισοδύναμους κύβους" ακμής 10cm και μεταβλητού ύψους. Κατά συνέπεια οι τιμές που προκύπτουν για την αντοχή σε θλίψη είναι υψηλότερες από τις περισσότερο διαδεδομένες τιμές αντοχής κυβικών δοκιμών ακμής 20cm.

Στα ψαθυρά υλικά παρατηρείται σχεδόν πάντα διατμητική θραύση, δηλαδή θραύση υπό κλίση περίπου 45° ($45^\circ \pm \omega$) ως προς τον άξονα επιβολής του φορτίου (κατά το επίπεδο εφαρμογής της μέγιστης διατμητικής τάσης), επειδή ακριβώς τα ψαθυρά υλικά παρουσιάζουν μειωμένη αντοχή σε διατμητικές τάσεις σε σύγκριση με τις ορθές θλιπτικές τάσεις (οι οποίες τείνουν περισσότερο να κλείσουν" παρά να επεκτείνουν τις περιοχές ανωμαλιών και τις μικρορωγμές στο εσωτερικό του υλικού, απ' όπου και εκκινεί η θραύση). Σχετικά ομογενές υλικό, όπως ο χυτοσίδηρος, σύνθετο "κοκκώδες" υλικό με αντοχή των "κόκκων" υψηλότερη απ' ότι της μήτρας, όπως το σκυρόδεμα, υλικό με συννοριακές επιφάνειες μειωμένης αντοχής στο εσωτερικό του, όπως το ξύλο).

Η εσωτερική δομή του υλικού καθορίζει σε μεγάλο βαθμό τους "πιθανούς δρόμους" που θα ακολουθήσουν οι επιφάνειες της θραύσης, με δεδομένη πάντα την κλίση των δρόμων αυτών ως προς τον άξονα φόρτισης.

Η απόκλιση της κλίσης της επιφάνειας θραύσης (επίπεδα ολίσθησης) ως προς τον άξονα επιβολής του φορτίου από τη "θεωρητική" τιμή των 45° , όπως ακριβώς και το "βαρελοειδές" σχήμα που παίρνει το παραμορφωμένο όλκιμο κυλινδρικό δοκίμιο, προκύπτουν από το γεγονός ότι στη δοκιμή της Θλίψης είναι πρακτικά αδύνατο να διασφαλιστεί η απόλυτος μονοαξονική καταπόνηση του δοκιμίου. Οι δυνάμεις τριβής που αναπτύσσονται στις επιφάνειες του δοκιμίου που εφάπτονται με τις αρπάγες δημιουργούν στην πραγματικότητα μια τριαξονική εντατική κατάσταση. Αποτέλεσμα αυτού του γεγονότος είναι να επηρεάζουν σημαντικά οι διαστάσεις του δοκιμίου (δηλαδή στην πραγματικότητα όχι μόνον ο λόγος ύψους/εγκάρσιας διατομής, αλλά και οι απόλυτες τιμές των διαστάσεων τα αποτελέσματα των δοκιμών Θλίψης. Είναι λοιπόν εξαιρετικά κρίσιμο να ακολουθούνται οι προδιαγραφές κατά την εκτέλεση δοκιμών Θλίψης, ώστε να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα διαφορετικών δοκιμών. Οι κανονισμοί καθορίζουν, για τους λόγους που πιο πάνω αναπτύξαμε, όχι μόνον το σχήμα των δοκιμών και το λόγο ύψους/εγκάρσιας διατομής, αλλά και τις ακριβείς διαστάσεις των δοκιμών. Σύμφωνα με τους αμερικάνικους κανονισμούς (ASTM) τα δοκίμια είναι κυλινδρικά, με διαστάσεις για το σκυρόδεμα $h/d = 30\text{cm}/15\text{cm}$. Σύμφωνα με τους γερμανικούς κανονισμούς (DIN) τα δοκίμια είναι κυβικά (για το σκυρόδεμα η ακμή του κύβου είναι 20cm). Είναι προφανές ότι, το κατά DIN Θλιπτικό όριο Θραύσης ενός υλικού είναι κατά κανόνα διαφορετικό από το κατά ASTM Θλιπτικό όριο Θραύσης του ίδιου υλικού. Αφού έχει παρατηρηθεί ότι η αντοχή σε θλίψη ενός κυλινδρικού δοκιμίου είναι υψηλότερη από των αντοχή ενός κυβικού ή ενός πρισματικού δοκιμίου.

Γενικά και ανεξαρτήτως των κανονισμών, έχει παρατηρηθεί ότι στην περίπτωση των κυλινδρικών δοκιμίων η αντοχή (σθ) μεγαλώνει όσο το δοκίμιο μικραίνει υπό σταθερό λόγο h/d . Επίσης η αντοχή ενός δοκιμίου μεγαλώνει όσο ο λόγος h/d μικραίνει (βλ. Πίνακες I και II.).

Όπως φαίνεται από τον πίνακα I, ο συντελεστής διόρθωσης για κύλινδρο με λόγο $h/d = 1.00$ είναι 0.69. Αυτό σημαίνει ότι η αντοχή ενός τέτοιου δοκιμίου είναι περίπου 12% μεγαλύτερη από την αντοχή ενός κανονικού δοκιμίου ($h/d = 2.00$). Επίσης, από τον πίνακα II προκύπτει ότι η αντοχή σε θλίψη κύβων ακμής 30 cm είναι μικρότερη κατά 10% περίπου από της αντοχής κύβων με ακμή 20 cm.

4.1.2 ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΟΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ

Για τις δοκιμές θλίψης χρησιμοποιούνται ως επί το πλείστον οι εξής κανονισμοί:

Για τη δοκιμή οικοδομικού σκυροδέματος και οπλισμένου σκυροδέματος:

- DIN 1048
- ASTM C 39-72
- ASTM C-192, 1964.
- ΣΚ303, ΣΚ304

Για τις προδιαγραφές των μηχανών θλίψης:

DIN 51233

Προβλέπεται στο μέλλον ότι οι κανονισμοί CEN θα αντικαταστήσουν τα εθνικά πρότυπα

4.1.3 ΜΗΧΑΝΗ ΔΟΚΙΜΩΝ

Για τις δοκιμές θλίψης χρησιμοποιήθηκε η μηχανή (πρέσες) που διαθέτει το εργαστήριο της Ένωσης Τσιμεντοβιομηχανιών, που είναι κατασκευής Γερμανίας και χρησιμοποιήθηκε επίσης για την δοκιμή της διάρρηξης. Οι πλάκες ανάμεσα στις οποίες συνθλίβονται τα δοκίμια πρέπει να είναι επίπεδες και να έχουν κατασκευασθεί από υλικό σκληρότερο σε σχέση με το υλικό των δοκιμαζόμενων δοκιμίων, ώστε να αποκλείεται η πλαστική παραμόρφωσή τους

Η τοποθέτηση των δοκιμών πρέπει να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να εξασφαλίζεται απολύτως αξονική φόρτιση. Η αντοχή σε θλίψη ενός ψαθυρού υλικού επηρεάζεται εξαιρετικά από τη μορφή και τις διαστάσεις του δοκιμίου. Σημαντικό ρόλο για την εξάρτηση της αντοχής από τις διαστάσεις, παίζει το γεγονός ότι κατά την επιβολή των θλιπτικών φορτίων υπεισέρχονται πάντα και δυνάμεις τριβής, στις επιφάνειες επαφής των πλακών φόρτισης με το δοκίμιο.

4.1.4 ΣΚΟΠΟΣ – ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

4.1.4.1.1 ΔΟΚΙΜΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΒΟΥ

Προκειμένου να ευρεθεί η αντοχή σε θλίψη των διαφόρων μιγμάτων σκυροδέματος εκτελέσθηκε η δοκιμή των "ισοδύναμων κύβων" σύμφωνα με τον κανονισμό BS 1881, χρησιμοποιώντας τα δυο σπασμένα άκρα των πρισμάτων που είχαν προηγουμένως υποβληθεί σε δοκιμή κάμψης για τα δοκίμια 1-29 και στο ένα για τα δοκίμια A-I. Αυτά τα άκρα που δεν καταστρέφονται κατά τη διαδικασία της δοκιμής κάμψης φορτίζονται σε θλίψη μεταξύ δυο βοηθητικών χαλύβδινων πλακών σχήματος τετραγώνου, πλευράς 100mm κατάλληλες σε σχέση με το πλάτος του πρίσματος. Αν και υποστηρίζεται ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν διαφέρουν από αυτά που δίνει μια δοκιμή με κανονικό κύβο, λόγω της συμβολής στην αντοχή του σκυροδέματος που βρίσκεται έξω από τις βοηθητικές πλάκες, άλλοι ερευνητές κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει διαφορά. Οι Φωτογραφίες 1 και 2 δείχνουν έναν "ισοδύναμο κύβο" στη μηχανή θλίψης που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές, πριν από τη δοκιμή. Φαίνονται οι ειδικές χαλύβδινες πλάκες διαστάσεων 100 X 100 X 30mm που χρησιμοποιήθηκαν. Η μηχανή θλίψης που χρησιμοποιήθηκε είχε δυνατότητα επιβολής φορτίου έως 600KN

Η ταχύτητα φόρτισης ρυθμίστηκε στα 2KN/S σύμφωνα με τα όρια του κανονισμού ASTM, τα δοκίμια εισάγονταν στη μηχανή θλίψης και ο χειριστής εφάρμοζε το φορτίο. Στη συνέχεια αφηνόταν το φορτίο να αυξάνεται με την ορισμένη σταθερή ταχύτητα φόρτισης μέχρις ότου το δοκίμιο να θραυστεί. Σαν φορτίο θραύσης λαμβάνονταν η μέγιστη τιμή του θλιπτικού φορτίου. Σημειώνεται η εμφάνιση της χαρακτηριστικής θραύσης υπό μορφή διπλής κόλυρης πυραμίδας που οφείλεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ του δοκιμίου του σκυροδέματος και των χαλύβδινων πλακών μεταξύ των οποίων αυτό θλίβεται.

Τελικά υπολογίστηκε το μέγεθος αντοχή σε θλίψη σύμφωνα με τη σχέση

$$f_{\text{cube}} = \frac{P_{\text{max}}}{S}$$

όπου :P το θλιπτικό φορτίο που εφαρμόζεται στον κύβο σε Newton.

S το εμβαδόν της πλευράς του κύβου σε m²

4.1.4.1.2 ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Προκειμένου να ευρεθεί η αντοχή καθώς και το μέτρο ελαστικότητας κατά την καταπόνηση σε θλίψη των υπό μελέτη μιγμάτων σκυροδέματος εκτελέσθηκε η δοκιμή της ανεμπόδιστης θλίψης, χρησιμοποιώντας το ένα σπασμένο άκρο των πρισμάτων που είχαν προηγουμένως υποβληθεί σε δοκιμή κάμψης για τα δοκίμια Α-Ι.

4.1.4.1.2.1 Προετοιμασία δοκιμών

Τα δοκίμια προερχόμενα από την δοκιμή κάμψης είχαν την μία τους επιφάνεια λεία (λόγω καλουπιού) ενώ η άλλη ήταν τραχιά και είχε, συνήθως, μια ελαφριά κλίση (επιφάνεια θραύσης). Τα δοκίμια Δ,Ε,Ζ κόπηκαν με την βοήθεια μηχανής κοπής σκυροδέματος έτσι ώστε η επιφάνεια τους να είναι επίπεδη και για να έχουν το επιθυμητό μήκος (20 cm), ενώ τα δοκίμια Α, Β, Γ, Η, Θ, Ι, λόγω αδυναμίας κοπής τους στην μηχανή κοπής σκυροδέματος, δεν είχαν σταθερό μήκος και η επιφάνεια τους δεν ήταν επίπεδη. Γι' αυτό απαραίτητη ήταν η διαμόρφωση της επιφάνειας των δοκιμών ώστε να είναι λεία, επίπεδη και παράλληλη με την άλλη επιφάνεια του δοκιμίου.

Η διαμόρφωση αυτή έγινε με την βοήθεια σιδηρόστοκου. Μια ποσότητα του υλικού αυτού απλώνονταν πάνω στην επιφάνεια θραύσης του δοκιμίου (καπέλωμα) ώστε η επιφάνεια να γίνει επίπεδη. Έπειτα τοποθετούνταν στη μηχανή θλίψης και επιβάλλονταν ένα μικρό φορτίο (περίπου 3 kN), όσο ο σιδηρόστοκος ήταν ακόμη σχετικά πλαστικός ώστε να είναι πλήρης η επαφή του δοκιμίου με την πλάκα φορτίσεως

Στις δύο απέναντι λείες πλευρές του δοκιμίου τοποθετήθηκαν δύο (2) μηκυσιόμετρα για την ταυτόχρονη παρακολούθηση της παραμόρφωσης του δοκιμίου κατά την εφαρμογή του θλιπτικού φορτίου ώστε να είναι εφικτός ο προσδιορισμός του μέτρου ελαστικότητας του υλικού σε θλίψη.

Για το σκοπό αυτό ορίστηκε το αρχικό μήκος μέτρησης $L_0 = 10$ cm. Η απομόνωση αυτού του αρχικού μήκους επιτυγχάνεται με την προσαρμογή δύο δακτυλίων (σε κάθε πλευρά) στις δύο απέναντι λείες πλευρές του δοκιμίου σε ίση απόσταση από κάθε βάση του δοκιμίου και κάθε ακμή, έτσι ώστε το μήκος L_0 να βρίσκεται στο μέσο του δοκιμίου.

Η μεταβολή του αρχικού μήκους L_0 του δοκιμίου, ΔL , λόγω της επιβολής του φορτίου

μετρίεται με τη βοήθεια των δύο μηκυνσιομέτρων τα οποία έχουν την δυνατότητα να μετρούν διαφορές μήκους με μεγάλη ακρίβεια. Η χρήση δύο μηκυνσιομέτρων τοποθετημένων στις δύο απέναντι πλευρές, (για τη μέτρηση της μεταβολής της απόστασης ανάμεσα στους δακτυλίους) και η εξαγωγή του μέσου όρου των ενδείξεων καθίσταται αναγκαία για να εξομαλυνθούν οι τυχόν εκκεντρες φορτίσεις, ή τα σφάλματα στην τοποθέτηση δακτυλίων.

Οι ενδείξεις των μηκυνσιομέτρων καθώς οι ενδείξεις του φορτίου καταγράφονταν ηλεκτρονικά με την βοήθεια ειδικού εξοπλισμού.

4.1.4.1.2.2 Διαδικασία δοκιμής

- Αρχικά το δοκίμιο φορτίζονταν με ένα φορτίο 50 kN το οποίο εφάρμοζε ο χειριστής της μηχανής με το χέρι με, όσο το δυνατόν σταθερή ταχύτητα.
- Στη συνέχεια έγιναν κάποιες επαναληπτικές φορτίσεις με μέγιστο φορτίο τα 50 kN με σκοπό την επαλήθευση των αποτελεσμάτων έως ότου οι ενδείξεις των μηκυνσιομέτρων να σταθεροποιηθούν.
- Σε κάποιες δοκιμές έγινε και περιστροφή του δοκιμίου ώστε να επαληθευτεί η ορθότητα της φόρτισης. Κυρίως στην περίπτωση όπου οι ενδείξεις των μηκυνσιομέτρων παρουσίαζαν μεγάλες διαφορές.
- Στο τέλος το δοκίμιο φορτίζονταν έως την θραύση του.

4.2 ΔΙΑΡΡΗΞΗ

Με την δοκιμή διάρρηξης η αντιδιαμετρικής θλίψεως (splitting tensile) σε κυλινδρικά δοκίμια σκυροδέματος, προσδιορίζεται η αντοχή θραύσεως σε εφελκυσμό από διάρρηξη του σκυροδέματος.

4.2.1 ΣΧΟΛΙΑ ΠΑΝΩ ΣΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΣΕ ΔΙΑΡΡΗΞΗ

Με την δοκιμή σε διάρρηξη το σκυρόδεμα υποβάλλεται σε εφελκυσμό, έμμεσα, με την επιβολή ενός θλιπτικού φορτίου.

Η μέθοδος συνίσταται στη επιβολή ενός θλιπτικού φορτίου κατά μήκος δυο αντιδιαμετρικών γενέτειρων ενός κυλίνδρου. Τότε ένα στοιχείο πάνω στην κατακόρυφη διάμετρο υποβάλλεται σε μια κατακόρυφη θλιπτική τάση και σε μια οριζόντια εφελκυστική τάση το μέγεθος της οποίας κατά τη στιγμή της αστοχίας θεωρείται σαν η εφελκυστική

αντοχή. Στην άμεση γειτονιά των δύο γενετειρών κατά τις οποίες εφαρμόζεται μαζί το φορτίο αναπτύσσονται οριζόντιες θλιπτικές τάσεις που με τις κατακόρυφες θλιπτικές τάσεις ανάλογου μεγέθους δημιουργούν ένα πεδίο διαξονικής θλίψης με αποτέλεσμα να εμποδίζεται η αστοχία σε θλίψη. Όμως μια σχεδόν σταθερή εφελκυστική τάση αναπτύσσεται κατά τα τρία τέταρτα περίπου του ύψους του κατακόρυφου επιπέδου που ορίζεται από τις δύο γενέτειρες κατά τις οποίες φορτίζεται το δοκίμιο.

Η δοκιμή της διάρρηξης είναι εύκολο να πραγματοποιηθεί, δεν απαιτεί εξοπλισμό πέρα από αυτόν που χρησιμοποιείται στη δοκιμή της θλίψης εκτός ενδεχομένως του εξαρτήματος που εξασφαλίζει την σωστή τοποθέτηση του δοκιμίου, και το σημαντικότερο δίνει τιμές της αντοχής αντιπροσωπευτικές της αντοχής σε μονοαξονικό εφελκυσμό με λόγο του πρώτου προς το δεύτερο περίπου ίσο με τρία. Για το λόγο αυτό η εφελκυστική αντοχή πρέπει να είναι κατά τι μικρότερη από αυτή που θα έδινε μια δοκιμή μονοαξονικού εφελκυσμού.

Υπάρχουν ωστόσο σοβαρές επιφυλάξεις για το αν υπάρχει κάποια απλή συσχέτιση μεταξύ της αντοχής σε διάρρηξη κυλίνδρου και της αντοχής σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Σύμφωνα με τους Hannant, Buckley & Croft η πολύπλοκη κατανομή της θλιπτικής έντασης στην άμεση γειτονιά των δύο γενετειρών κατά τις οποίες εφαρμόζεται το φορτίο στη δοκιμή της διάρρηξης, μπορεί να έχει μια αξιοσημείωτη επίδραση στο φορτίο αστοχίας του κυλίνδρου και κατά συνέπεια και στην έμμεση αντοχή σε εφελκυσμό του υλικού όπως εκτιμάται από τη συνήθη ελαστική ανάλυση. Η κατανομή της έντασης όπως περιγράφηκε παραπάνω, επηρεάζει σκυροδέματα με διάφορα μεγέθη μέγιστου κόκκου αδρανούς σε διαφορετικό βαθμό και κατά συνέπεια δεν μπορεί να υπάρξει μια απλή συσχέτιση μεταξύ της αντοχής σε διάρρηξη κυλίνδρου και της μονοαξονικής εφελκυστικής αντοχής για ένα ευρύ φάσμα σκυροδεμάτων.

4.2.2 ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΟΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ

Η δοκιμή αυτή περιγράφεται αναλυτικά στην προδιαγραφή ASTM C 496-71.

4.2.3 ΜΗΧΑΝΗ ΔΟΚΙΜΩΝ - ΔΟΚΙΜΙΑ.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν στην δοκιμή αυτή είναι κυλινδρικά διαστάσεων 10×20 cm.

Ως μηχανή δοκιμής μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε μηχανή θλίψεως, αρκεί να παρέχει τα απαιτούμενα θλιπτικά φορτία για τη θραύση των δοκιμίων του σκυροδέματος σε θλίψη.

4.2.4 ΣΚΟΠΟΣ - ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

Τα δοκίμια εξάγονταν από το θάλαμο συντήρησης. Στη συνέχεια γινόταν ο προσδιορισμός του φαινομένου ειδικού τους βάρους ζυγίζοντας τα. Στην φωτογραφία II. φαίνεται ο ζυγός που χρησιμοποιήθηκε.

Πριν από την δοκιμή προσδιορίζονται το μήκος, ως η μέση τιμή δύο μετρήσεων μήκους κοντά στο αξονικό επίπεδο επιβολής του φορτίου.

Η τοποθέτηση των δοκιμίων στη μηχανή φόρτισης γίνεται έτσι ώστε το επιβαλλόμενο φορτίο να ασκείται σε δύο αντιδιαμετρικές γενέτειρες του δοκιμίου και κατά το ίδιο αξονικό επίπεδο. Δεν χρησιμοποιήθηκαν τα ειδικά παρεμβλήματα που προβλέπονται από τα διάφορα πρότυπα

Το φορτίο επιβλήθηκε ομαλά, συνεχώς και με μια σταθερή ταχύτητα με τιμή 0,80 kN/sec. Η τιμή αυτή επιλέχθηκε ώστε η διάρκεια της δοκιμής να είναι ανάλογη με αυτή τις δοκιμής σε θλίψη ισοδύναμου κύβου.

Στο τέλος της δοκιμής καταγράφεται το μέγιστο φορτίο θραύσεως και στη συνέχεια προσδιορίζεται η τάση θραύσεως από εφελκυσμό λόγω αντιδιαμετρικής θλίψης, από τη

σχέση:-
$$\sigma_{\epsilon} = \frac{2 \times P_{\theta}}{\pi \times L \times d}$$

Όπου L είναι το μήκος του δοκιμίου, d είναι η διάμετρος του και P_{θ} το φορτίο θραύσεως.

4.3 ΚΑΜΨΗ

Η κρίσιμη ένταση σε μια πλάκα από σκυρόδεμα αναπτύσσεται λόγω κάμψης, αφενός μεν υπό τα φορτία των τροχών των διερχόμενων οχημάτων, αφετέρου δε από την διαφορά θερμοκρασίας καθ' ύψος της διατομής.

Για το λόγο αυτό η αντοχή σε κάμψη του σκυροδέματος έχει υιοθετηθεί σαν μια αντιπροσωπευτική του ιδιότητα για την μελέτη έργων οδοποιίας από σκυρόδεμα.

Στην δοκιμή αυτή ένα πρίσμα διαστάσεων 10 X 10 X 50 cm, στηρίζεται σε ένα άνοιγμα 40,2 cm και υπόκειται σε κάμψη υπό φορτία που εφαρμόζονται στα τρίτα του ανοίγματος. Προκειμένου να εκτελεσθεί η δοκιμή τα πρισματικά δοκίμια εξάγονταν από το θάλαμο συντήρησης. Στη συνέχεια γινόταν ο προσδιορισμός του φαινομένου ειδικού τους βάρους ζυγίζοντας τα.

Ακολουθούσε η τοποθέτηση του δοκιμίου στο ειδικό εξάρτημα της μηχανής. Ο χειριστής εφαρμόζε επιμελώς το φορτίο και στη συνέχεια το δοκίμιο φορτιζόταν μέχρι θραύσης.

4.3.1 ΣΧΟΛΙΑ ΠΑΝΩ ΣΤΗ ΔΟΚΙΜΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ

Ο απευθείας προσδιορισμός της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος συναντά ορισμένες πρακτικές δυσκολίες όπως η αποφυγή της έκκεντρης επιβολής του φορτίου, και η συγκέντρωση τάσεων στις περιοχές όπου οι αρπάγες εφαρμόζουν το φορτίο στο δοκίμιο. Η δοκιμή σε κάμψη είναι μία έμμεση μέθοδος προσδιορισμού της εφελκυστικής αντοχής.

Κάνοντας χρήση της παραδοχής ότι η ένταση είναι ευθέως ανάλογη της απόστασης από τον ουδέτερο άξονα του πρίσματος (ότι δηλαδή η κατανομή των τάσεων είναι τριγωνική), υπολογίζεται η μέγιστη εφελκυστική τάση που αναπτύσσεται στην κατώτατη ίνα του πρίσματος.

Για τους επόμενους σημαντικούς λόγους η αντοχή σε εφελκυσμό λόγω κάμψης προκύπτει μεγαλύτερη από την πραγματική εφελκυστική αντοχή του υλικού.

- Υπάρχει σημαντική απόκλιση μεταξύ της υποτιθέμενης σαν γραμμικής και της πραγματικής κατανομής των τάσεων στην περιοχή της θραύσης
- Επιπλέον στην δοκιμή κάμψης η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στην ακρότατη ίνα εμφανίζεται αυξημένη σε σύγκριση με την αντοχή σε μονοαξονικό εφελκυσμό διότι η διάδοση κάποιας ρωγμής παρεμποδίζεται από το λιγότερο εντεινόμενο υλικό που βρίσκεται στην περιοχή του ουδέτερου άξονα πράγμα που δεν συμβαίνει στην περίπτωση της μονοαξονικής δοκιμής. Ακόμη αξιοσημείωτη είναι η πιθανότητα της κατανομής ασθενέστερων σημείων του υλικού μέσα στην υψηλά εντεινόμενη ζώνη
- Στον καθαρό εφελκυσμό το ασθενέστερο σημείο, οπουδήποτε και αν βρίσκεται αυτό θα σηματοδοτήσει την έναρξη της διαδικασίας της αστοχίας, καθώς όλα τα σημεία του δοκιμίου υπόκεινται στην ίδια μέγιστη τάση. Αντίθετα, στην κάμψη μόνο τα σημεία εκείνα που βρίσκονται μέσα ή κοντά στην ακραία ίνα μπορεί να

είναι κρίσιμα και καθώς τα σημεία αυτά αντιπροσωπεύουν μόνο ένα μικρό ποσοστό του όγκου του δοκιμίου, η πιθανότητα να είναι το ασθενέστερο σημείο συγχρόνως αυτό που εντείνεται περισσότερο είναι μικρότερη από ότι στην δοκιμή καθαρού εφελκυσμού.

Ο τελευταίος από τους παραπάνω λόγους εξηγεί επίσης γιατί η εφελκυστική αντοχή λόγω κάμψης προκύπτει σημαντικά υψηλότερη κατά την δοκιμή της κάμψης ενός σημείου απ' ότι κατά την κάμψη δύο σημείων (περίπου κατά 22%). Κατά την κάμψη ενός σημείου αναπτύσσεται μία μέγιστη ροπή στο μέσο του ανοίγματος της δοκού και υπό αυτές τις συνθήκες θα επέλθει θραύση όταν η τάση στο μέσον ή στην άμεση γειτονιά του μέσου φθάσει την εφελκυστική αντοχή του υλικού. Κατά την κάμψη δύο σημείων αναπτύσσεται η ίδια μέγιστη ροπή μεταξύ των φορτίων και η θραύση θα εμφανιστεί στο ασθενέστερο τμήμα του μέρους της δοκού που υπόκειται στη μέγιστη καμπτική ροπή. Είναι πολύ πιθανό ότι το μέρος αυτό, που συνήθως είναι το ένα τρίτο του ανοίγματος, θα περιέχει τμήματα που είναι ασθενέστερα από την μεσαία διατομή ή την άμεση γειτονιά της. Όμως η πραγματική χρησιμοποιήσιμη αντοχή σε ένα οδόστρωμα του οποίου παρεμποδίζεται η παραμόρφωση ενδέχεται να είναι σημαντικά μειωμένη λόγω εσωτερικών τάσεων που αναπτύσσονται στη μάζα του λόγω συστολής ξήρανσης ή ψύξης του. Η υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής του υλικού από τις εσωτερικές τάσεις έχει σαν αποτέλεσμα τη ρηγμάτωση του.

5 ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Το σκυρόδεμα θεωρείται ελαστικό υλικό. Αυτό σημαίνει ότι η παραμόρφωση θα πρέπει να παρουσιάζεται και να αναιρείται αμέσως με την εφαρμογή και αφαίρεση του φορτίου αντίστοιχα.

Η κλίση του διαγράμματος τάσεων - παραμορφώσεων ενός υλικού εκφράζει το μέτρο ελαστικότητας. Από αυτό παρατηρείται ότι ο νόμος του Young δεν ισχύει. Γι' αυτό ορίζονται τρία μέτρα ελαστικότητας:

- το αρχικό επαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας ($E = \tan \alpha_1$)
- το τέμνον μέτρο ελαστικότητας ($E_T = \tan \alpha_2$).
- το επαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας ($E_z = \tan \alpha_3$)

Ως μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος λαμβάνεται το τέμνον μέτρο ελαστικότητας που αντιστοιχεί στο 30% περίπου του φορτίου.

Το μέγεθος των παραμορφώσεων καθώς και η απόκλιση από την ευθυγραμμία του διαγράμματος τάσεων - παραμορφώσεων εξαρτώνται ως έναν βαθμό από την ταχύτητα φόρτισης. Όταν το φορτίο εφαρμόζεται πολύ γρήγορα $<0,01 \text{ sec}$ οι καταγραφόμενες παραμορφώσεις μειώνονται ενώ το διάγραμμα τείνει να γίνει ευθεία. Μια αύξηση του χρόνου φόρτισης από 5 sec έως 2 min αυξάνει την παραμόρφωση κατά 15%, όμως ανάμεσα στην κλίμακα 2 min έως 10 min που είναι ο συνήθης χρόνος διάρκειας των δοκιμών η αύξηση της παραμόρφωσης και κατά συνέπεια η καμπύλωση του διαγράμματος τάσεων παραμορφώσεων είναι πολύ μικρή

Το αρχικό εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας είναι περίπου ίσο με το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας

Το ποσοστό υγρασίας επηρεάζει το μέτρο ελαστικότητας: ένα υγρό δοκίμιο έχει ένα μέτρο ελαστικότητας κατά 3-4 GPa μεγαλύτερο από ένα ξηρό, ενώ η αντοχές τους διαφέρουν με τον αντίθετο τρόπο.

Το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος επηρεάζεται από τα χαρακτηριστικά των χρησιμοποιούμενων αδρανών. Έχοντας υπόψη την ετεροτροπία του υλικού, συμπεραίνεται ότι η επιρροή των αδρανών οφείλεται στο μέτρο ελαστικότητας τους και το ογκομετρικό ποσοστό. Έτσι όσο υψηλότερο είναι το μέτρο ελαστικότητας του αδρανούς τόσο μεγαλύτερο είναι το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος και σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το μέτρο ελαστικότητας των αδρανών είναι μεγαλύτερο από αυτό του τσιμεντοπολτού προκύπτει ότι όσο μεγαλύτερο είναι το ποσοστό των αδρανών στο μίγμα τόσο υψηλότερο είναι το μέτρο ελαστικότητας.

Η σχέση μεταξύ μέτρου ελαστικότητας και αντοχής επηρεάζεται επίσης από την ηλικία.

Το μέτρο ελαστικότητας αυξάνει γρηγορότερα από ότι η αντοχή

Το πρότυπο BS8110:Part2:1985 συσχετίζει την αντοχή του σκυροδέματος σε σχέση με την αντοχή σε θλίψη κυβικών δοκιμίων ενώ το πρότυπο ACI 318-889 καθορίζει εξισώσεις μεταξύ του στατικού μέτρου ελαστικότητας και την αντοχή σε θλίψη κυλινδρικών δοκιμίων.

Η σχέση στατικού και δυναμικού μέτρου ελαστικότητας δεν είναι σταθερή αφού μια αύξηση στην αντοχή έχει αποτέλεσμα αύξηση του λόγου αφού η καμπύλωση του διαγράμματος ελαχιστοποιείται

5.1 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

5.1.1 ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΟΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ

Για την μέτρηση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας έχουν θεσπιστεί τα εξής πρότυπα:

- BS1881:209:1990
- ASTM C 215-91.

5.1.2 ΣΚΟΠΟΣ – ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

Το πρότυπο BS1881 υποδεικνύει ότι οι μετρήσεις του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας γίνονται χρησιμοποιώντας δοκίμια όμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται στην δοκιμή κάμψης.

Κατά την εκτέλεση του πειράματος το δοκίμιο συσφίγγεται στο μέσο του και ένας ηλεκτρομαγνητικός πομπός τοποθετείται στο ένα μέτωπο του δοκιμίου και ένας δέκτης στο απέναντι.

Ο πομπός συνδέεται με έναν ταλαντωτή μεταβλητής συχνότητας με κλίμακα 1000-15000 Hz. Διαμήκη κύματα μεταδιδόμενα διαμέσου του δοκιμίου λαμβάνονται από τον δέκτη, ενισχύονται και το εύρος της ταλάντωσης φαίνεται στην οθόνη του ειδικού μετρητή.

Η συχνότητα του κύματος μεταβάλλεται βαθμιαία έως ότου επιτευχθεί ο συντονισμός για την ιδιοσυχνότητα του δοκιμίου. Όταν οι δυο συχνότητες συμπίπτουν τότε το εύρος της ταλάντωσης γίνεται μέγιστο.

Το ηλεκτροδυναμικό μέτρο ελαστικότητας προκύπτει από την σχέση:

$$E_d = 4 \times n^2 \times L^2 \times \rho \times 10^{-15}$$

όπου E_d το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας σε Gra

n η ιδιοσυχνότητα του υλικού σε Hz

L : το μήκος του δοκιμίου σε mm

ρ : η πυκνότητα σε kg/m³

5.1 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

5.1.1 ΕΦΑΡΜΟΖΟΜΕΝΟΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ

Για την μέτρηση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας έχουν θεσπιστεί τα εξής πρότυπα:

- BS1881:209:1990
- ASTM C 215-91.

5.1.2 ΣΚΟΠΟΣ – ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ ΕΚΤΕΛΕΣΗ ΤΗΣ ΔΟΚΙΜΗΣ

Το πρότυπο BS1881 υποδεικνύει ότι οι μετρήσεις του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας γίνονται χρησιμοποιώντας δοκίμια όμοια με αυτά που χρησιμοποιούνται στην δοκιμή κάμψης.

Κατά την εκτέλεση του πειράματος το δοκίμιο συσφίγγεται στο μέσο του και ένας ηλεκτρομαγνητικός πομπός τοποθετείται στο ένα μέτωπο του δοκιμίου και ένας δέκτης στο απέναντι.

Ο πομπός συνδέεται με έναν ταλαντωτή μεταβλητής συχνότητας με κλίμακα 1000-15000 Hz. Διαμήκη κύματα μεταδιδόμενα διαμέσου του δοκιμίου λαμβάνονται από τον δέκτη, ενισχύονται και το εύρος της ταλάντωσης φαίνεται στην οθόνη του ειδικού μετρητή.

Η συχνότητα του κύματος μεταβάλλεται βαθμιαία έως ότου επιτευχθεί ο συντονισμός για την ιδιοσυχνότητα του δοκιμίου. Όταν οι δυο συχνότητες συμπίπτουν τότε το εύρος της ταλάντωσης γίνεται μέγιστο.

Το ηλεκτροδυναμικό μέτρο ελαστικότητας προκύπτει από την σχέση:

$$E_d = 4 \times n^2 \times L^2 \times \rho \times 10^{-15}$$

όπου E_d το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας σε Gra

n η ιδιοσυχνότητα του υλικού σε Hz

L : το μήκος του δοκιμίου σε mm

ρ : η πυκνότητα σε kg/m³

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

1 ΘΛΙΨΗ

1.1 ΔΟΚΙΜΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΒΟΥ

Τα αποτελέσματα της δοκιμής σε ισοδύναμο κύβου για κάθε ανάμιγμα φαίνονται στους Πίνακες 1-10. (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Α)

Στον πίνακα 1 φαίνονται οι μέσες αντοχές ανάλογα με την σύνθεση και την ηλικία του μίγματος. Οι τιμές της θλίψης αναφέρονται στην θραύση των δοκιμίων για κάθε σειρά.

Στους πίνακες 2-9 αναγράφονται το φορτίο και η μέγιστη τάση για κάθε θραύση που πραγματοποιήθηκε, ο μέσος όρος των τάσεων για κάθε δοκίμιο και η επαναληψιμότητα για τις τιμές που προέρχονταν από την θραύση του ίδιου δοκιμίου, ο μέσος όρος των αντοχών σε θλίψη των δοκιμίων της ίδιας σειράς, η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής μεταβλητότητας των τιμών της αντοχής καθώς και τα αντίστοιχα μεγέθη μεταξύ σειρών με την ίδια σύνθεση και ηλικία.

1.2 ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Στον πίνακα 11 φαίνονται τα αποτελέσματα της δοκιμής σε ανεμπόδιστη θλίψη. Συγκεκριμένα αναγράφονται το φορτίο και η τάση θραύσεως για κάθε δοκίμιο. Ακόμα παρατίθενται η μέση αντοχή για τα δοκίμια κάθε σειράς καθώς και η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής μεταβλητότητας.

Με τα δεδομένα που καταγράφηκαν κατά την δοκιμή κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων για κάθε δοκίμιο (Α-Ι) για την τελική του φόρτιση έως την θραύση. Ειδικότερα κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα που δείχνουν την τάση και την παραμόρφωση έως το μέγιστο καταγεγραμμένο από την πειραματική διάταξη φορτίο. Ακόμα κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα τάσης και παραμόρφωσης έως το μέγιστο φορτίο βασιζόμενοι στο γεγονός ότι η ταχύτητα επιβολής του φορτίου ήταν σταθερή

καθώς και ο χρόνος λήψης των μετρήσεων. Έτσι υπολογίστηκε το φορτίο για κάθε καταγεγραμμένη τιμή παραμόρφωσης θεωρώντας ότι αυξάνεται με σταθερό βήμα.

Από τα διαγράμματα αυτά υπολογίστηκε το μέτρο ελαστικότητας (τέμνον) του δοκιμίου. Αυτό έγινε συσχετίζοντας γραμμικά τα ζεύγη των τιμών τάσεων και παραμορφώσεων μέχρι το 30% του φορτίου. Επειδή τα διαγράμματα παρουσιάζουν μια ανώμαλη μορφή για χαμηλές τιμές του φορτίου σε κάποιες περιπτώσεις η παραμόρφωση παρουσίαζε διαφορετικό πρόσημο από την τάση κατασκευάστηκε διάγραμμα στο οποίο παραλείπεται το αρχικό αυτό τμήμα. Υπολογίστηκαν και γι' αυτήν την περίπτωση οι τιμές του μέτρου ελαστικότητας ακολουθώντας την ίδια διαδικασία.

2 ΚΑΜΨΗ

Τα αποτελέσματα της δοκιμής κάμψης φαίνονται στους Πίνακες 18-24. (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ)
Στον πίνακα 18 φαίνονται οι μέσες αντοχές ανάλογα με την σύνθεση και την ηλικία του μίγματος. Στους πίνακες 18-24 αναγράφονται το φορτίο και η μέγιστη τάση για κάθε θραύση που πραγματοποιήθηκε, ο μέσος όρος των τάσεων για κάθε δοκίμιο και η επαναληψιμότητα για τις τιμές που προέρχονταν από την θραύση του ίδιου δοκιμίου, ο μέσος όρος των αντοχών σε θλίψη των δοκιμίων της ίδιας σειράς, η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής μεταβλητότητας των τιμών της αντοχής καθώς και η μεταξύ σειρών με την ίδια σύνθεση και ηλικία.

Με τα δεδομένα που καταγράφηκαν κατά την δοκιμή κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα τάσεων βέλους κάμψης για κάθε δοκίμιο (1-24) για την τελική του φόρτιση έως την θραύση. Από τα διαγράμματα αυτά υπολογίστηκε το μέτρο ελαστικότητας (τέμνον) του δοκιμίου. Αυτό έγινε συσχετίζοντας γραμμικά τα ζεύγη των τιμών τάσεων και παραμορφώσεων μέχρι το 30% του φορτίου..

3 ΔΙΑΡΡΗΞΗ

Τα αποτελέσματα της δοκιμής διάρρηξης φαίνονται στους Πίνακες 12-17 (ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ)
Στον πίνακα 12 φαίνονται οι μέσες αντοχές ανάλογα με την σύνθεση και την ηλικία του μίγματος. Στους πίνακες 13-17 αναγράφονται το φορτίο και η μέγιστη τάση για κάθε θραύση που πραγματοποιήθηκε, ο μέσος όρος των αντοχών για κάθε δοκίμιο και η επαναληψιμότητα για τις τιμές που προέρχονταν από την θραύση του ίδιου δοκιμίου, ο μέσος όρος των αντοχών σε θλίψη των δοκιμίων της ίδιας σειράς, η τυπική απόκλιση και

ο συντελεστής μεταβλητότητας των τιμών της αντοχής καθώς και η μεταξύ σειρών με την ίδια σύνθεση και ηλικία. Παρατίθενται και οι τιμές για τα δοκίμια τα οποία παρουσίασαν ανωμαλίες στην θραύση τους αλλά δεν συμπεριλήφθηκαν στο υπολογισμό των μέσων τιμών, τυπικών αποκλίσεων και συντελεστών μεταβλητότητας.

Στους πίνακες 24-28 παρτίθενται οι τιμές των μέτρων ελαστικότητας όπως αυτές προέκυψαν από τις δοκιμές.

ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ**1 ΑΝΤΟΧΕΣ-ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΙΑ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ****1.1 ΘΛΙΨΗ****1.1.1 ΔΟΚΙΜΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΒΟΥ**

Το εύρος τιμών στις τιμές των αντοχών που προκύπτουν από την δοκιμή ισοδύναμου κύβου κυμαίνεται μεταξύ 27,23 MPa (II35-10%, 7 ημέρες) και 51,31 MPa (I45-15%, 28 ημέρες).

Η επαναληψιμότητα των τιμών των αποτελεσμάτων που προήλθαν από θραύση τμημάτων του ίδιου δοκιμίου κυμαίνεται μεταξύ από 0% σε 7,84%, δηλαδή είναι μικρότερες του 9% που είναι η γενική απαίτηση των προτύπων.

Ο συντελεστής μεταβλητότητας των αποτελεσμάτων μεταξύ δοκιμών με την ίδια σύνθεση έχει μέγιστη τιμή τα 10,60% για το μίγμα 9 (II35-10%, I.T.-5% ημέρες) ενώ οι υπόλοιπες τιμές δεν υπερβαίνουν το 6,50% ακόμα και για μεταξύ διαφορετικών αναμιγμάτων αποτελέσματα, γεγονός που κρίνεται ικανοποιητικό (ο συντελεστής μεταβλητότητας γενικά δεν πρέπει να και δίνει την δυνατότητα εξαγωγής ασφαλών αποτελεσμάτων).

Γενικά τα αποτελέσματα της δοκιμής, όπως αναμενότανε, κυμαίνονται σε υψηλά επίπεδα και έχουν μικρές αποκλίσεις. Το γεγονός αυτό αποδίδεται κυρίως στην φύση της δοκιμής. Όπως έχει αναφερθεί στη δοκιμή ισοδύναμου κύβου η θραύση είναι διατμητική και δεν οφείλεται στις εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται στην μάζα του δοκιμίου όπως στις δοκιμές σε κάμψη, ανεμπόδιστη θλίψη και διάρρηξη. Γι' αυτό και η τυχόν ατέλειες στην συμπίκνωση καθώς και οι μικρορωγμές μέσα στην μάζα του δοκιμίου δεν έχουν σημαντικά μεγάλη επίδραση.

Γενικά οι τιμές σε θλίψη που προκύπτουν από την δοκιμή είναι αρκετά υψηλές και πληρούν τις απαιτήσεις των προτύπων όσον αφορά τις τιμές στις 28 ημέρες εκτός από μίγμα II35-10%

1.1.2 ΔΟΚΙΜΗ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

Ο συντελεστής μεταβλητότητας των αποτελεσμάτων μεταξύ δοκιμών με την ίδια σύνθεση έχει μέγιστη τιμή τα 20,76 % για το μίγμα 10 (I45-10%, I.T.-5%) όπως και στην δοκιμή ισοδύναμου κύβου οπότε μπορεί κανείς να καταλήξει στο συμπέρασμα ότι η διαφορά στα αποτελέσματα για τη σειρά αυτή οφείλεται κυρίως σε ανωμαλίες στην Παρασκευή και συντήρηση των δοκιμών γενικά και όχι σφάλματα που οφείλονται στις ατέλειες της φόρτισης. Και οι υπόλοιπες τιμές του συντελεστή μεταβλητότητας, όμως είναι αρκετά υψηλές.

Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζουν επίσης και τα διαγράμματα τάσεων παραμορφώσεων. Χαρακτηριστικό τους σημείο είναι η μεγάλη απόκλιση μεταξύ των παραμορφώσεων που καταγράφηκαν από τα δύο μυκηνσιομέτρα, καθώς και η υστέρηση που υπάρχει μεταξύ τους, παρ' όλα αυτά ο μέσος όρος δεν παρουσιάζει μεγάλες μεταβολές.

Οι αποκλίσεις αυτές μπορεί να αποδοθεί σε δύο κυρίως λόγους:

- Σε ατέλειες τις πειραματικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για την μέτρηση των παραμορφώσεων με αποτέλεσμα να παρουσιάζονται σφάλματα στις μετρήσεις. Η ηλεκτρονικός θόρυβος στα μυκηνσιομέτρα.
- Για να είναι η επιφάνεια στην οποία εξασκούνταν το φορτίο επίπεδη χρησιμοποιήθηκε ο σιδηρόστοκος. Το στρώμα του σιδηρόστοκου δεν είχε σταθερό πάχος λόγω της κεκλιμένης επιφάνειας των δοκιμών. Είναι λοιπόν, πιθανόν η παραμόρφωση του να μην ήταν ίση στις δύο πλευρές του δοκιμίου με αποτέλεσμα η φόρτιση του δοκιμίου να μην είναι πλέον αξονική. Το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος του Poisson καθώς και η αντοχή του σιδηρόστοκου δεν είναι γνωστά και γι' αυτό χρειάζεται περαιτέρω διερεύνηση της επίδρασης του στα αποτελέσματα.

Γενικά τα αποτελέσματα της δοκιμής, παρουσιάζουν σχετικά μεγάλες αποκλίσεις. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το μικρό αριθμό δοκιμών καθιστά τα εξαγόμενα συμπεράσματα λιγότερο αξιόπιστα από ότι αυτά που προκύπτουν από τις υπόλοιπες δοκιμές.

Όσον αφορά την μέγιστη παραμόρφωση αυτή κυμαίνεται μεταξύ $1,5 - 2,5 \times 10^{-3}$ σε διάστημα δηλαδή αρκετά μεγάλο. Αυτό συμβαίνει γιατί η θραύση του υλικού είναι απότομη (ψαθυρή), αφού η ρηγμάτωση εξαπλώνεται ακαριαία, ενώ οι μετρήσεις

λαμβάνονται ανά χρονικά διαστήματα 0,5 sec. Έτσι η παραμόρφωση θραύσεως εξαρτάται άμεσα από την στιγμή της μέτρησης γι' αυτό και παρουσιάζονται τόσο μεγάλες διακυμάνσεις. Αυτό φαίνεται και από τα διαγράμματα τα οποία παρουσιάζουν ανώμαλη μορφή κατά την θραύση του δοκιμίου. Γι' αυτό και δεν μπορεί να εξαχθεί κανένα συμπέρασμα με ασφάλεια όσον αφορά την μέγιστη παραμόρφωση.

Στο διάγραμμα τάσεων παραμορφώσεων του δοκιμίου Β στο οποίο παρατηρείται μια ασυνέχεια. Αυτή πιθανόν να οφείλεται σε κάποιο σφάλμα καταγραφής των μετρήσεων.

Σημείο προβληματισμού είναι ακόμα το ότι η μέση αντοχή του μίγματος Ι45-10%, Ι.Τ.-5% παρουσιάζει μεγαλύτερη αντοχή από το μίγμα Ι45-15% στις 7 ημέρες. Προφανώς η απόκλιση αυτή οφείλεται στις αποκλίσεις και την μεγάλη διασπορά στα αποτελέσματα της δοκιμής.

1.2 ΔΙΑΡΡΗΞΗ

Το εύρος τιμών στις τιμές των αντοχών που προκύπτουν από την δοκιμή σε διάρρηξη κυμαίνεται μεταξύ 2,28 MPa (ΙΙ35-10%, 7 ημέρες) και 3,91 MPa (Ι45-15%, 28 ημέρες).

Η μεταβλητότητα των αποτελεσμάτων μεταξύ δοκιμών με την ίδια σύνθεση έχει μέγιστη τιμή τα 17,58% για το μίγμα 10 (Ι45-10%, Ι.Τ.-5%, 28 ημέρες) ενώ οι υπόλοιπες τιμές κυμαίνονται γύρω στο 10%. Γενικά τα αποτελέσματα της δοκιμής, παρουσιάζουν μεγάλες αποκλίσεις. Το γεγονός αυτό σε συνδυασμό με το μικρό αριθμό δοκιμών δεν επιτρέπει να εξαχθούν συμπεράσματα με ακρίβεια και σιγουριά

Κατά την δοκιμή σε διάρρηξη πολλά δοκίμια παρουσίασαν πολύ χαμηλό φορτίο θραύσεως σε σχέση με αυτά των υπόλοιπων σειρών. Το φαινόμενο αυτό ήταν εύκολο να εξηγηθεί εξετάζοντας την επιφάνεια θραύσεως των δοκιμών. Ανάμεσα στις δύο στρώσεις της συμπίκνωσης σχηματίζεται μία ζώνη η οποία έχει μεγάλο ποσοστό κενών. Προφανώς η ζώνη αυτή, λόγω κακής συμπίκνωσης, και από εκεί ξεκινά η θραύση του δοκιμίου σε τάση πολύ μικρότερη από αυτή της αντοχής του δοκιμίου.

1.3 ΚΑΜΨΗ

Το εύρος τιμών στις τιμές των αντοχών που προκύπτουν από την δοκιμή κυμαίνεται μεταξύ 3,61 MPa (ΙΙ35-10%, 7 ημέρες) και 5,59 MPa (Ι45-15%, 28 ημέρες).

Ο συντελεστής μεταβλητότητας των αποτελεσμάτων μεταξύ δοκιμών με την ίδια σύνθεση έχει μέγιστη τιμή τα 9,42 % για το μίγμα 10 (I45-10%, I.T.-5%, 28 ημέρες),

Γενικά τα αποτελέσματα της δοκιμής, όπως αναμενότανε, κυμαίνονται σε υψηλά επίπεδα και έχουν μικρές αποκλίσεις.

Τα διαγράμματα τάσεων βέλους κάμψης έχουν γενικά ομαλή μορφή.

Ο τρόπος που μεταβάλλεται η μέση τάση και το βέλος συμφωνεί απόλυτα με την παραδοχή ότι το σκυρόδεμα είναι μη γραμμικά ελαστικό υλικό, αν και κατά το πρώτο τμήμα του υπάρχει μια ελαφριά καμπύλωση η οποία δίνει σε ορισμένα διαγράμματα την μορφή σιγμοειδούς καμπύλης. Η καμπύλωση αυτή μπορεί να αποδοθεί σε ατέλειες της πειραματικής διάταξης με την οποία έγινε η μέτρηση των επιμηκύνσεων, όπως ακόμα και το αντίθετο πρόσημο της παραμόρφωσης το οποίο παρατηρείται στη αρχή του διαγράμματος. Ακόμα η κυματοειδής μορφή του διαγράμματος πιθανόν να οφείλεται στον ηλεκτρικό θόρυβο των μυκηνοσιόμετρων ή στους κραδασμούς της μηχανής.

ΕΠΙΡΡΟΗ ΠΑΡΑΜΕΤΡΩΝ

1 ΑΝΑΛΟΓΙΕΣ ΣΥΝΘΕΣΕΙΣ – ΗΛΙΚΙΑ

Όπως προκύπτει από τα διαγράμματα 1-4 παρουσιάζεται αύξηση όλων των ειδών της αντοχής σε σχέση με την ηλικία. Ο ρυθμός αύξησης είναι σταθερός για τον ίδιο τύπο αντοχής.

Το μίγμα το οποίο περιείχε ιπτάμενη τέφρα παρουσιάζει μειωμένη αντοχή σε διάρρηξη. Αντίθετα στις δοκιμές σε κάμψη και θλίψη παρουσιάζει αντοχές στην ηλικία των 56 ημερών αντίστοιχες με αυτές που παρουσιάζει το μίγμα που περιείχε τσιμέντο τύπου Ι45 και περιεκτικότητα σε τσιμέντο 15%.

Γενικά, με χρησιμοποίηση τσιμέντου Ι45 εύκολα μπορεί να καλύψει κανείς τις απαιτήσεις τις προδιαγραφής, ενώ με τον τύπο ΙΙ35 απαιτείται τουλάχιστον 15% ποσοστό τσιμέντου για να επιτευχθεί η ελάχιστη αντοχή σε διάρρηξη των 3,3 MPa που προβλέπουν οι προδιαγραφές.

Η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας σε κάμψη και σε μονοαξονική θλίψη σε σχέση με την ηλικία φαίνονται στα διαγράμματα 14 και 15, αντίστοιχα. Παρατηρείται αύξηση του μέτρου ελαστικότητας με την ηλικία. Το μίγμα με σύνθεση Ι45-10%, Ι.Τ.-5% παρουσιάζει αύξηση του μέτρου ελαστικότητας υψηλότερη από ότι αναμενόταν.

2 ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΑΝΤΟΧΩΝ ΚΑΙ ΜΕΤΡΩΝ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

2.1 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ- ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΔΙΑΡΡΗΞΗ

Στο διάγραμμα 5 φαίνεται η συσχέτιση μεταξύ αντοχής σε κάμψη και αντοχής σε διάρρηξη.

Η συσχέτιση αυτή είναι μέσα στο εύρος τιμών που παρουσιάζει το [1[AK24]].

2.2 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ- ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ (ΔΟΚΙΜΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΒΟΥ)

Στο διάγραμμα 6 φαίνεται η συσχέτιση μεταξύ αντοχής σε κάμψη και αντοχής σε θλίψη. Η συσχέτιση αυτή είναι μέσα στη συσχέτιση που παρουσιάζει το [2[AK25]] στην περίπτωση θραυστών αδρανών.

2.3 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ - ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ

Στο διάγραμμα 7 φαίνεται η συσχέτιση αντοχής σε μονοαξονική θλίψη με την κάμψη. Η σχέση που προκύπτει δεν είναι αρκετά αξιόπιστη και απαιτείται εμπλουτισμός της με περισσότερα δοκίμια.

2.4 ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΔΙΑΡΡΗΞΗ – ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ (ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΒΟΥ)

Η συσχέτιση φαίνεται στο διάγραμμα 8. Σε σύγκριση με το [2] οι τιμές που προέκυψαν από τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν βρίσκονται προς την κάτω πλευρά του ορίου που προβλέπεται από την έρευνα αυτή.

2.5 ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΚΑΜΨΗ - ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ

Στο διάγραμμα 9 φαίνεται η συσχέτιση αντοχής και μέτρου ελαστικότητας σε κάμψη. Αν δεν ληφθούν υπόψη οι τιμές των δοκιμών Θ, Η, Α, τα οποία παρουσιάζουν υψηλό μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με την αντοχή, υπάρχει υπόνοια ότι η σχέση μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση

$$E_b = 4,4792 \times f_b + 17,33$$

Δυστυχώς δεν βρέθηκε αντίστοιχη βιβλιογραφία για να γίνει επιβεβαίωση των αποτελεσμάτων.

2.6 ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ - ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ

Στο διάγραμμα 10 φαίνεται η συσχέτιση της αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας σε μονοαξονική θλίψη. Οι τιμές είναι μέσα στις προβλεπόμενες από το [3[AK26]] που αναφέρονται σε δοκίμια συμπυκνωμένα με ηλεκτρόσφυρα.

2.7 Μ. Ε. ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ –ΔΥΝΑΜΙΚΟ Μ. ΕΛ.

Στο διάγραμμα 11 φαίνεται η σχέση του μέτρου ελαστικότητας σε μονοαξονική θλίψη με το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας. Στο σχήμα [AK27] συγκρίνονται οι τιμές αυτές με τις τιμές άλλων ερευνών από όπου φαίνεται ότι είναι εντός των ορίων που προβλέπονται από τις τιμές της έρευνας αυτής. Σε αυτό έχει προστεθεί και η σχέση η οποία προβλέπει το πρότυπο BS 8110 η οποία είναι:

$$E_c = 1,25 \times E_d - 19$$

όπου E τα μέτρα ελαστικότητας σε GPa.

Η εξίσωση που προκύπτει από την εφαρμογή γραμμικής παλινδρόμησης στα αποτελέσματα των δοκιμών, φαίνεται επίσης στο διάγραμμα 11 από όπου προκύπτει ότι η διαφορά είναι σημαντική.

2.8 Μ. Ε. ΣΕ ΚΑΜΨΗ –ΔΥΝΑΜΙΚΟ Μ. ΕΛ.

Στο διάγραμμα 12 φαίνεται η συσχέτιση δυναμικού μέτρου ελαστικότητας και μέτρου ελαστικότητας σε κάμψη. Οι τιμές των δοκιμών Θ, Η, Α, τα οποία παρουσιάζουν υψηλό μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με το δυναμικό, υπάρχει υπόνοια ότι δεν είναι ακριβείς. Δυστυχώς δεν υπάρχουν στοιχεία από την βιβλιογραφία για να γίνει σύγκριση των αποτελεσμάτων.

2.9 Μ. Ε. ΣΕ ΚΑΜΨΗ – Μ. Ε. ΣΕ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ

Στο διάγραμμα 13 φαίνεται η συσχέτιση του μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη και του μέτρου ελαστικότητας σε κάμψη. Από το διάγραμμα προκύπτει το συμπέρασμα ότι τα

μέτρα ελαστικότητας είναι περίπου ίσες, εκτός από τις τιμές των δοκιμίων Θ, Η, Α, τα οποία παρουσιάζουν υψηλό μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη σε σχέση με αυτό σε μονοαξονική θλίψη, για τα οποία υπάρχει υπόνοια ότι δεν είναι ακριβείς.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την εργαστηριακή εργασία που εκτελέστηκε θα μπορούσαμε να καταλήξουμε στα εξής γενικά συμπεράσματα:

- Το Κυλινδρούμενο Σκυρόδεμα σαν υλικό δεν διαφέρει ως προς τις μηχανικές του ιδιότητες σημαντικά από το συμβατικό δονούμενο σκυρόδεμα.
- Οι σχέσεις διαφόρων ειδών αντοχής μεταξύ τους και αντοχής με μέτρο ελαστικότητας είναι γενικά εντός του εύρους των τιμών για το συμβατικό δονούμενο σκυρόδεμα.
- Τα ελάχιστα όρια αντοχών που απαιτούνται από τις προδιαγραφές φαίνεται ότι είναι εύκολο να εξασφαλισθούν με κατάλληλη επιλογή της ποσότητας και του τύπου του τσιμέντου.
- Το μέτρο ελαστικότητας σε κάμψη δεν διαφέρει σημαντικά του μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη. Παρατηρούνται, όμως, μεγαλύτερες τιμές μέτρου ελαστικότητας σε κάμψη έναντι εκείνου σε θλίψη για τιμές σχετικώς υψηλές.
- Η αντικατάσταση μέρους του τσιμέντου με τέφρα έδωσε μεγαλύτερη αύξηση στο μέτρο ελαστικότητας και στην αντοχή σε θλίψη ενώ δεν παρατηρείται το ίδιο στην διάρρηξη και στην κάμψη. Απαιτούνται περισσότερες δοκιμές για να επιβεβαιωθεί το συμπέρασμα αυτό.

ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

- Οι δοκιμές στο εργαστήριο δεν καλύπτουν πλήρως την διερεύνηση του υλικού εάν δεν επιβεβαιωθούν και με δοκιμές που θα γίνουν κατά την κατασκευή ενός δοκιμαστικού οδοστρώματος και με τα συμπεράσματα που θα εξαχθούν από την παρακολούθηση της συμπεριφοράς του. Θεωρείται επομένως απαραίτητη η κατασκευή ενός δοκιμαστικού οδοστρώματος.
- Η βελτίωση της διάταξης μέτρησης των παραμορφώσεων τόσο στην κάμψη όσο και στην θλίψη θα βελτίωνε την ακρίβεια των αντίστοιχων μέτρων ελαστικότητας.
- Θα ήταν σκόπιμο να εξεταστούν, επίσης, διαφορετικές κοκκομετρικές διαβαθμίσεις και να συνδυασθούν με κατασκευές δοκιμαστικών μιγμάτων για να προσδιορισθεί η επίδραση των διαβαθμίσεων στις αντοχές και κυρίως στην συμπυκνωσιμότητα και την επιπεδότητα των στρώσεων από κυλινδρούμενο σκυρόδεμα.
- Η επίδραση των μικρών μεταβολών της επίδρασης στο μίγμα είναι σκόπιμο να διερευνηθεί διότι στην πράξη τέτοιες μικρές μεταβολές είναι αναπόφευκτες.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1]. SANDOR POPOVICS, "STRENGTH AND RELATED PROPERTIES OF CONCRETE", JOHN WILEY & SONS, INC.,
- [2]. SHACKLOCK, "CONCRETE CONSTITUANCE AND MIX PROPORTIONS", CEMENT CONCRETE ASSOCIATION, 1974
- [3]. S. KOLIAS AND R.I.T. WILLIAMS, "CEMENT-BOUND ROAD MATERIALS: STRENGTH AND ELASTIC PROPERTIES MEASURED IN THE LABORATORY", TRANSPORT AND ROAD RESEARCH LABORATORY, TRRL SUPPLEMENTARY REPORT 344., CROWTHORNE 1978
- [4]. ACI MANUAL OF CONCRETE PRACTICE, PART 1, MATERIALS AND GENERAL PROPERTIES OF CONCRETE, REVISED ANNUALLY, DETROIT MICHIGAN
- [5]. ACI 325.10R-95, STATE OF THE ART REPORT ON ROLLER COMPACTED CONCRETE PAVEMENTS, DETROIT MICHIGAN

Jofré C., Fernández R., Josa A., Molina F., Spanish experience with Roller Compacted Concrete Pavements, ASCE Specialty Conference, Roller Compacted Concrete (RCC '88) February, 29-March 2, 1988 San Diego, California.

- . Josa A., Jofre C. and Molina F., An Experimental Overlay with Rolled Concrete, SP 93-11.
- . Ministère de l'Urbanisme du Logement et des Transports, Réalisation des Chaussées en Béton Compacté, Recommandation, Direction des Routes, November 1985

Schrader E., Paxton J., and Ramakrishnan V., Composite Concrete Pavements with Roller-Compacted Concrete, Transportation Research Record 1003.

- . Roller Compacted Concrete. ACI Journal, July-August 1980, pp. 215-236

White T.D., Mix Design, Thickness Design, and Construction of Roller-Compacted Concrete Pavement, Transportation Research Record 1062.

- . Piggott R.W., Roller-Compacted Concrete for Heavy-Duty Pavements: Past Performance, Recent Projects, and Recommended Construction Methods, Transportation Research Record 1062

Pittman D.W., Construction of Roller-Compacted Concrete Pavements, Transportation Research Record 1062.

Abrams J.M., Jacksha J.L., Norton R.L., and Irvine D.J., Roller-Compacted Concrete Pavement at Portland International Airport, Transportation Research Record 1062.

- . Steward R.F. and Schexnayder C.J., Construction Techniques for Roller-Compacted Concrete, Transportation Research Record 1062.
- . Jofré C., Roller Compacted Concrete Pavements State-of-the-art, PIARC Technical Committee on Concrete Roads, June 1991.
- . Neville A.M., Hardened Concrete: Physical and Mechanical Aspects, American Concrete Institute, Monograph No 6.
- . Soroka I., Portland Cement Paste and Concrete, The Macmillan Press Ltd, 1979.
- . Taylor G.D., Materials of Construction, Longman Group Limited 1973.
- . Orchard D.F., Concrete Technology Volume 2 Fourth Edition, Applied Science Publishers LTD London.
- . Hannant D.J., Buckley K.J., Croft J., The effect of aggregate size on the use of the cylinder splitting test as a measure of tensile strength, Vol 6-No 31-1973-Matériaux et Constructions.
- . Tynes W.O., Correlation Between Tensile and Compressive Strengths for Lean Mass Concrete, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Technical Report C-74-2, June 1974.
- . Hammitt G.M., Concrete Strength Relationships, Army Engineer Waterways Experiment Station, December 1974, National Technical Information Service U.S. Department of Commerce.
- 1 . Κολια Σ., Κακούρη Κ., Σαρρή Ι., Επίδραση του μεγέθους των δοκιμίων στην αντοχή σε θλίψη κατεργασμένων με τσιμέντο υλικών, Ανάτυπο από το Δελτίο Κέντρου Ερευνών Δημοσίων Έργων (Τεύχος 1-2/1987) Αθήνα, 1987.

2 . Στεφανίδης Μ., Τσικνάνκου Π., Κατασκευή Φραγμάτων Βαρύτητας από Κυλινδρούμενο Σκυρόδεμα (Roller Compacted Concrete-R.C.C.), 9ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Τόμος Ι, Ελληνικό Τμήμα Σκυροδέματος, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, Καλαμάτα 14-16/2/1990.

ASTM C 116-90 Test Method for Compressive Strength of Concrete Using Portions of Beams Broken in Flexure, C 293-79 Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading), C496-90 Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.

Κόλιας Σ., Σεμινάριο Τεχνολογίας Σκυροδέματος, Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος, ΕΜΠ 1978.

.. Kolias S., Williams R.I.T., Cement Bound Road Materials: Strength and Elastic Properties Measured in the Laboratory, Transport and Road Research Laboratory, TRRL Supplementary Report 344: Crowthorne 1978.

Newman K., Concrete controle tests as measures of the properties of concrete, Proceedints of a Symposium on Concrete Quality, London, November 1969, C & CA

2 Lamprecht H.O., Vollpracht A., Synoptic Table on standards and practices for concrete roads in Europe, International Symposium on Concrete Roads, PIARC/Cembureau/BDZ, Aachen 2-4- June 1986.

2.. Structural Design of Roller-Compacted Concrete for Industrial Pavements, Concrete Information, PCA, 1987.

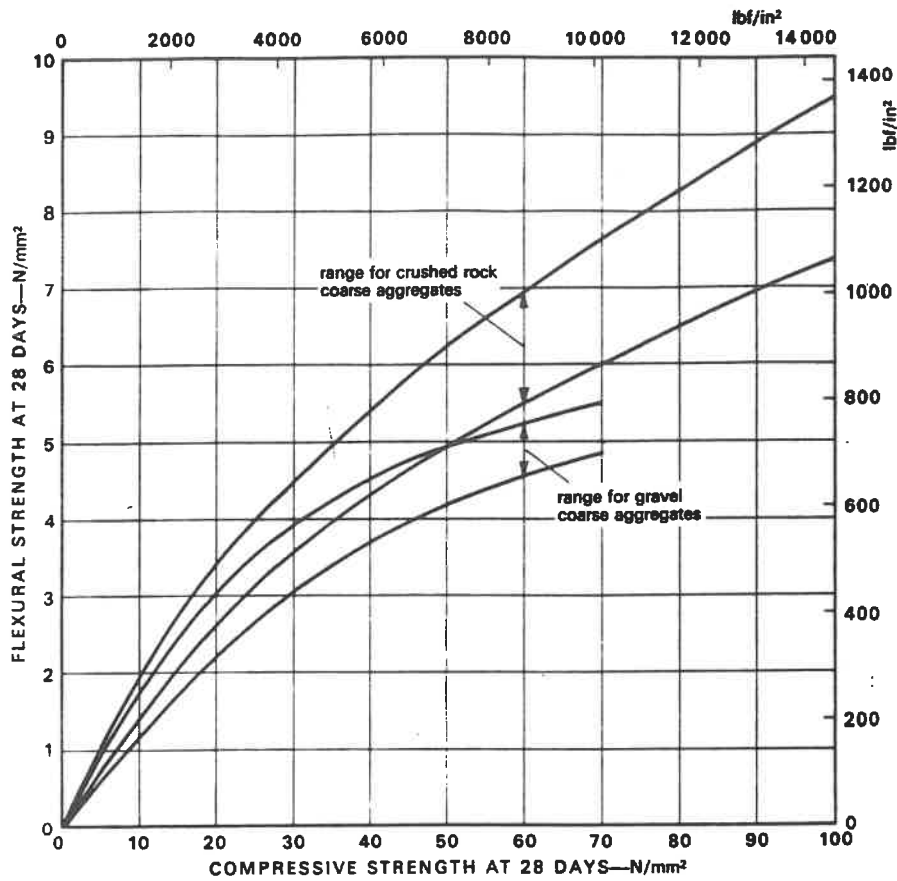


Figure 6.1 : Relation between flexural and compressive strength.

1. ΕΞΕΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΚΑΜΩΗ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ ΣΤΙΣ 28 ΗΜΕΡΕΣ. [2]

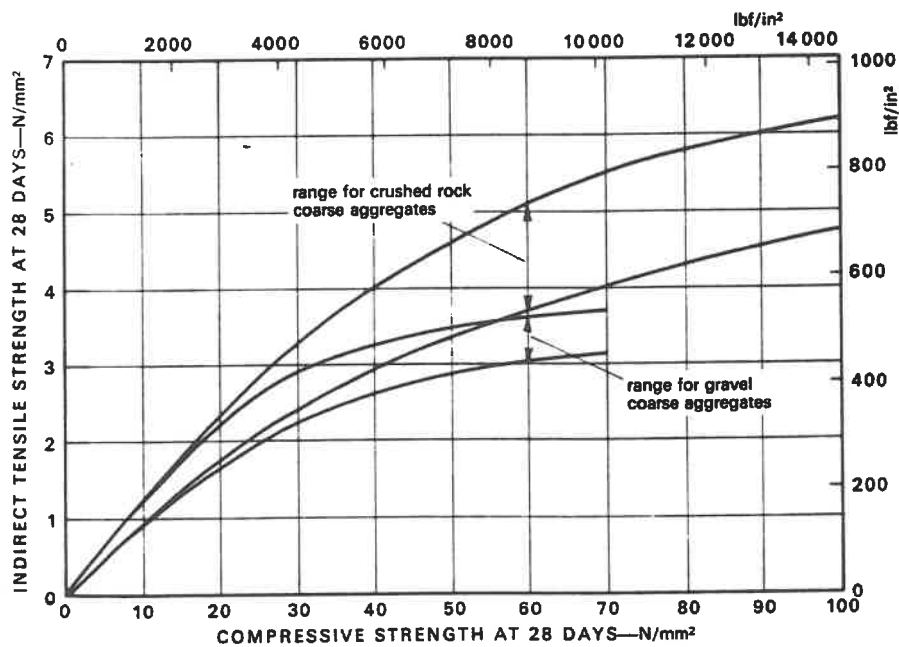
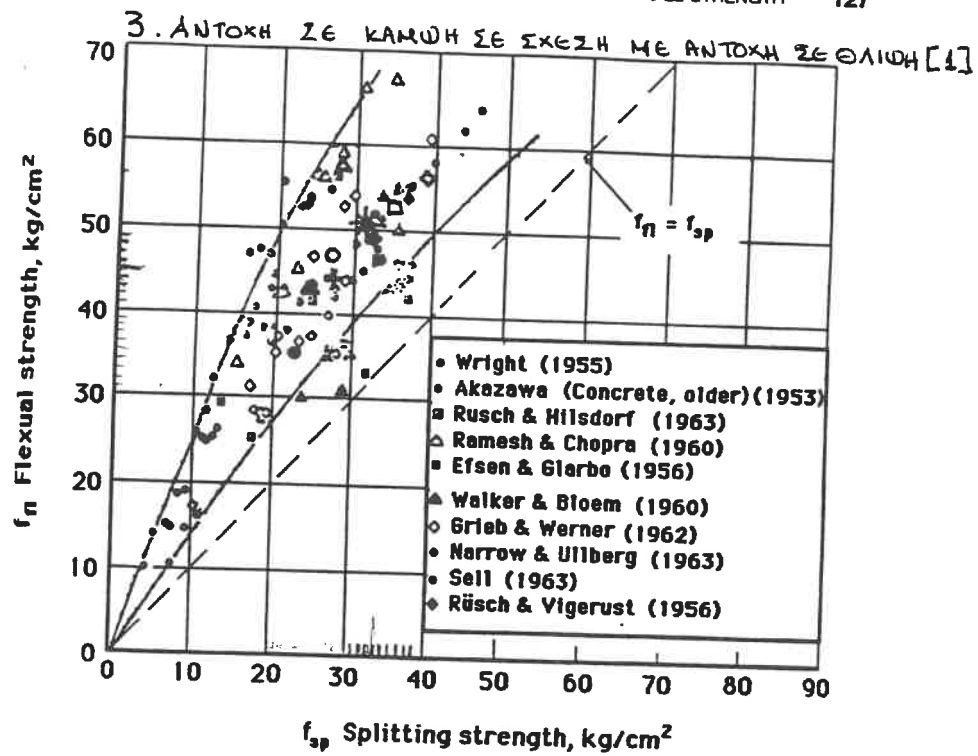


Figure 6.2 : Relation between indirect tensile and compressive strength.

2. ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΔΙΑΡΡΗΞΗ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ ΣΤΙΣ 28 ΗΜΕΡΕΣ [2]



ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΤΡΟ
ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ
ΕΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΟ ΣΤΑΤΙΚΟ
Ε.Ε. [3]

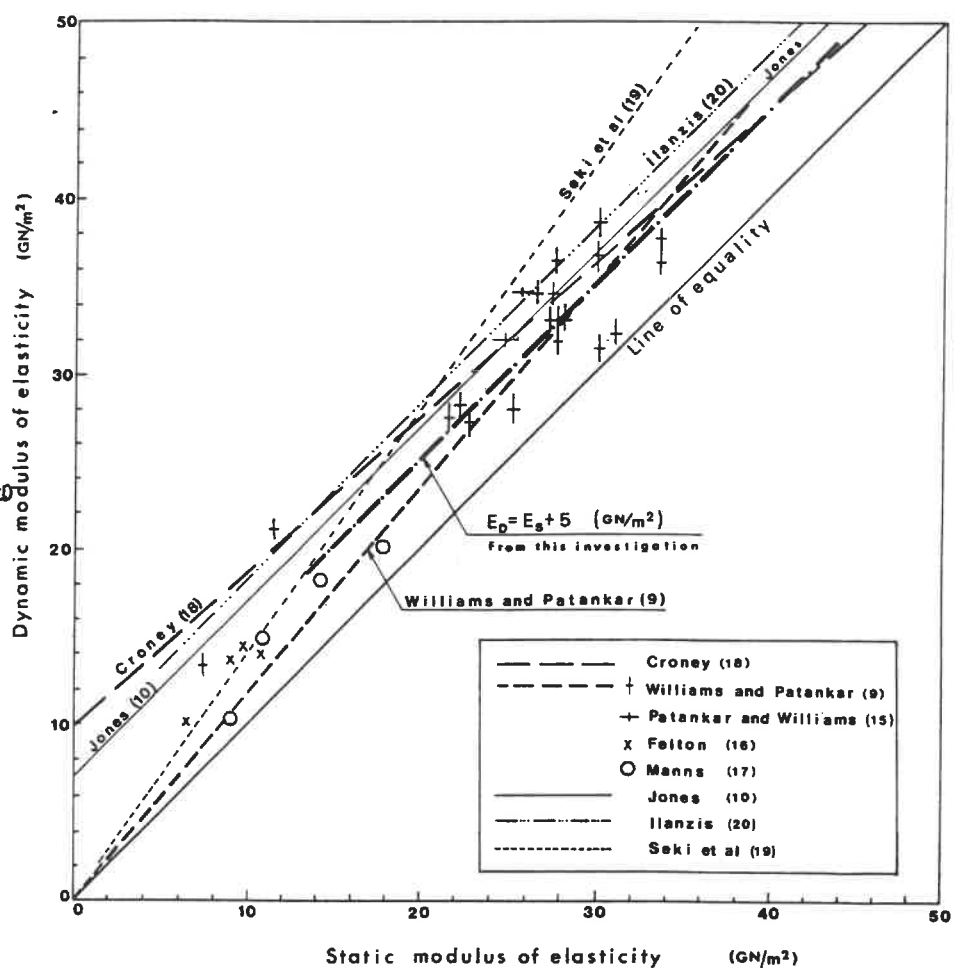


Fig. 2. — Relationships between static and dynamic modulus of elasticity for cemented materials.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1. : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΒΟΥ

ΣΕΙΡΑ	ΗΛΙΚΙΑ	ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ	
			ΜΡα	
1	28	I45-10%	39,28	
2	28	I45-15%	51,31	
3	28	II35-10%	34,85	
4	28	II35-15%	45,22	
5	7	II35-10%	27,23	
6	7	II35-15%	37,54	
7	7	I45-15%	43,74	
8	7	I45-10%	36,54	
9	56	I45-10%+ΤΕΦΡΑ-5%	50,87	
10	7	I45-10%+ΤΕΦΡΑ-5%	36,54	

Στον πίνακα φαίνονται οι μέσες τιμές αντοχής για κάθε σειρά.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2. : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΒΟΥ

ΣΕΙΡΑ		1							
ΗΛΙΚΙΑ		28							
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		3							
ΣΥΝΘΕΣΗ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ		145-10%							
ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ		kN		402,20	383,31	413,02	401,16	403,71	398,27
ΕΜΒΑΔΟΝ		cm ²		101,58	101,58	102,32	102,32	101,80	101,80
f _c		MPa		39,59	37,73	40,37	39,21	39,66	39,12
M.O. ΔΟΚΙΜΙΟΥ				38,66		39,79		39,39	
ΕΠΑΝΑΛΗΨΙΜΟΤΗΤΑ				2,40%		1,46%		0,68%	
M.O. ΣΕΙΡΑΣ		MPa		39,28					
σ ₁				0,88					
λ ₁				2,23%					

σ₁: ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ

λ₁: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ

ΠΙΝΑΚΑΣ 3. : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΒΟΥ

ΣΕΙΡΑ		2					
ΗΛΙΚΙΑ		28					
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		4		5		6	
ΣΥΝΘΕΣΗ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	145-15%					
ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ	kN	544,97	523,75	532,85	478,85	519,73	535,63
ΕΜΒΑΔΟΝ	cm ²	101,05	101,05	102,57	102,57	102,03	102,03
ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ ΜΕ ΘΛΙΨΗ	f _{ccUBE}	53,93	51,83	51,95	46,69	50,94	52,50
	Μ.Ο. ΔΟΚΙΜΙΟΥ	52,88		49,32		51,72	
	ΕΠΑΝΑΛΗΨΙΜΟΤΗΤΑ	1,99%		5,34%		1,51%	
	Μ.Ο. ΣΕΙΡΑΣ	51,31					
	σ ₁	2,47					
	λ ₁	4,81%					

σ_1 : ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ

λ_1 : ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ

ΠΙΝΑΚΑΣ 4. : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΒΟΥ

ΣΕΙΡΑ		3							
ΗΛΙΚΙΑ		28							
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		7		8		9			
ΣΥΝΘΕΣΗ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	1135-10%							
ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ	kN	351,41	360,16	361,99	369,44	344,83	330,02	358,97	
ΕΜΒΑΔΟΝ	cm ²	101,37	101,37	101,55	101,55	101,60	101,60	101,60	
ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ	f _{ccUBE}	34,67	35,53	35,65	36,38	33,94	32,48	35,33	
	M.O. ΔΟΚΙΜΙΟΥ	35,10		36,01		33,92			
	ΕΠΑΝΑΛΗΨΙΜΟΤΗΤΑ	1,23%		1,02%		0,06%	4,23%	4,17%	
	M.O. ΣΕΙΡΑΣ	34,85							
	σ ₁	1,30							
λ ₁		3,73%							

σ_i : ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ

λ_i : ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ

ΠΙΝΑΚΑΣ 5. : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΒΟΥ

ΣΕΙΡΑ		4	
ΗΛΙΚΙΑ		28	
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		10	11
ΣΥΝΘΕΣΗ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ		12	
ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ		1135-15%	
ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ			
ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ		kN	
ΕΜΒΑΔΟΝ		cm ²	
f _{ccube}		MPa	
Μ.Ο. ΔΟΚΙΜΙΟΥ			
ΕΠΑΝΑΛΗΨΙΜΟΤΗΤΑ			
Μ.Ο. ΣΕΙΡΑΣ			
σ ₁			
λ ₁			
ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ			
ΘΛΙΨΗ			
456,00		465,12	480,33
101,38		101,38	101,55
44,98		45,88	47,30
45,43		47,30	43,70
0,99%		0,00%	0,14%
45,22			7,70%
2,55			7,84%
5,65%			
405,99		441,14	474,44
100,80		100,80	100,80
40,28		43,76	47,07

σ₁: ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ

λ₁: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ

ΠΙΝΑΚΑΣ 6. : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΒΟΥ

ΣΕΙΡΑ		5											
ΗΛΙΚΙΑ		7											
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		13					14					15	
ΣΥΝΘΕΣΗ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	1135-10%											
ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ ΜΕ ΘΛΙΨΗ	ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ	kN		264,13	271,86	275,33	267,83	278,54	276,93	274,23	264,60	276,83	
	ΕΜΒΑΔΟΝ	cm ²		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
	f _{CCUBE}	MPa		26,41	27,19	27,53	26,78	27,85	27,69	27,42	26,46	27,68	
	Μ.Ο. ΔΟΚΙΜΙΟΥ			27,04				27,44		27,19			
	ΕΠΑΝΑΛΗΨΙΜΟΤΗΤΑ			2,33%	0,53%	1,81%	2,41%	1,50%	0,91%	0,86%	2,68%	1,82%	
	Μ.Ο. ΣΕΙΡΑΣ	MPa		27,23									
	σ ₁			0,55									
λ ₁			2,01%										

σ₁: ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ

λ₁: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ

ΠΙΝΑΚΑΣ 7. : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΒΟΥ

ΣΕΙΡΑ		6							
ΗΛΙΚΙΑ		7							
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		16		17		18			
ΣΥΝΘΕΣΗ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	II35-15%							
ΤΑΞΗ ΘΡΑΥΣΗΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ	ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ	kN		372,63	371,33	382,22	389,21	376,51	360,61
	ΕΜΒΑΔΟΝ	cm ²		100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
	f_{ccube}	MPa		37,26	37,13	38,22	38,92	37,65	36,06
	Μ.Ο. ΔΟΚΙΜΙΟΥ			37,20		38,57		36,86	
	ΕΠΑΝΑΛΗΨΙΜΟΤΗΤΑ			0,17%		0,91%		2,16%	
	Μ.Ο. ΣΕΙΡΑΣ	MPa				37,54			
	σ_1					0,98			
	λ_1					2,61%			

σ_i: ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
λ_i: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ

ΠΙΝΑΚΑΣ 8. : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΒΟΥ

ΣΕΙΡΑ		7					11						
ΗΛΙΚΙΑ		7											
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		19		20		21		H		Θ		I	
ΣΥΝΘΕΣΗ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	145-15%											
	ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ												
ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ	kN	438,56	462,99	444,11	487,11	475,52	437,51	416,91	399,53	441,19			
ΕΜΒΑΔΟΝ	cm ²	101,97	101,97	101,40	101,40	102,03	100,53	102,42	101,63	102,03			
		43,01	45,41	43,80	48,04	43,52	40,71	39,31	46,60	43,24			
	f _{CCUBE}	44,21		45,92		41,18							
	M.O. ΔΟΚΙΜΙΟΥ			4,62%		3,74%							
	ΕΠΑΝΑΛΗΨΙΜΟΤΗΤΑ	2,71%											
	M.O. ΣΕΙΡΑΣ			45,02				44,92					
	σ ₁			2,02				2,14					
	λ ₁			4,50%				5,20%					
	M.O. ΣΕΙΡΑΣ					43,74							
	σ ₂					2,72							
	λ ₂					6,21%							
ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ ΣΕ ΘΑΛΗΦΗ													

σ_i: ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ λ_i: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ

ΠΙΝΑΚΑΣ 9. : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΒΟΥ

ΣΕΙΡΑ		8	
ΗΛΙΚΙΑ		7	
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		22	23
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		145-10%	
ΣΥΝΘΕΣΗ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ		
ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ	kN	388,71	380,77
ΕΜΒΑΔΟΝ	cm ²	102,03	102,03
ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ ΣΕ ΘΑΛΗΗ	f _{CCUBE}	36,73	37,34
	Μ.Ο. ΔΟΚΙΜΙΟΥ	35,56	0,05%
	ΕΠΑΝΑΛΗΨΙΜΟΤΗΤΑ	1,52%	
	Μ.Ο. ΣΕΙΡΑΣ	36,54	
	σ ₁	1,23	
λ ₁		3,37%	

σ₁: ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ

λ₁: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ

ΠΙΝΑΚΑΣ 10. : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΒΟΥ

ΣΕΙΡΑ		9			10		
ΗΛΙΚΙΑ		56			7		
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		A	B	Γ	Δ	Ε	Z
ΣΥΝΘΕΣΗ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	145-10%+ΤΕΦΡΑ-5%			145-10%+ΤΕΦΡΑ-5%		
ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ	kN	484,50	539,50	523,98	328,95	409,17	374,03
ΕΜΒΑΔΟΝ	cm ²	101,03	102,07	101,18	101,22	101,73	101,33
ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ ΜΕΘΑΙΩΣΗ	f _{CCUBE}	47,95	52,86	51,79	32,50	40,22	36,91
	M.O. ΣΕΙΡΑΣ	50,87			36,54		
	σ ₁	2,58			3,87		
	λ ₁	5,07%			10,60%		

σ_i: ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
λ_i: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ

ΠΙΝΑΚΑΣ 11. : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

ΣΕΙΡΑ		9			10			11		
ΗΛΙΚΙΑ		56			7			7		
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		A	B	Γ	Δ	E	Z	H	Θ	I
ΣΥΝΘΕΣΗ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	145-10%+ΤΕΦΡΑ-5%			145-10%+ΤΕΦΡΑ-5%			145-15%		
ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ		kN								
ΕΜΒΑΔΟΝ		cm ²								
ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ	f _c	382,40	391,00	342,00	237,30	364,60	315,90	344,00	282,80	249,60
	M.O. ΣΕΙΡΑΣ	101,03	102,07	101,18	101,22	101,73	101,33	100,53	102,42	101,63
	σ ₁	37,85	38,31	33,80	23,44	35,84	31,17	34,22	27,61	24,56
	λ ₁	36,65			30,15			28,80		
		2,48			6,26			4,94		
		6,77%			20,76%			17,14%		

σ_i: ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ

λ_i: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ

ΠΙΝΑΚΑΣ 12. : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΑΝΤΙΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

ΣΕΙΡΑ	ΗΛΙΚΙΑ	ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ ΣΕ ΔΙΑΡΡΗΞΗ	
			MPa	
1	28	I45-10%	3,53	
2	28	I45-15%	3,91	
3	28	II35-10%	2,79	
4	28	II35-15%	3,15	
5	7	II35-10%	2,28	
6	7	II35-15%	2,77	
7	7	I45-15%	3,40	
8	7	I45-10%	3,27	
9	56	I45-10%+ΤΕΦΡΑ-5%	2,80	
10	7	I45-10%+ΤΕΦΡΑ-5%	2,40	

Στον πίνακα φαίνονται οι μέσες τιμές αντοχής για κάθε σειρά.

ΠΙΝΑΚΑΣ 13. : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΑΝΤΙΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

ΣΕΙΡΑ		1			8		
ΗΛΙΚΙΑ		28			7		
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		1	2	3	22	23	24
ΣΥΝΘΕΣΗ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	145-10%			145-10%		
ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ		111,60			102,45	103,56	77,24
ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ		23,14			23,85	23,70	22,85
ΥΨΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		20,12			20,12	20,04	20,07
ΤΑΞΗ ΘΡΑΥΣΗΣ ΔΙΑΡΡΗΞΗΣ	f_t	3,53			3,24	3,29	2,45
	M.O. ΣΕΙΡΑΣ	3,53			3,27		
	σ_1				ΕΠΑΝΑΛΗΨΙΜΟΤΗΤΑ: 0,92%		
	λ_1						

σ_i: ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ

λ_i: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ

ΠΙΝΑΚΑΣ 15. : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΑΝΤΙΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

ΣΕΙΡΑ		3			5		
ΗΛΙΚΙΑ		28			7		
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		7	8	9	13	14	15
ΣΥΝΘΕΣΗ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	1135-10%			1135-10%		
ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ		κΝ					
ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ		Κη/μ ³					
ΕΜΒΑΔΟΝ		cm ²					
ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ ΣΕ ΔΙΑΡΡΗΞΗ	f _t						
	Μ.Ο. ΣΕΙΡΑΣ						
	σ ₁						
	λ ₁						
		80,02	94,88	88,75	75,21	66,09	73,51
		23,07	23,48	22,44	23,36	22,44	23,58
		20,10	20,09	20,04	20,00	20,00	20,00
		2,54	3,01	2,82	2,39	2,10	2,34
		2,79			2,28		
		0,24			0,15		
		8,52%			6,77%		

σ₁: ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
λ₁: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ

ΠΙΝΑΚΑΣ 16. : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΑΝΤΙΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

ΣΕΙΡΑ		4				6	
ΗΛΙΚΙΑ		28				7	
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		10	11	12	16	17	18
ΣΥΝΘΕΣΗ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	1135-15%				1135-15%	
ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ	kN	103,05	88,50	106,51	86,90	85,80	88,70
ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	Kn/m ³	22,32	22,84	23,29	22,63	23,18	22,60
ΕΜΒΑΔΟΝ	cm ²	20,05	20,07	20,04	20,04	20,02	20,04
ΤΑΞΗ ΘΡΑΥΣΗΣ ΣΤΗ ΔΙΑΡΡΗΞΗ	f _t	3,27	2,81	3,38	2,76	2,73	2,82
	M.O. ΣΕΙΡΑΣ	3,15				2,77	
	σ ₁	0,31				0,05	
	λ ₁	9,68%				1,65%	

σ_i: ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
λ_i: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ

ΠΙΝΑΚΑΣ 17. : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΑΝΤΙΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

ΣΕΙΡΑ		9				10	
ΗΛΙΚΙΑ		56				7	
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		A	B	Γ	Δ	E	Z
ΣΥΝΘΕΣΗ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	145-10%+ΤΕΦΡΑ-5%				145-10%+ΤΕΦΡΑ-5%	
ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ	kN	104,87	85,78	73,36	78,52	72,83	39,42
ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ	Kn/m ³	23,26	22,57	23,17	22,64	22,54	21,87
ΕΜΒΑΔΟΝ	cm ²	20,12	20,04	20,07	20,11	20,01	19,93
ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ ΜΕ ΔΙΑΡΡΗΞΗ	f _t	3,32	2,73	2,34	2,48	2,31	1,25
	M.O. ΣΕΙΡΑΣ	2,80				2,40	
	σ ₁	0,49				ΕΠΑΝΑΛΗΨΙΜΟΤΗΤΑ: 3,54%	
	λ ₁	17,58%					

σ_i: ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ

λ_i: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ

ΠΙΝΑΚΑΣ 18. : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΑΝΤΙΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ

ΣΕΙΡΑ	ΗΛΙΚΙΑ	ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ ΣΕ ΔΙΑΡΡΗΞΗ	
			MPa	
1	28	I45-10%	5,26	
2	28	I45-15%	5,59	
3	28	II35-10%	4,76	
4	28	II35-15%	5,03	
5	7	II35-10%	3,61	
6	7	II35-15%	4,37	
7	7	I45-15%	4,93	
8	7	I45-10%	4,66	
9	56	I45-10%+ΤΕΦΡΑ-5%	5,72	
10	7	I45-10%+ΤΕΦΡΑ-5%	4,33	

Στον πίνακα φαίνονται οι μέσες τιμές αντοχής για κάθε σειρά.

ΠΙΝΑΚΑΣ 20. : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΑΜΨΗΣ

ΣΕΙΡΑ		2			7			11		
ΗΛΙΚΙΑ		28			7			7		
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		4	5	6	19	20	21	H	Θ	I
ΣΥΝΘΕΣΗ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	145-15%			145-15%			145-15%		
ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ	kN	14,84	13,64	14,00	11,22	11,95	12,09	13,64	13,31	12,53
ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ ΣΕ ΚΑΜΨΗ	f_b	5,91	5,35	5,52	4,42	4,74	4,76	5,45	5,22	4,96
	M.O. ΣΕΙΡΑΣ	5,59			4,64			5,21		
	σ_1	0,29			0,19			0,25		
	λ_1	5,12%			4,10%			4,79%		
	M.O.				4,93					
	σ_2				0,37					
	λ_2				7,51%					

σ_i : ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ

λ_i : ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ

ΠΙΝΑΚΑΣ 21. : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΑΜΨΗΣ

ΣΕΙΡΑ		3			5		
ΗΛΙΚΙΑ		28			7		
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		7	8	9	13	14	15
ΣΥΝΘΕΣΗ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	1135-10%			1135-10%		
ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ ΖΕ ΚΑΜΨΗ	ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ	kN			8,38	9,58	8,97
	f_b	11,73	12,13	12,22			
	M.O. ΣΕΙΡΑΣ	4,65	4,80	4,83	3,37	3,85	3,61
	σ_1	4,76			3,61		
	λ_1	0,10			0,24		
		2,04%			6,67%		

σ_i: ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ

λ_i: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ

ΠΙΝΑΚΑΣ 22. : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΑΜΨΗΣ

ΣΕΙΡΑ		4				6		
ΗΛΙΚΙΑ		28				7		
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		10	11	12	16	17	18	
ΣΥΝΘΕΣΗ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	1135-15%				1135-15%		
ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ ΖΕ ΚΑΜΨΗ	ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ	kN						
	f_b							
	M.O. ΣΕΙΡΑΣ							
	σ_1							
	λ_1							
		14,07	12,14	11,82	11,20	10,97	10,42	
		5,58	4,81	4,72	4,50	4,41	4,19	
		5,03		4,37				
		0,47		0,16				
		9,42%		3,68%				

σ_i: ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ

λ_i: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ

ΠΙΝΑΚΑΣ 23. : ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΑΜΨΗΣ

ΣΕΙΡΑ		9			10		
ΗΛΙΚΙΑ		56			7		
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		A	B	Γ	Δ	E	Z
ΣΥΝΘΕΣΗ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	I45-10%+ΤΕΦΡΑ-5%			I45-10%+ΤΕΦΡΑ-5%		
ΦΟΡΤΙΟ ΘΡΑΥΣΗΣ		κN					
ΤΑΣΗ ΘΡΑΥΣΗΣ ΚΑΜΨΗΣ	f_b	14,02	14,31	14,95	10,14	10,82	11,85
	M.O. ΣΕΙΡΑΣ	5,58	5,64	5,94	4,03	4,28	4,70
	σ_1	5,72			4,33		
	λ_1	0,19			0,34		
		3,40%			7,87%		

σ_i: ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ

λ_i: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ

ΠΙΝΑΚΑΣ 24. : ΜΕΤΡΑ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (ΔΟΚΙΜΗ ΘΛΙΨΗΣ)

ΣΕΙΡΑ		9					10						
ΗΛΙΚΙΑ		56					7						
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		Α		Β		Γ	Δ		Ε	Ζ			
ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	ΣΥΝΘΕΣΗ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ	145-10%+ΤΕΦΡΑ-5%					145-10%+ΤΕΦΡΑ-5%						
	E _A	E _Δ											
	Μ.Ο. ΔΟΚΙΜΙΟΥ		GPa										
	Μ.Ο. ΣΕΙΡΑΣ												
	σ ₁												
λ ₁													
		75,65	24,52	32,26	48,86	35,58	57,04	31,78	31,69	56,56	27,83	31,08	41,36
		37,36		38,88		44,73		31,69		37,56		35,60	
		40,32					34,95						
		3,89					2,99						
		9,65%					8,54%						

ΠΙΝΑΚΑΣ 25. : ΜΕΤΡΑ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (ΔΟΚΙΜΗ ΘΛΙΨΗΣ)

ΣΕΙΡΑ		11								
ΗΛΙΚΙΑ		7								
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		Η		Θ		Ι				
ΣΥΝΘΕΣΗ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ		ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ		ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ		145-15%				
ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	Ε _Α	Ε _Δ			108,19	24,41	75,78	22,52	38,81	38,03
	Μ.Ο. ΔΟΚΙΜΙΟΥ		GPa						38,55	
	Μ.Ο. ΣΕΙΡΑΣ				41,66		35,06			
	σ ₁						38,43			
	λ ₁						3,30		8,59%	

σ_i: ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
λ_i: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ

**ΠΙΝΑΚΑΣ 26. : ΜΕΤΡΑ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (ΔΟΚΙΜΗ ΘΛΙΨΗΣ)
ΜΕ ΜΕΤΑΘΕΣΗ ΑΞΟΝΩΝ**

ΣΕΙΡΑ		9					10						
ΗΛΙΚΙΑ		56					7						
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		Α		Β		Γ	Δ		Ε		Ζ		
ΣΥΝΘΕΣΗ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	145-10%+ΤΕΦΡΑ-5%					145-10%+ΤΕΦΡΑ-5%						
ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	Ε _Α	64,00	25,47	29,93	48,32	37,68	43,64	28,43	30,75	50,42	27,88	24,53	42,31
	Ε _Δ												
	Μ.Ο. ΔΟΚΙΜΙΟΥ	36,62		36,97		41,40		29,55		36,00		31,44	
	Μ.Ο. ΣΕΙΡΑΣ			38,33						32,33			
	σ ₁			2,66						3,32			
λ ₁				6,95%						10,26%			

σ₁: ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ

λ₁: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ

**ΠΙΝΑΚΑΣ 27. : ΜΕΤΡΑ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (ΔΟΚΙΜΗ ΘΛΙΨΗΣ)
ΜΕ ΜΕΤΑΘΕΣΗ ΑΞΟΝΩΝ**

ΣΕΙΡΑ		11							
ΗΛΙΚΙΑ		7							
ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ		Θ							
ΣΥΝΘΕΣΗ ΜΕΙΓΜΑΤΟΣ	Σ	ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	ΠΟΣΟΣΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	145-15%					
				Ε _A	Ε _Δ	M.O. ΔΟΚΙΜΙΟΥ	M.O. ΣΕΙΡΑΣ	σ ₁	λ ₁
ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ		GPa	49,83	27,39	75,78	22,52	38,81	38,03	
			35,38		35,06		38,55		
			38,43						
			1,93						
			5,32%						

σ₁: ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
λ₁: ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΜΕΤΑΒΛΗΤΟΤΗΤΑΣ

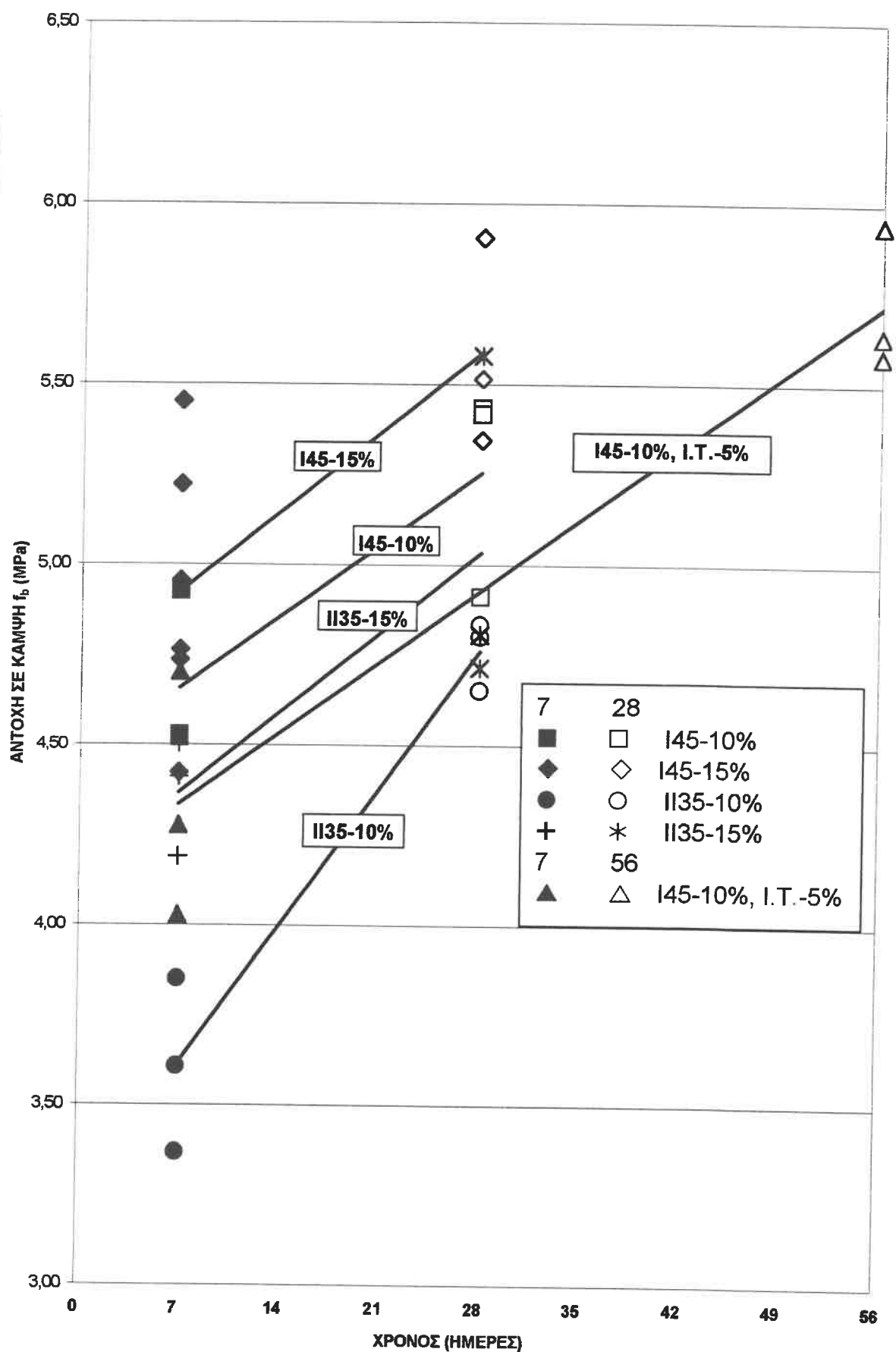
ΠΙΝΑΚΑΣ 28. : ΜΕΤΡΑ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ (ΔΟΚΙΜΗ ΚΑΜΨΗΣ)

ΣΕΙΡΑ	ΗΛΙΚΙΑ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΣΥΝΘΕΣΗ	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΛΟΓΩ ΚΑΜΨΗΣ																	
				Ε _A	Ε _Δ	M.O. ΔΟΚΙΜΙΟΥ	M.O. ΣΕΙΡΑΣ	σ ₁	λ ₁	M.O. ΜΕΤΑΞΥ ΣΕΙΡΩΝ	σ ₁	λ ₁									
				Gpa						Gpa											
1	28	1	I45-10%	51,19	38,01	43,63	40,68	2,92	7,17%	41,92	7,36	17,57%									
	28	2		45,68	36,58	40,63															
	28	3		38,15	37,45	37,79															
8	7	22	I45-10%	45,82	41,07	43,32	39,85	3,35	8,41%				41,92	7,36	17,57%						
	7	23		39,30	39,94	39,62															
	7	24		36,47	36,78	36,62															
2	28	4	I45-15%	43,91	38,81	41,20	42,75	1,76	4,11%							41,92	7,36	17,57%			
	28	5		47,29	38,41	42,39															
	28	6		52,14	39,05	44,66															
7	7	19	I45-15%	46,45	32,03	37,91	35,89	2,10	5,84%										41,92	7,36	17,57%
	7	20		36,98	31,00	33,73															
	7	21		40,85	32,24	36,04															
11	7	H	I45-15%	51,13	48,34	49,69	47,95	4,71	9,83%	41,92	7,36	17,57%									
	7	Θ		55,84	50,05	51,54															
	7	I		42,80	42,42	42,61															
3	28	7	II35-10%	48,88	32,97	39,38	37,98	1,92	5,06%				41,92	7,36	17,57%						
	28	8		36,91	34,47	35,38															
	28	9		41,93	34,59	37,91															
5	7	13	II35-10%	39,08	33,20	35,90	33,72	3,08	9,14%							41,92	7,36	17,57%			
	7	14		32,91	30,29	31,55															
	7	15		32,91	30,29	31,55															
4	28	10	II35-15%	49,39	37,52	42,64	41,79	3,33	7,97%										41,92	7,36	17,57%
	28	11		38,55	37,69	38,12															
	28	12		49,42	40,65	44,61															
6	7	16	II35-15%	47,75	29,78	36,68	35,63	3,36	9,42%	41,92	7,36	17,57%									
	7	17		38,68	27,11	31,88															
	7	18		45,29	33,25	38,34															
9	56	A	I45-10%, I.TEΦPA-5%	75,29	39,00	51,38	46,58	4,16	8,93%				41,92	7,36	17,57%						
	56	B		52,03	38,66	44,36															
	56	Γ		47,77	40,80	44,01															
10	7	Δ	I45-10%, I.TEΦPA-5%	33,38	29,39	31,25	35,40	3,59	10,14%							41,92	7,36	17,57%			
	7	E		48,11	30,81	37,56															
	7	Z		37,22	37,53	37,38															

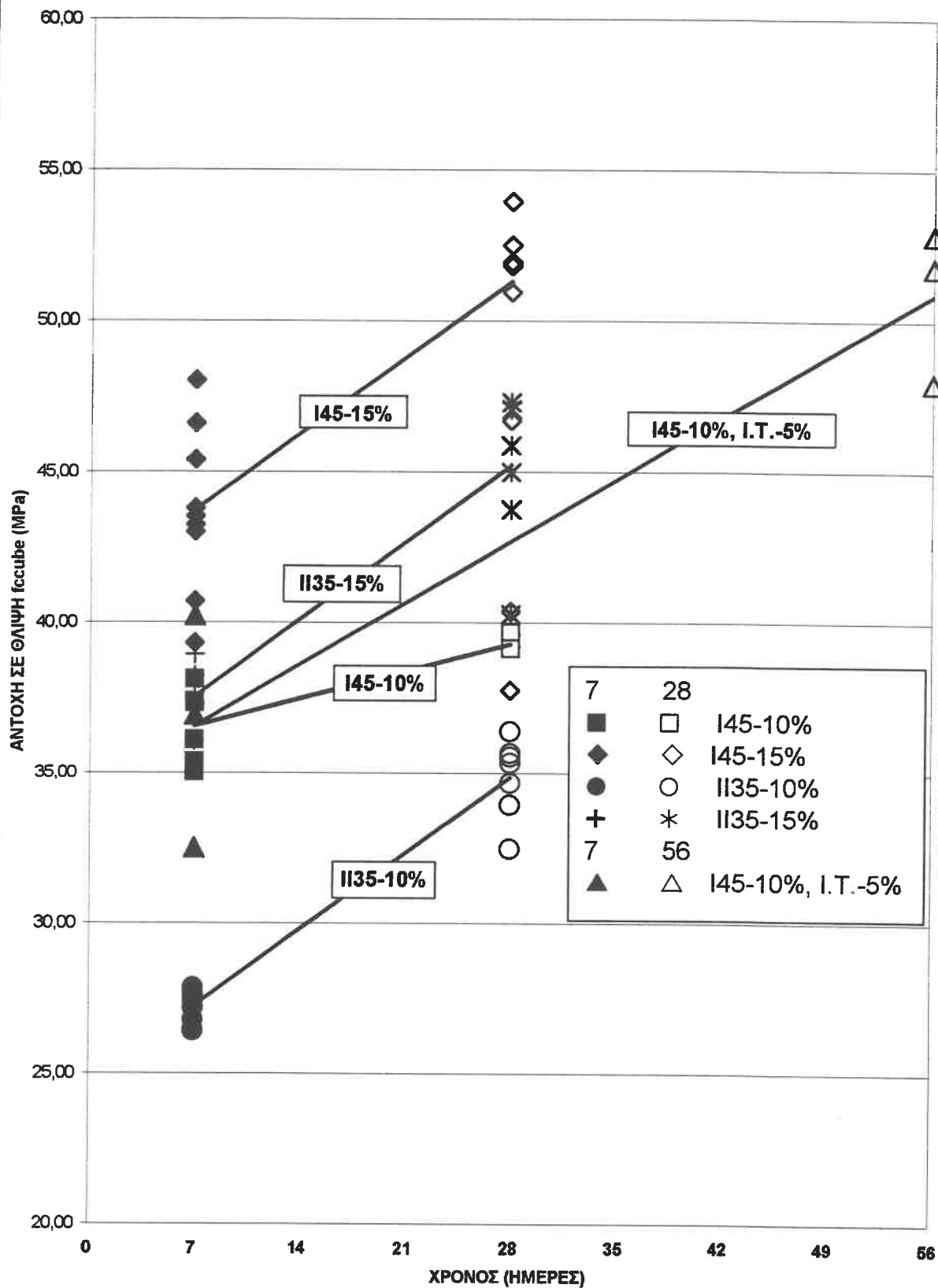
**ΠΙΝΑΚΑΣ 29. : ΗΛΕΚΤΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΤΡΟ
ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ**

ΣΕΙΡΑ	ΗΛΙΚΙΑ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΣΥΝΘΕΣΗ	ΗΛΕΚΤΡΟΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ			
				Μ.Ο. ΔΟΚΙΜΙΟΥ	Μ.Ο. ΣΕΙΡΑΣ	σ_1	λ_1
				Gpa			
1	28	1	I45-10%	45,65	45,48	0,18	0,39%
	28	2		45,49			
	28	3		45,30			
8	7	22	I45-10%	44,63	45,06	0,64	1,42%
	7	23		44,76			
	7	24		45,80			
2	28	4	I45-15%	47,69	48,07	0,33	0,69%
	28	5		48,25			
	28	6		48,27			
11	7	H	I45-15%	44,67	44,32	0,32	0,71%
	7	Θ		44,05			
	7	I		44,25			
3	28	7	II35-10%	42,76	43,64	0,78	1,78%
	28	8		43,97			
	28	9		44,21			
4	28	10	II35-15%	44,84	45,08	0,47	1,04%
	28	11		45,62			
	28	12		44,77			
9	56	A	I45-10%, I.T.-5%	45,23	46,49	1,11	2,38%
	56	B		47,29			
	56	Γ		46,95			
10	7	Δ	I45-10%, I.T.-5%	36,72	39,72	2,61	6,57%
	7	E		41,47			
	7	Z		40,98			

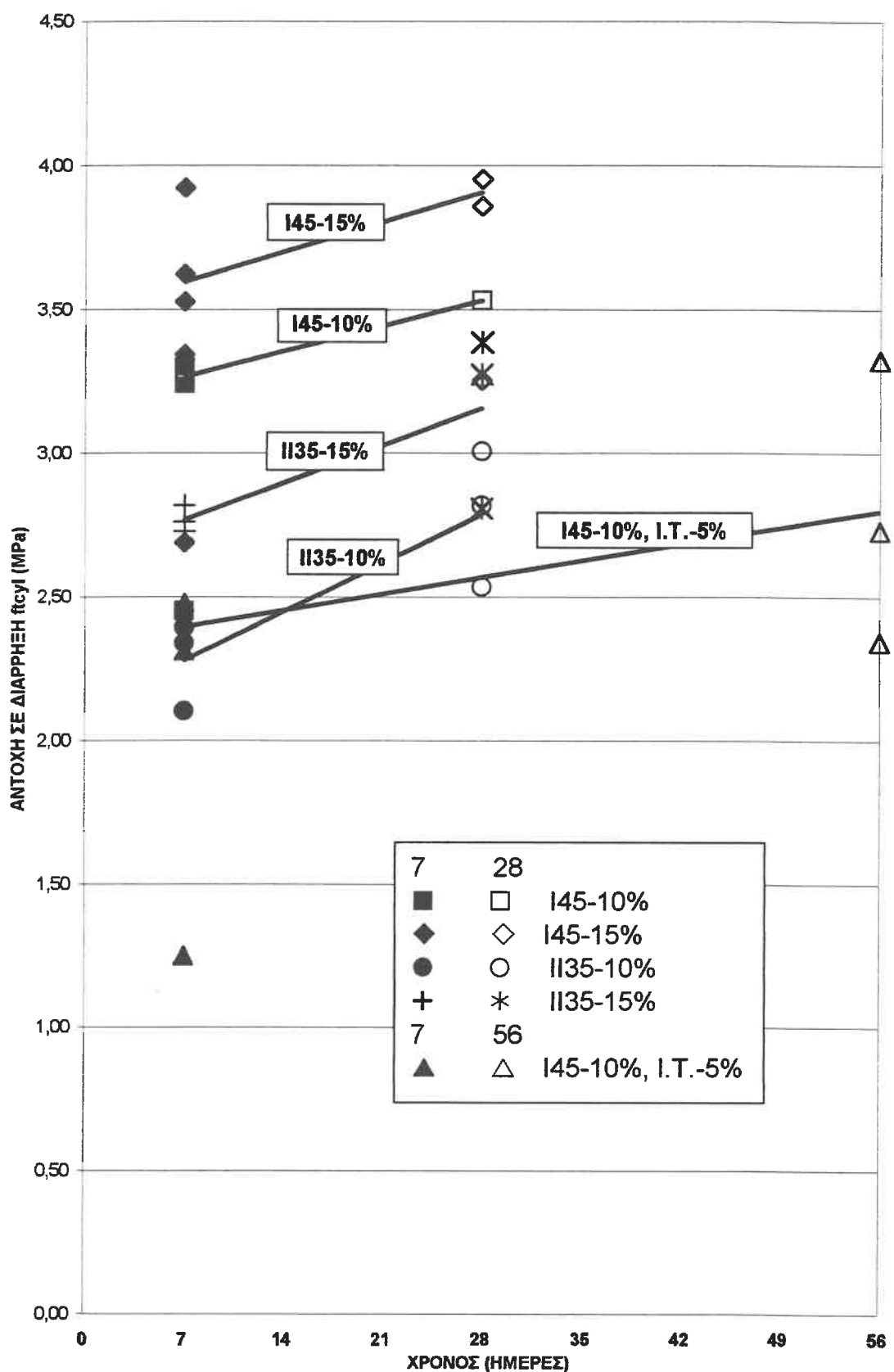
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1-ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΗΛΙΚΙΑ



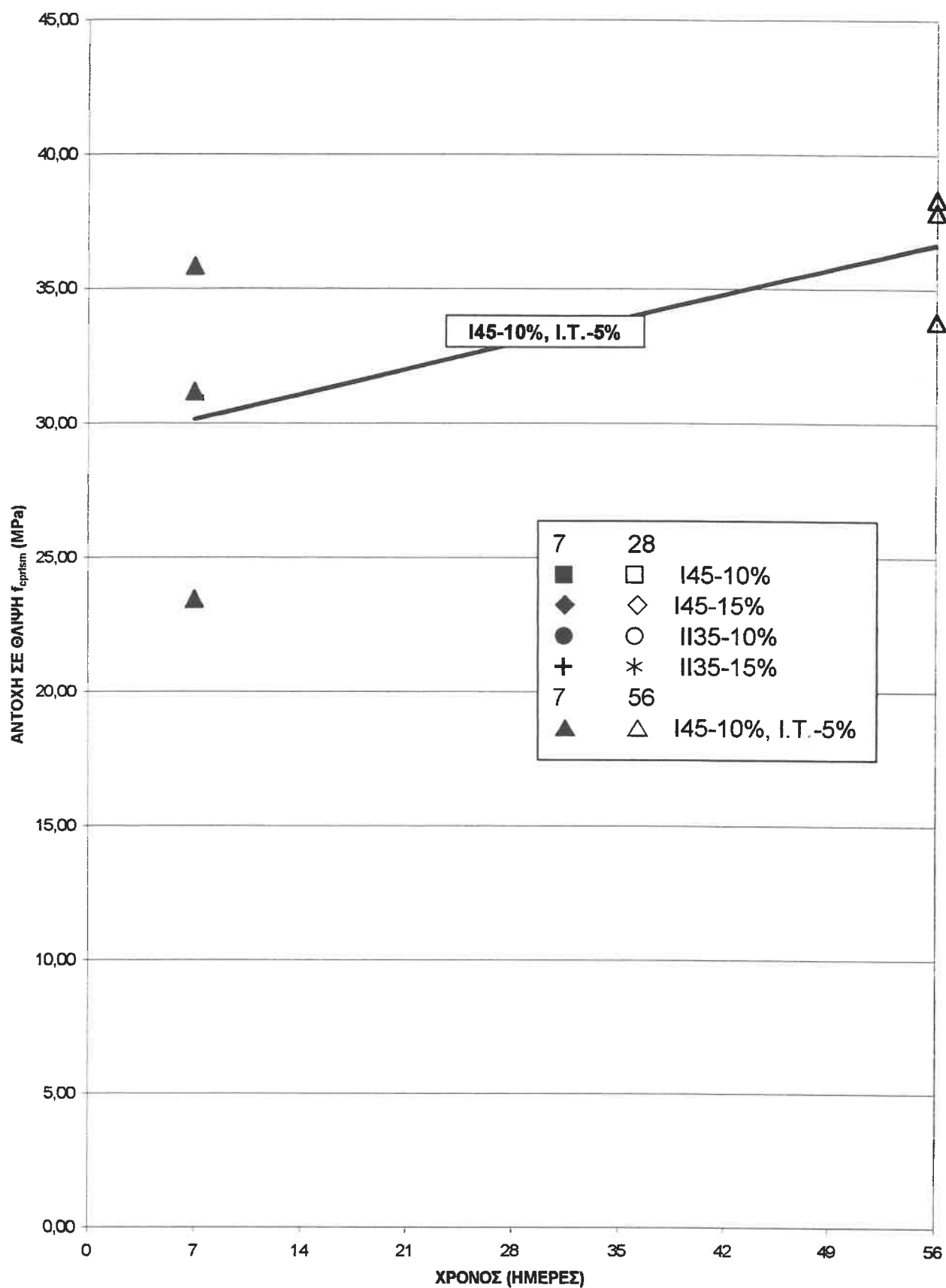
**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2-ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ
ΗΛΙΚΙΑ
(ΔΟΚΙΜΗ ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΒΟΥ)**



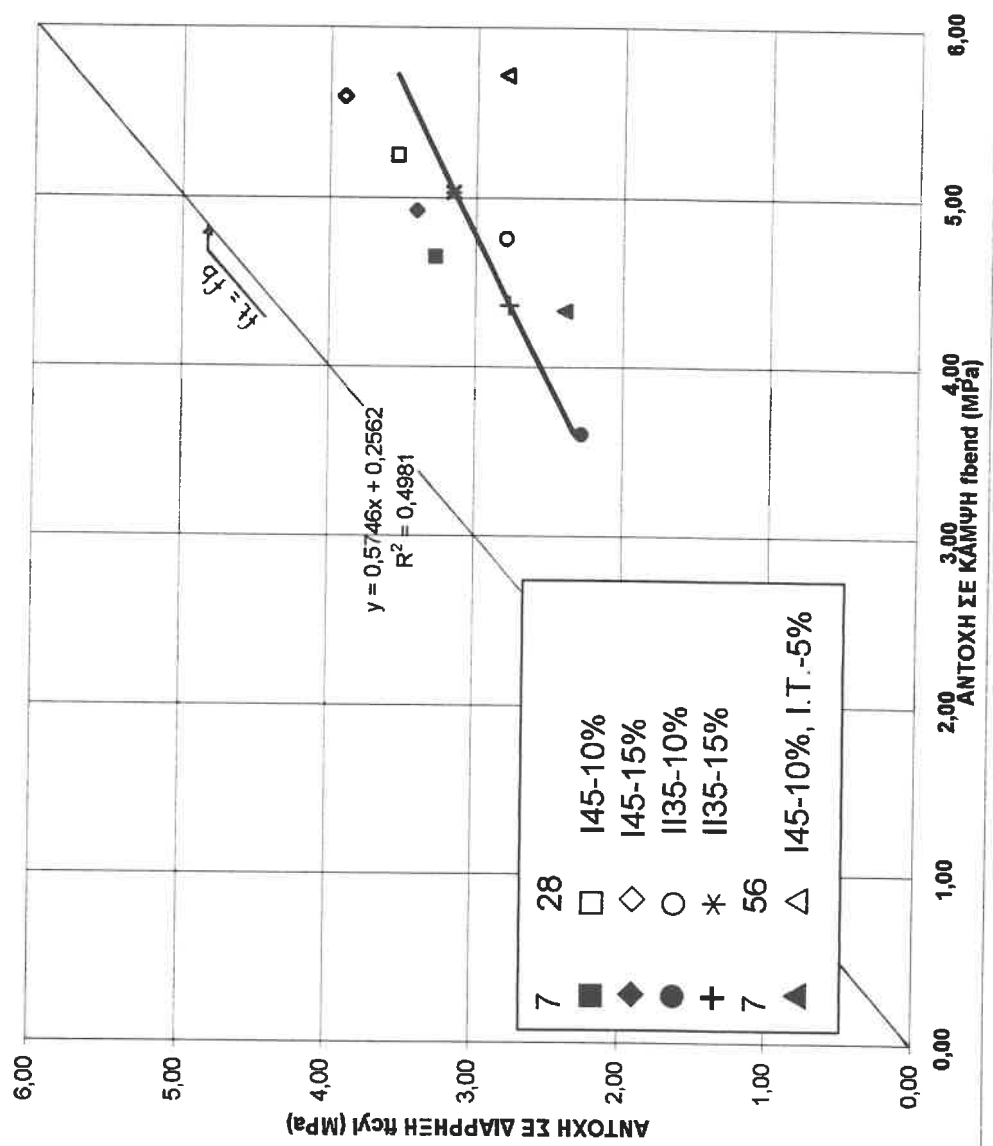
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3-ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΔΙΑΡΡΗΞΗ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΗΛΙΚΙΑ



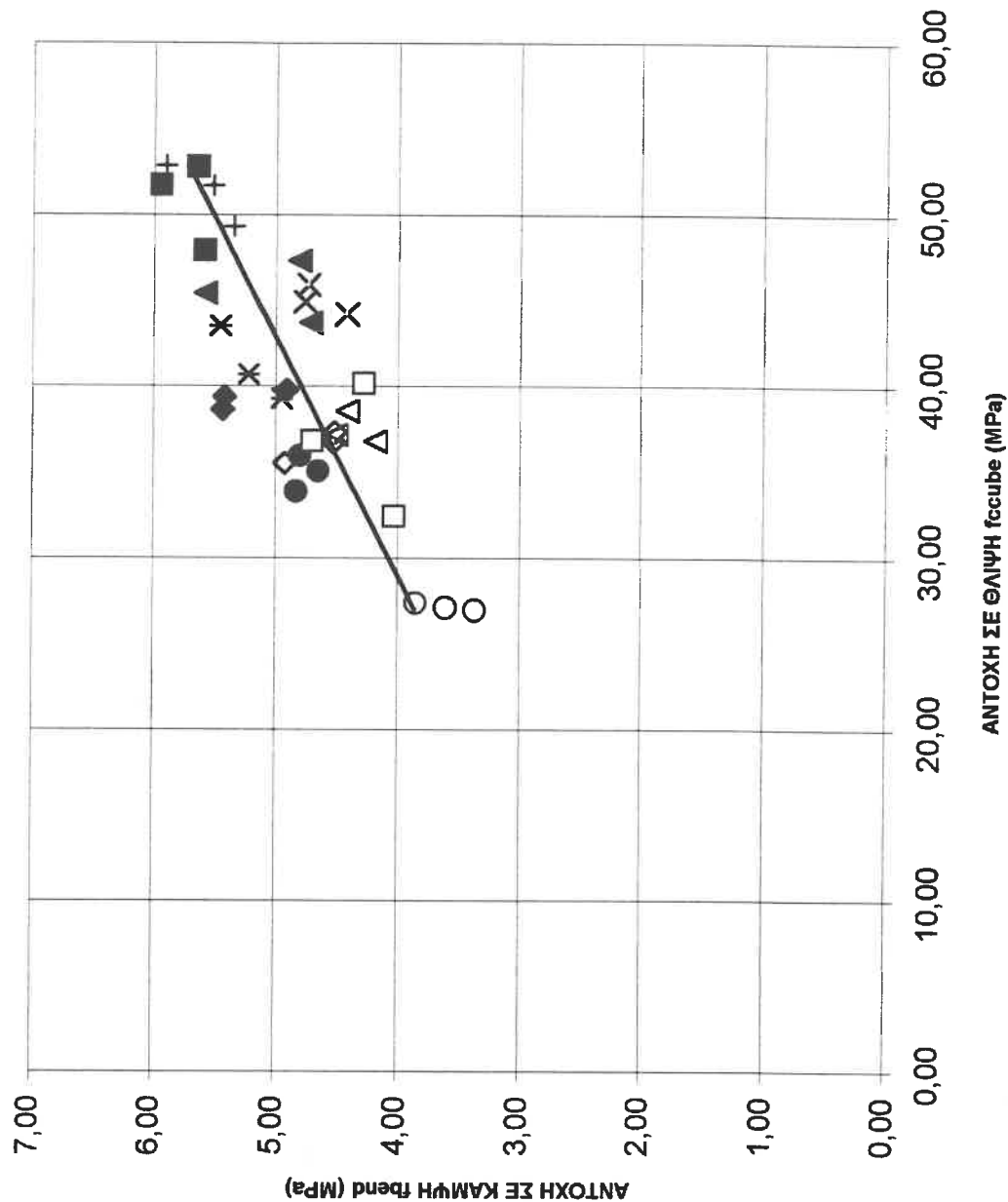
**ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4-ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΗΛΙΚΙΑ
(ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗΣ ΘΛΙΨΗΣ)**



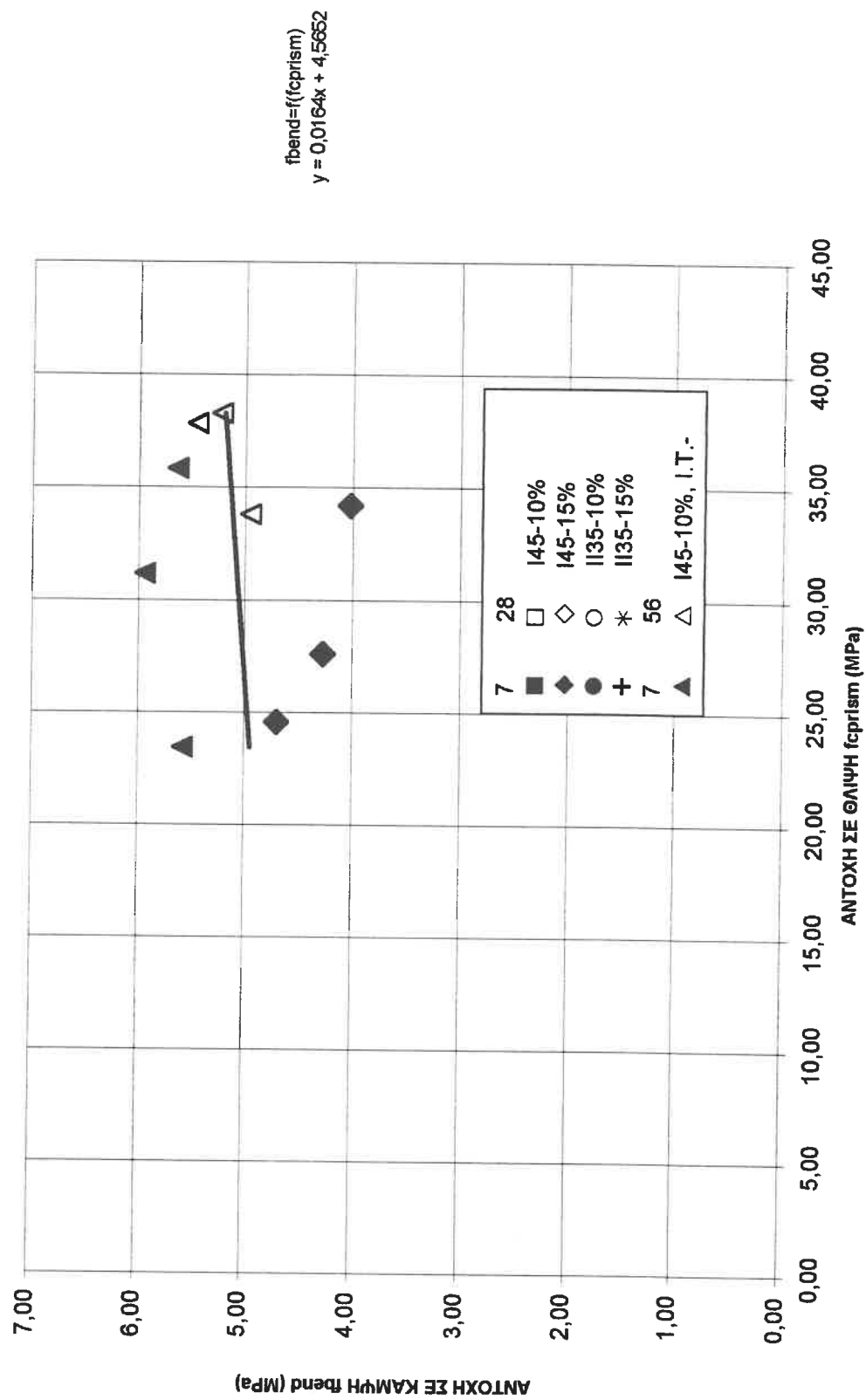
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5- ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΔΙΑΡΡΗΞΗ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΚΑΜΨΗ



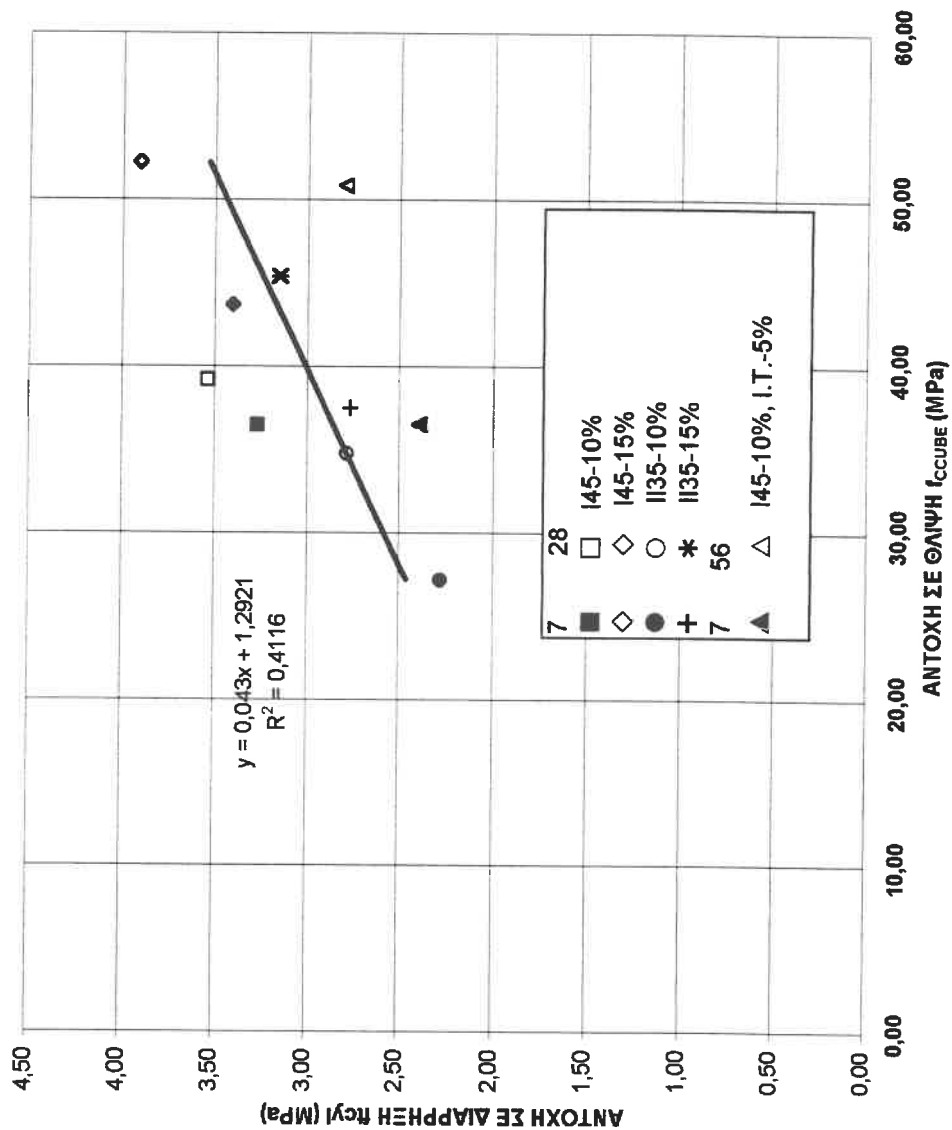
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6-ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ (ΙΣΟΔΥΝΑΜΟΥ ΚΥΒΟΥ)



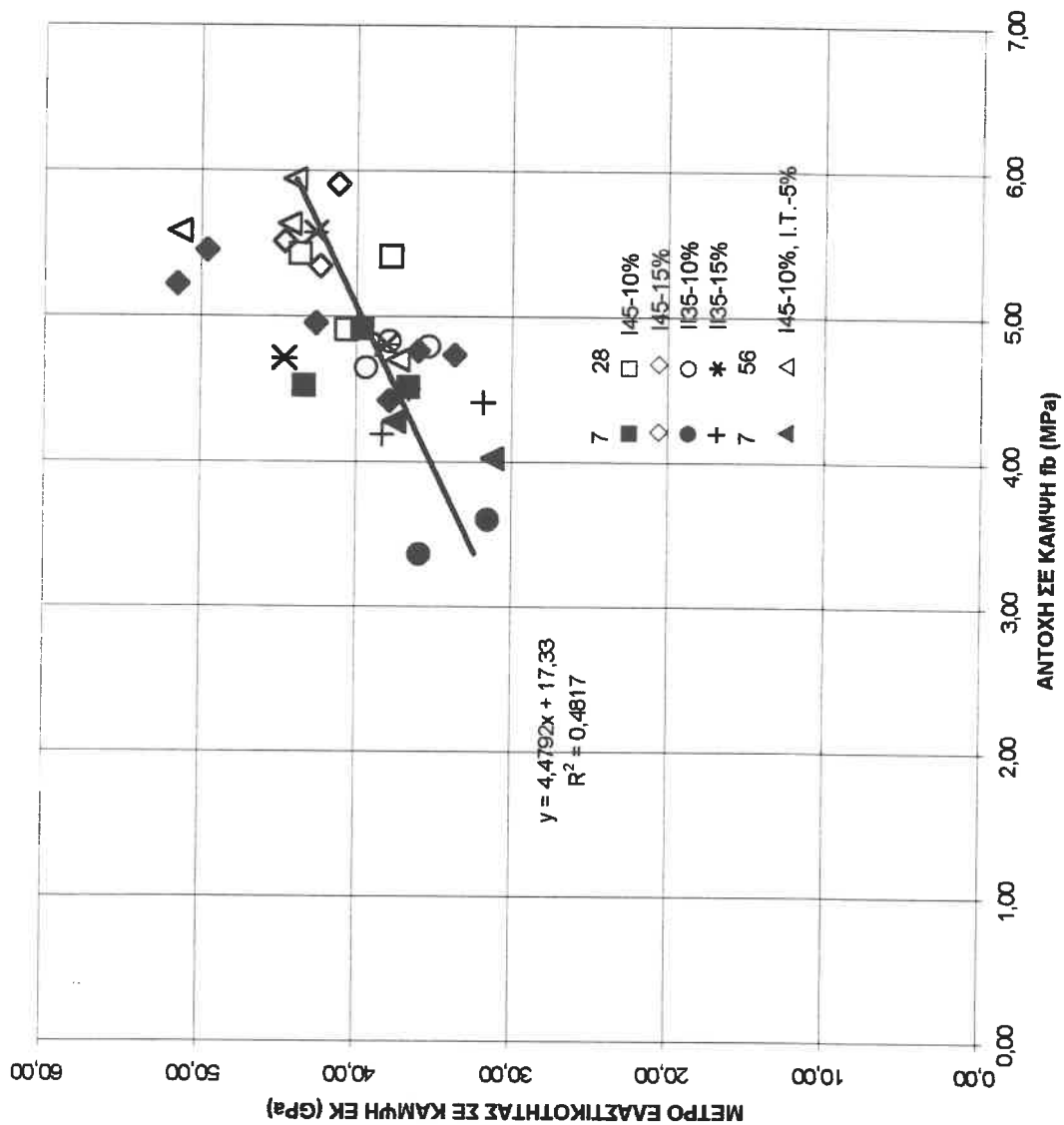
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7-ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ (ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗ ΘΛΙΨΗ)



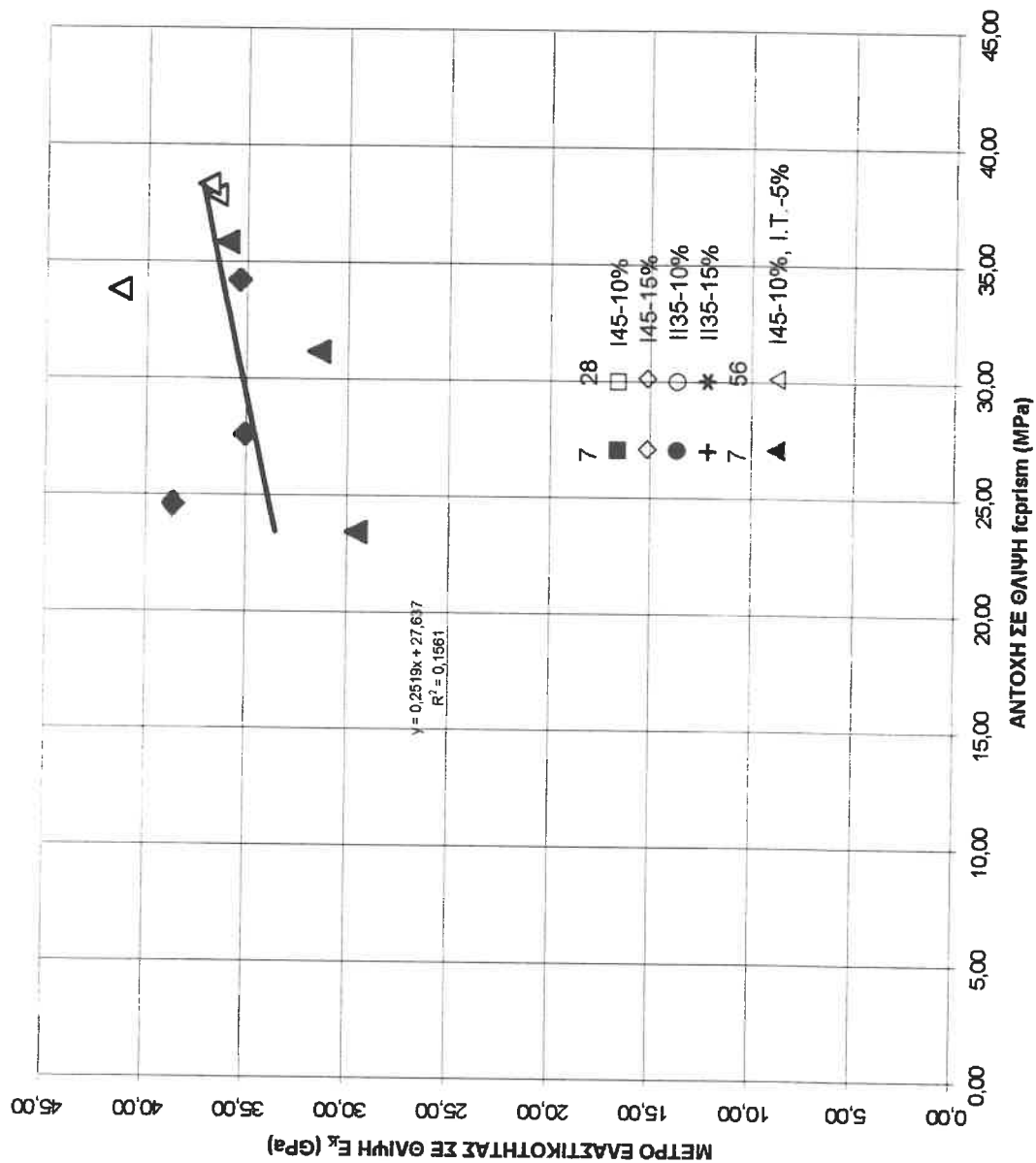
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8-ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΔΙΑΡΡΗΞΗ ΜΕ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ
ΘΛΙΨΗ



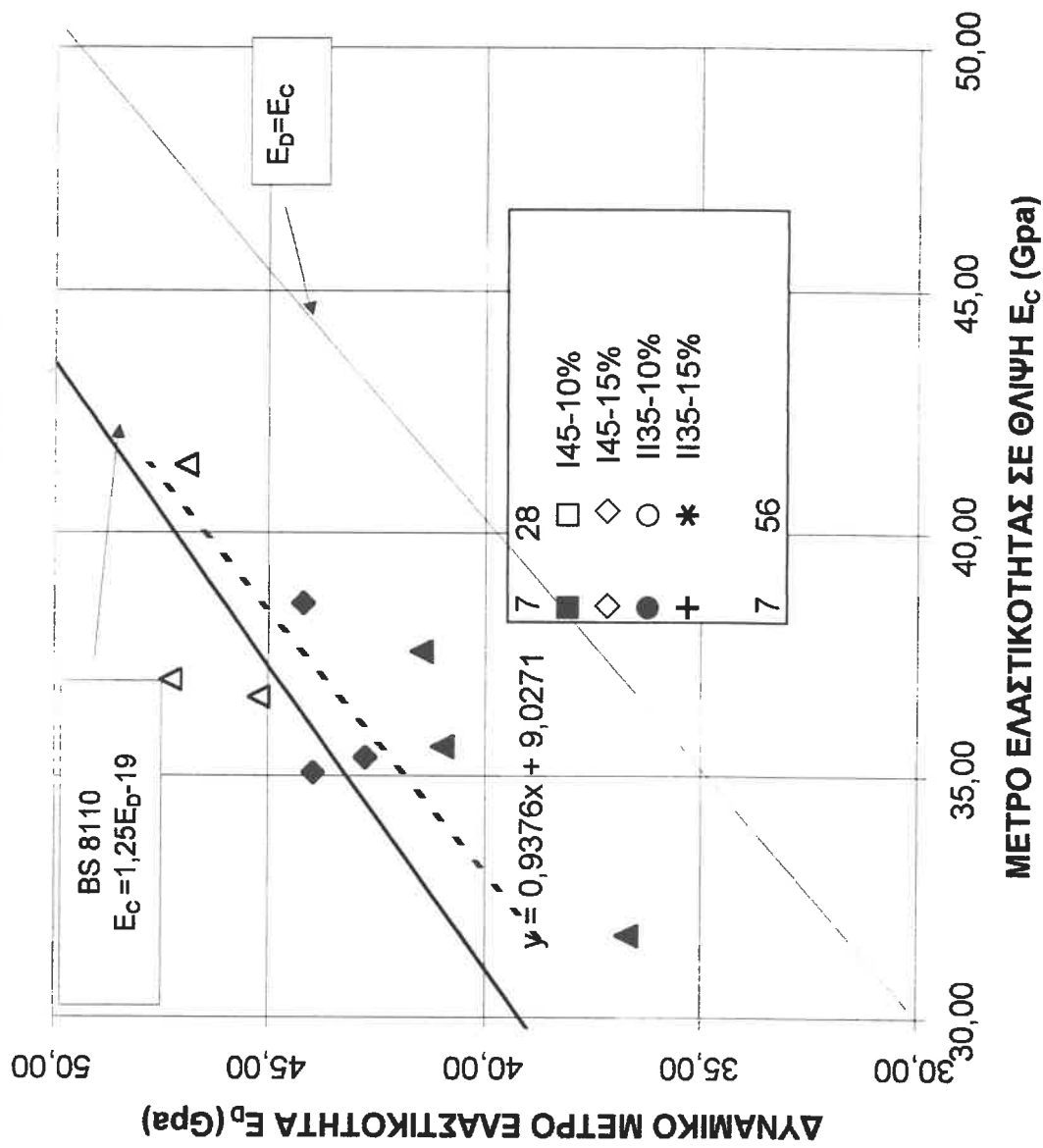
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9: ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΚΑΨΗ-ΚΑΙ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΚΑΨΗ



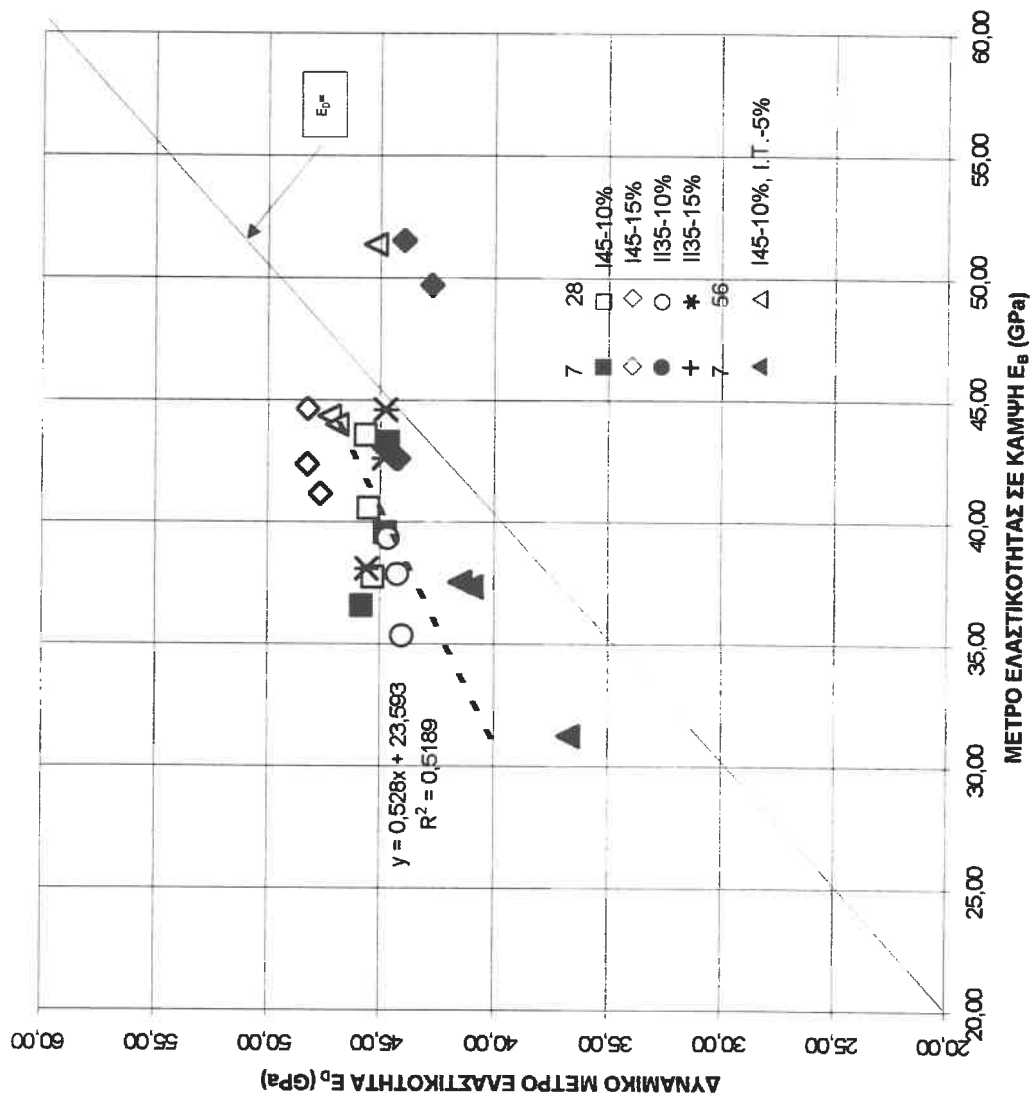
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10: ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ- ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ



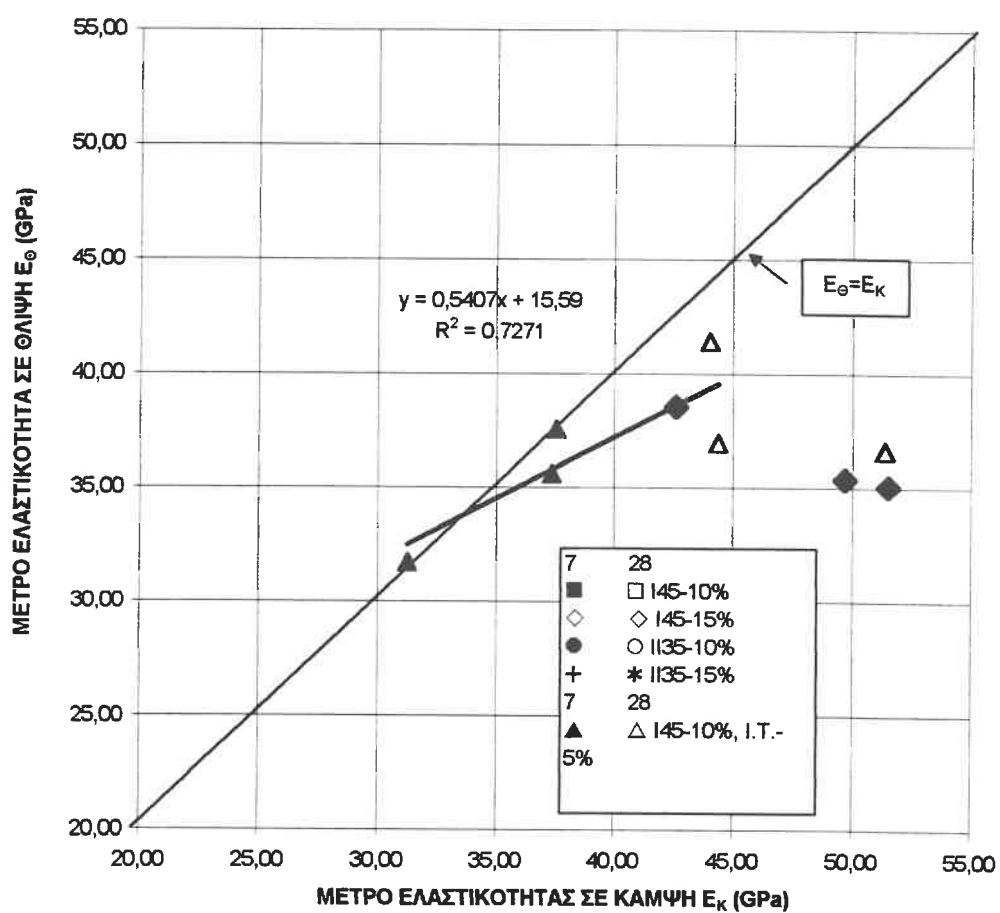
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 11: ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ - ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ



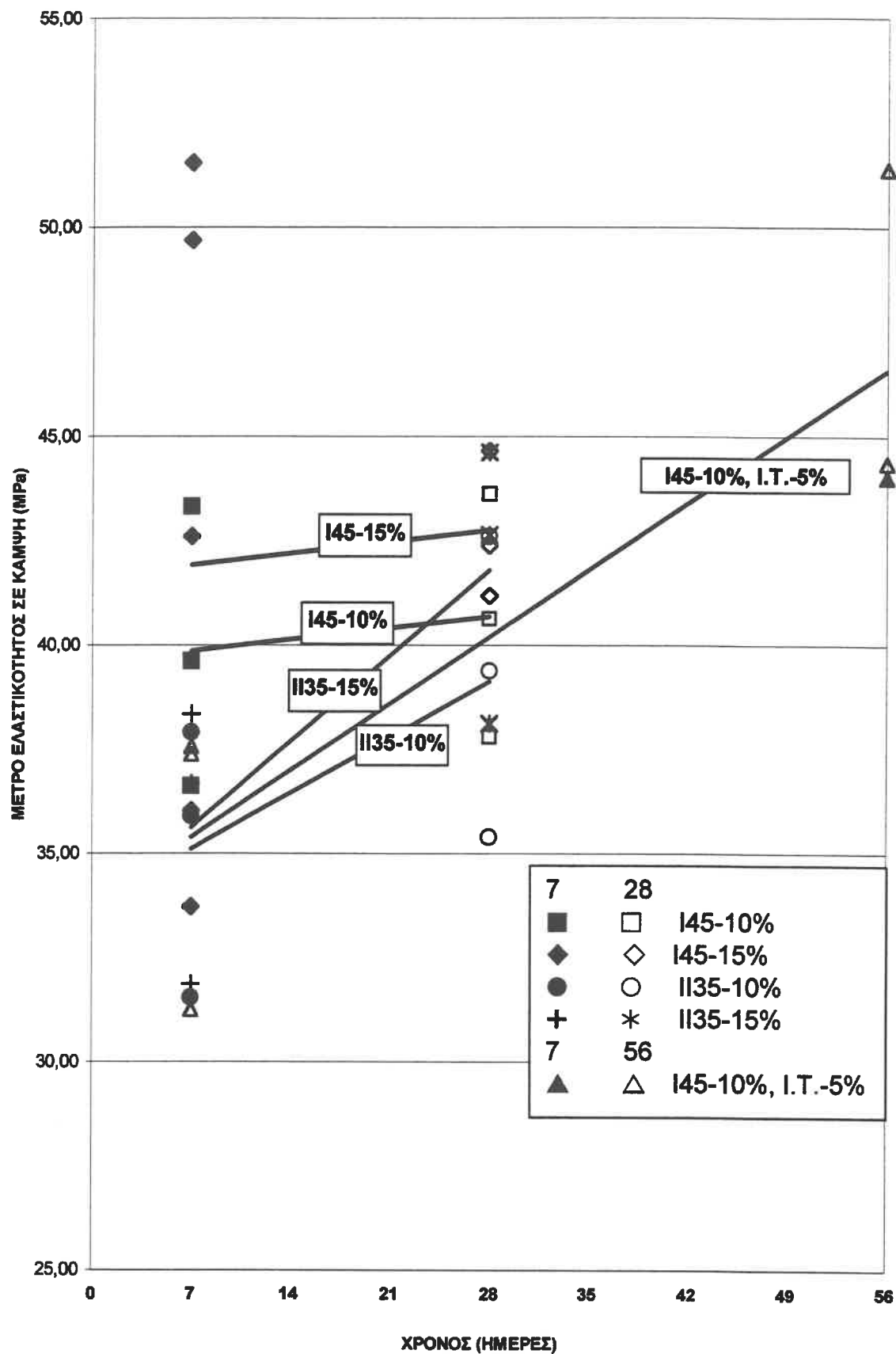
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 12: ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΚΑΜΨΗ-ΔΥΝΑΜΙΚΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ



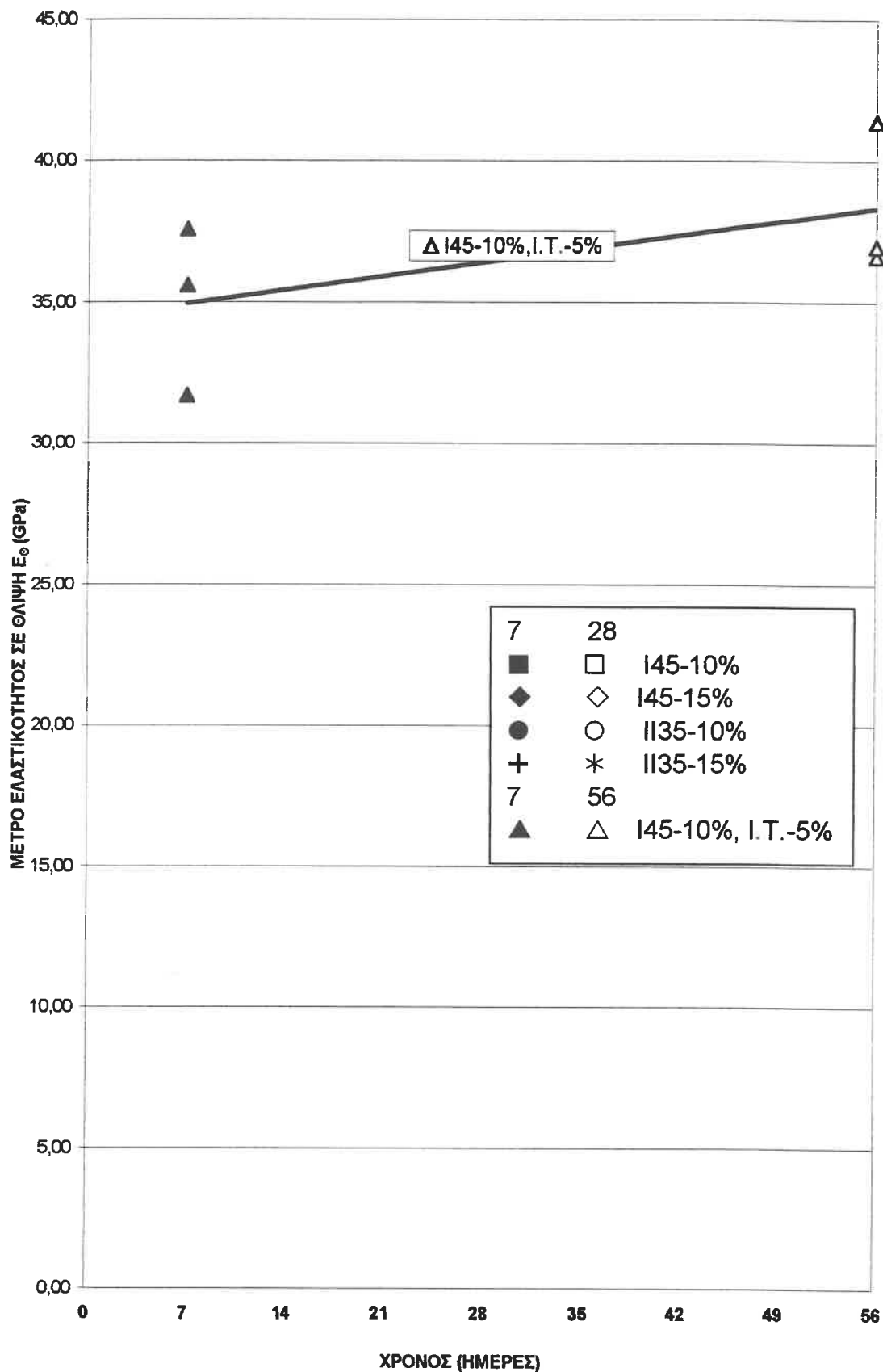
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 13: ΣΥΣΧΕΤΙΣΗ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΚΑΜΨΗ- ΜΟΝΟΑΞΟΝΙΚΗ ΘΛΙΨΗ

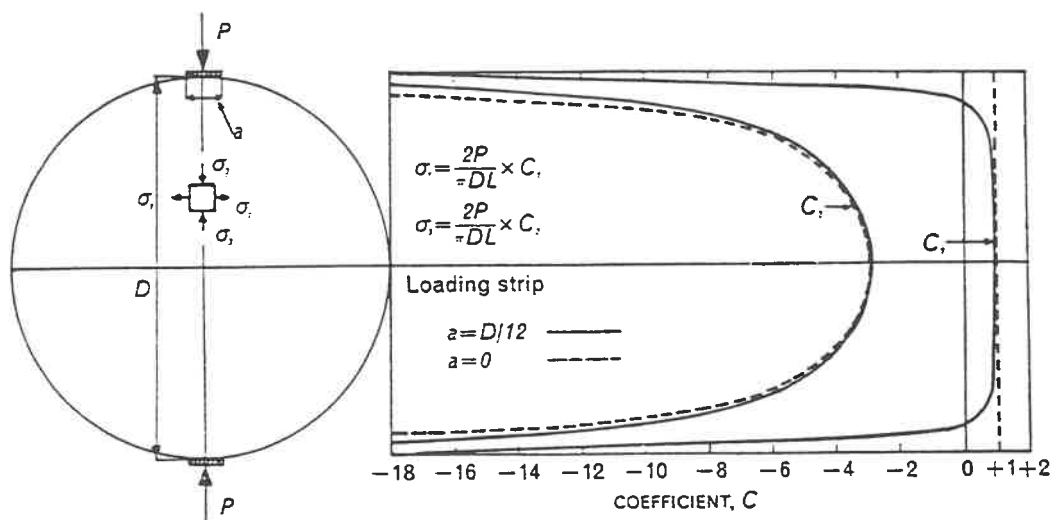


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 14:-ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΚΑΜΨΗ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΗΛΙΚΙΑ



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 15:-ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗ ΣΕ ΣΧΕΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΗΛΙΚΙΑ

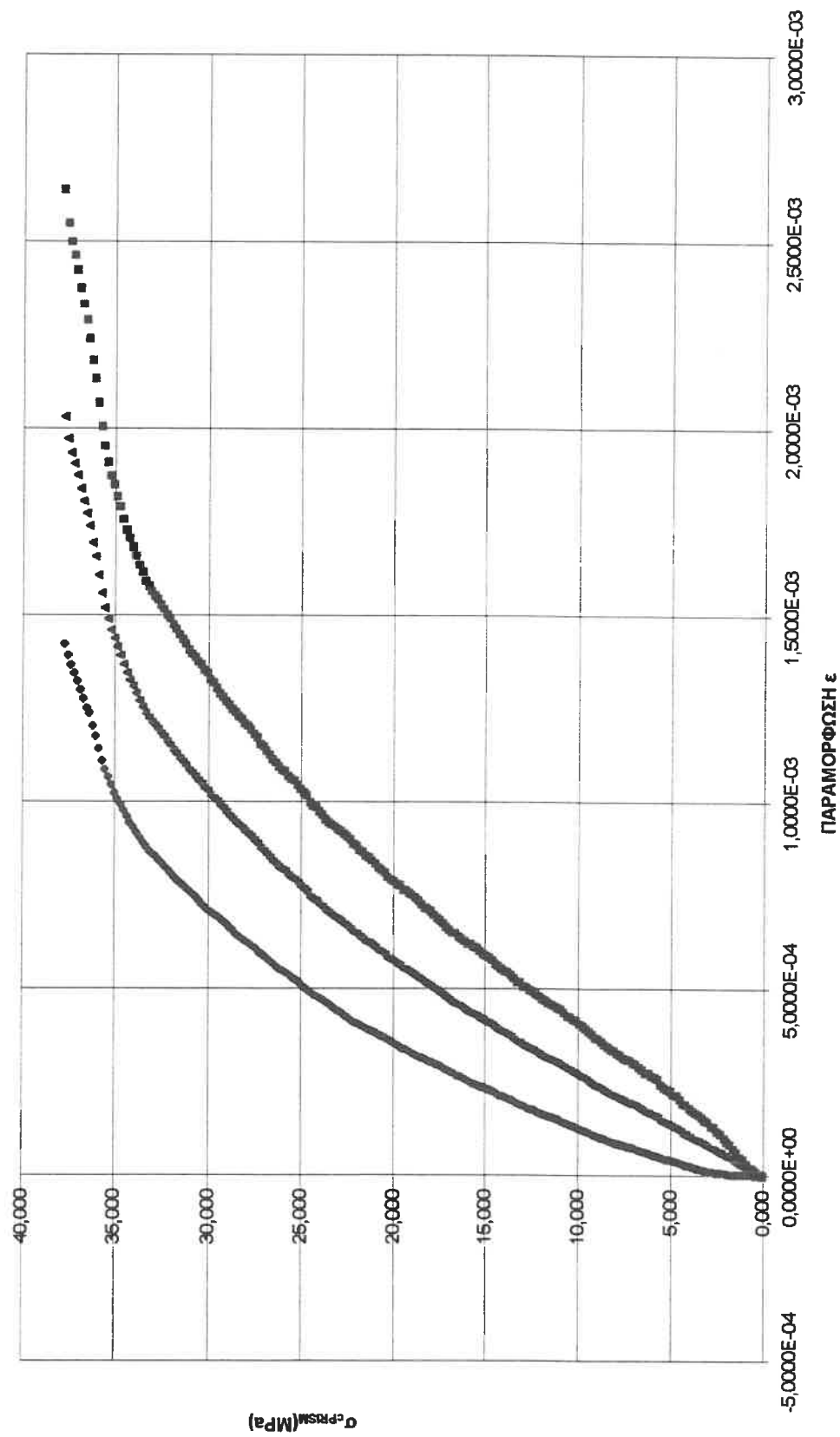




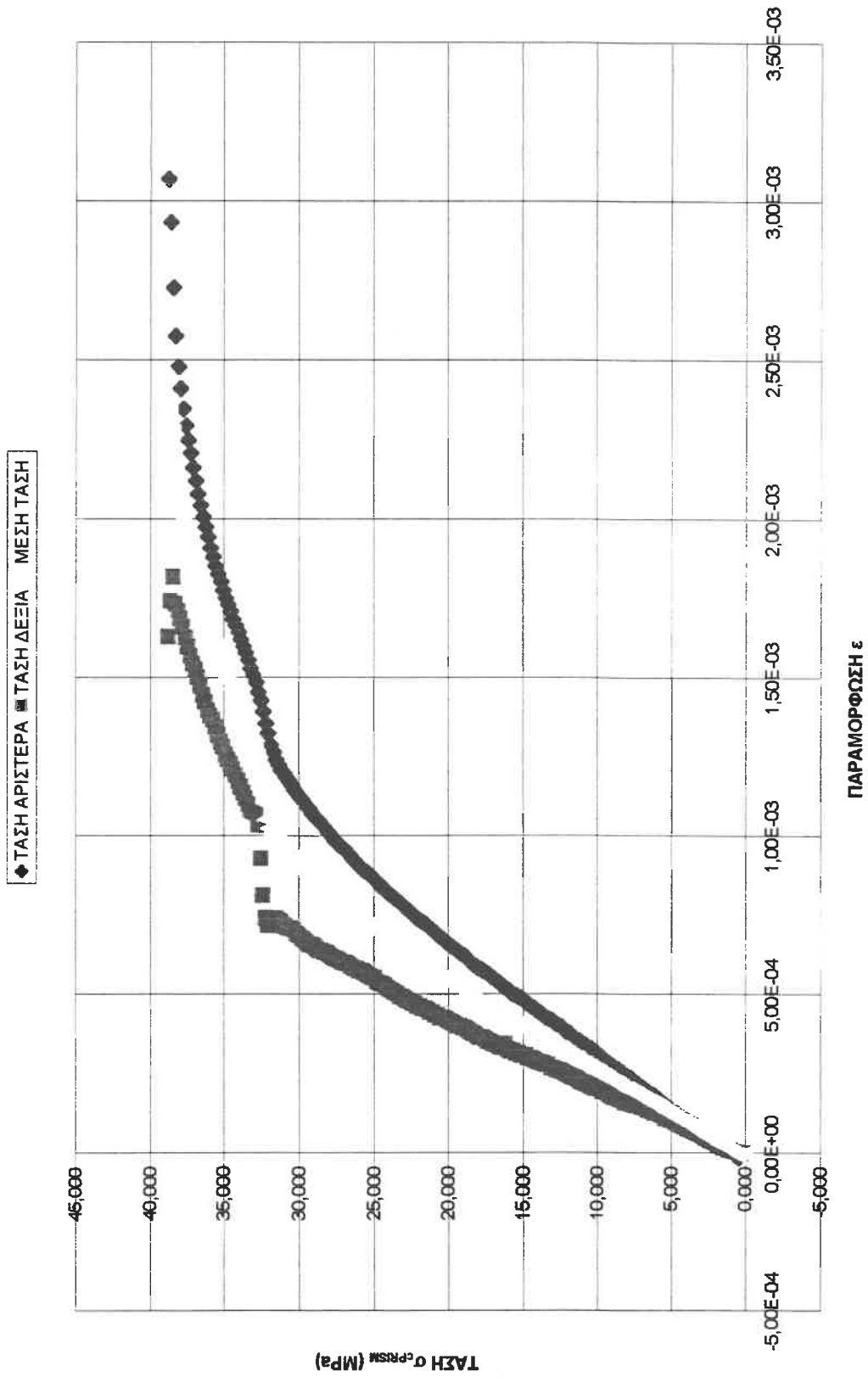
Σχήμα . Κατανομή οριζόντιων και κατακόρυφων τάσεων κατά μήκος της κατακόρυφης διαμέτρου του δοκιμίου στην δοκιμή διάρρηξης κυλίνδρου

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΕ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗ ΘΛΙΨΗ
ΔΟΚΙΜΙΟΥ Α-ΦΟΡΤΙΣΗ 6-(ΘΡΑΥΣΗ)

• ΑΡΙΣΤΕΡΑ ■ ΔΕΞΙΑ ▲ ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ

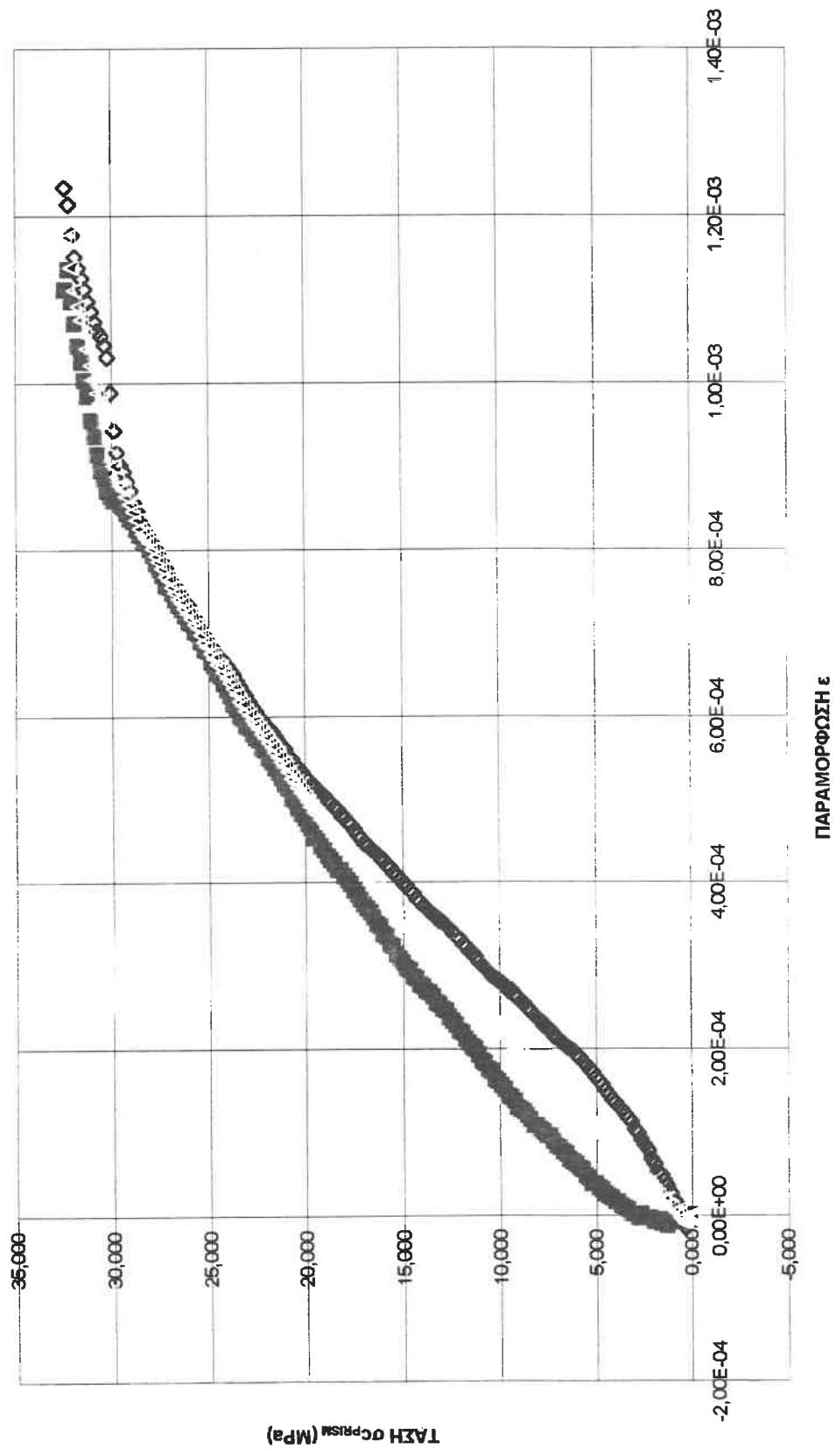


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΕ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗ ΘΛΙΨΗ
ΔΟΚΙΜΙΟΥ Β-ΦΟΡΤΙΣΗ 3 (ΘΡΑΥΣΗ)

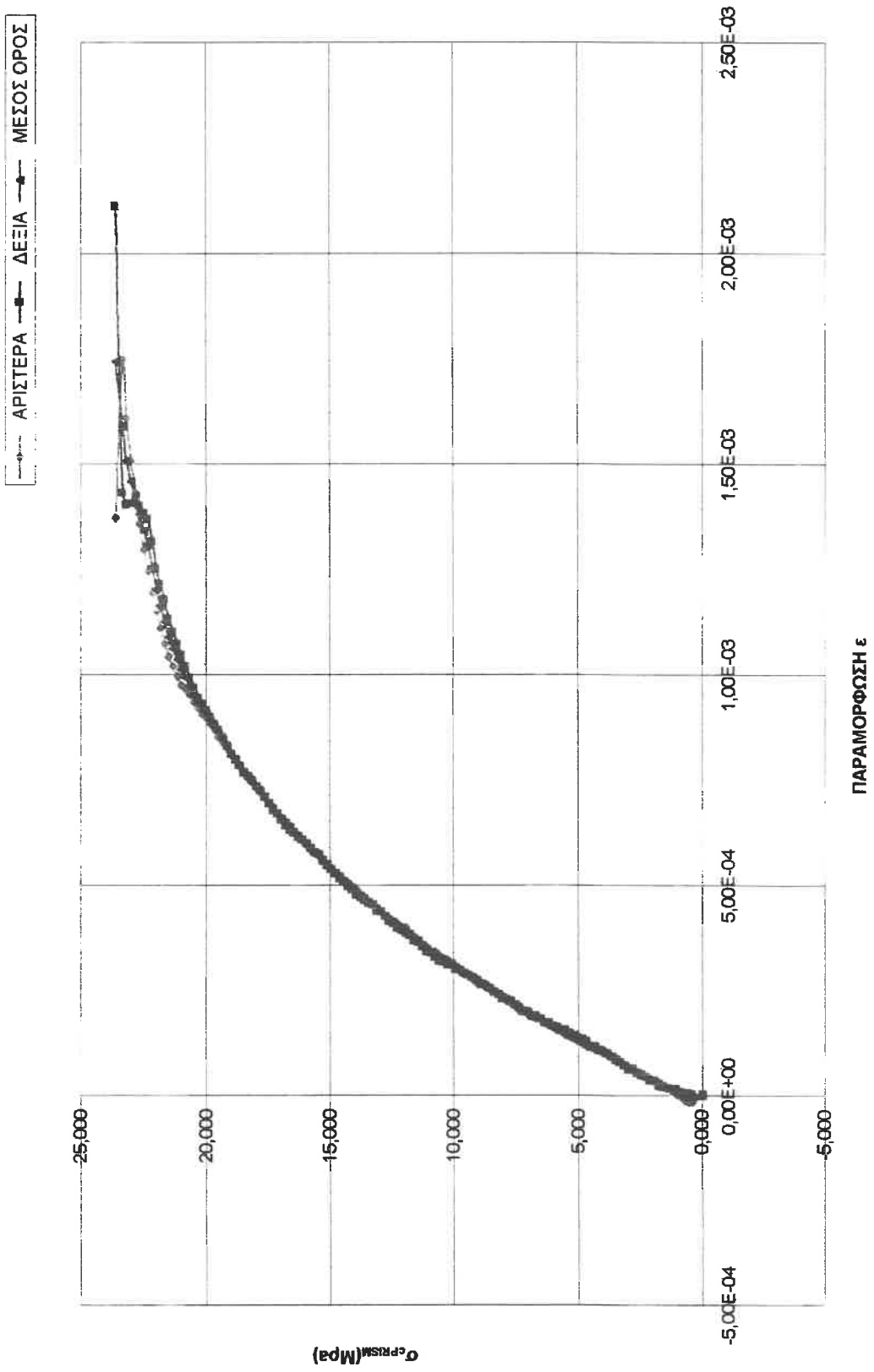


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ
ΔΟΚΙΜΙΟΥ Γ-ΦΟΡΤΙΣΗ 3-ΘΡΑΥΣΗ

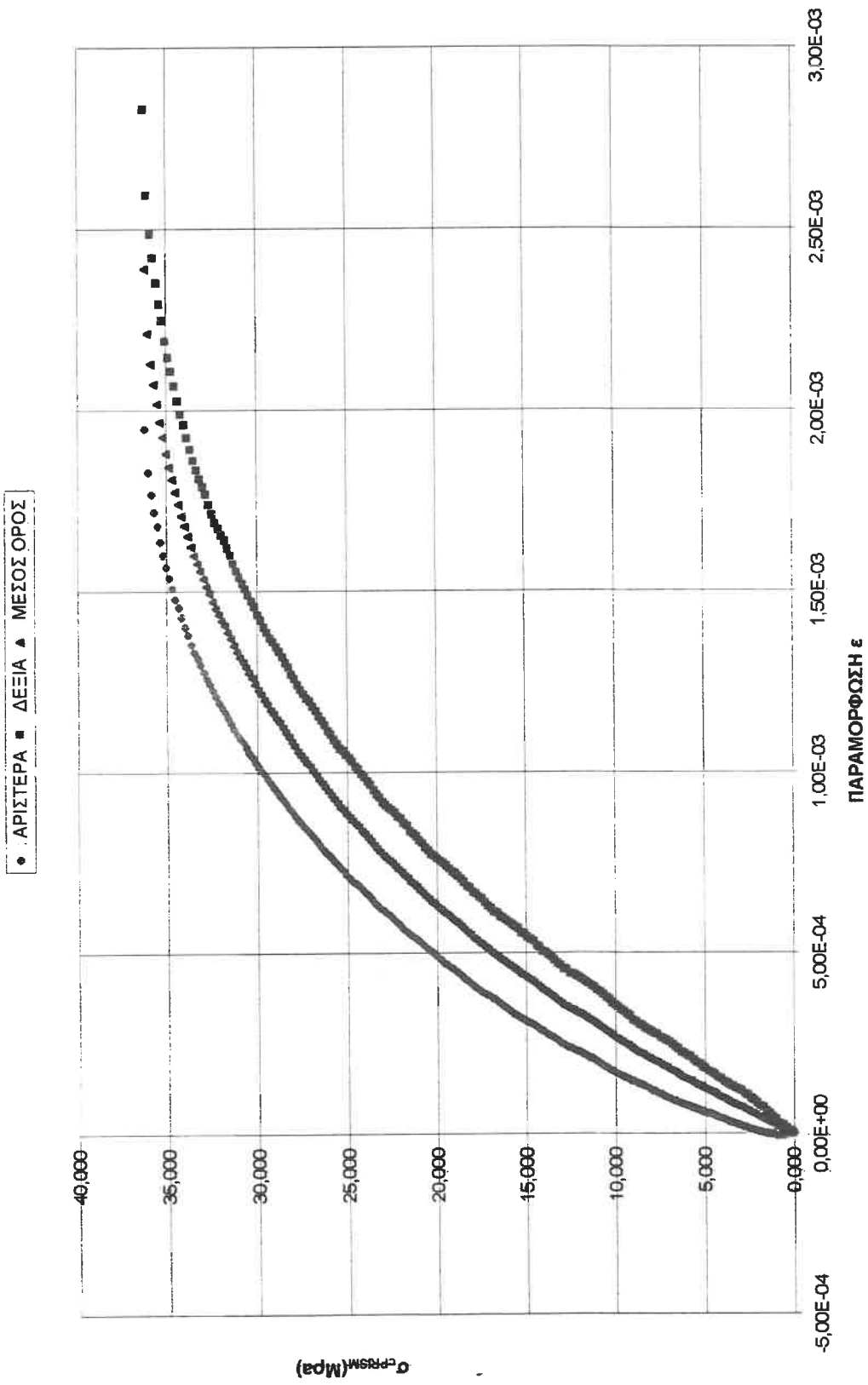
◇ ΤΑΣΗ ΑΡΙΣΤΕΡΑ ■ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ
ΔΟΚΙΜΙΟΥ Δ -ΦΟΡΤΙΣΗ 5 ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ-ΘΡΑΥΣΗ

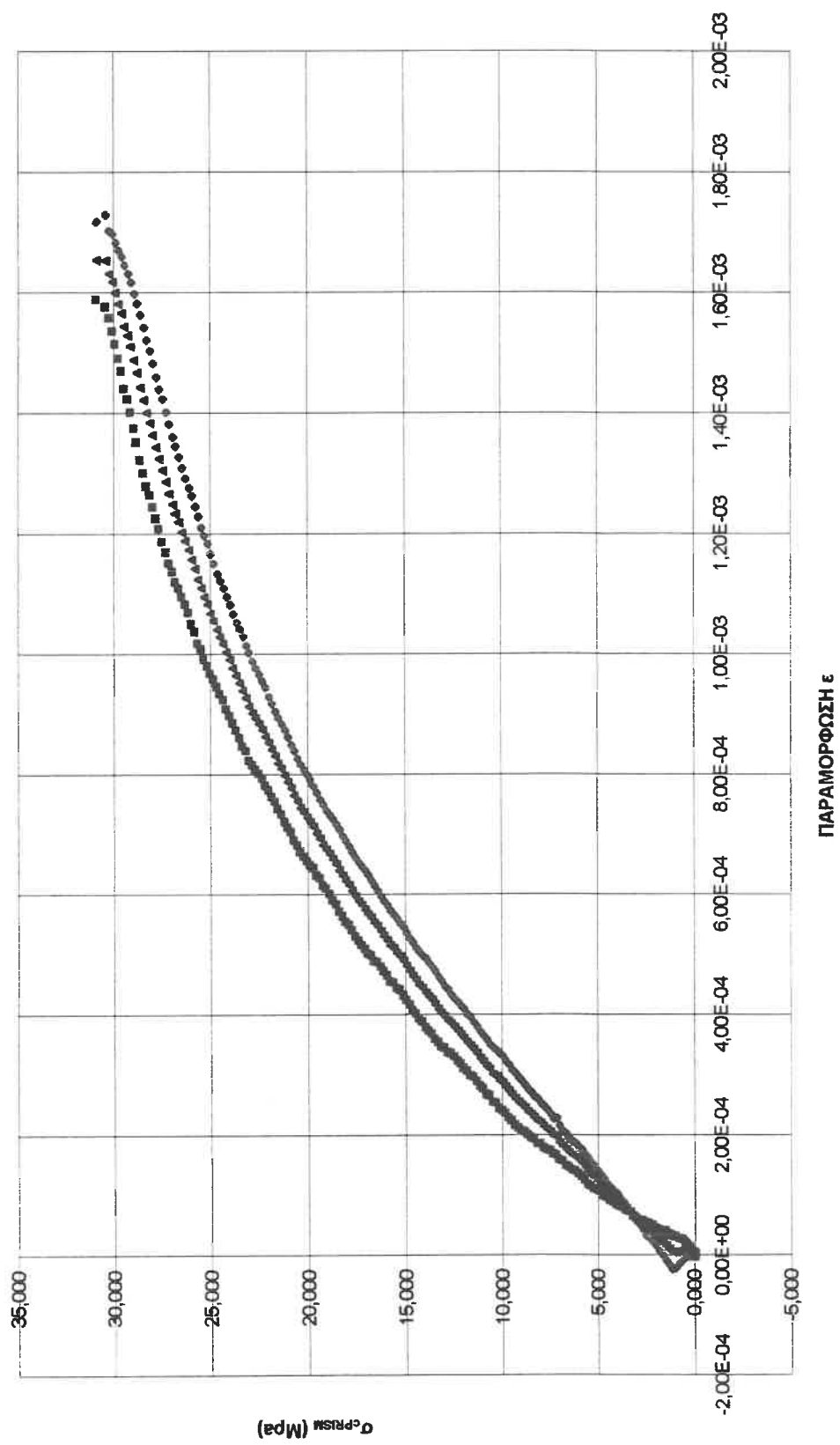


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΕ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗ ΘΛΙΨΗ
ΔΟΚΙΜΙΟΥ Ε-ΦΟΡΤΙΣΗ 5 (ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ-ΘΡΑΥΣΗ)

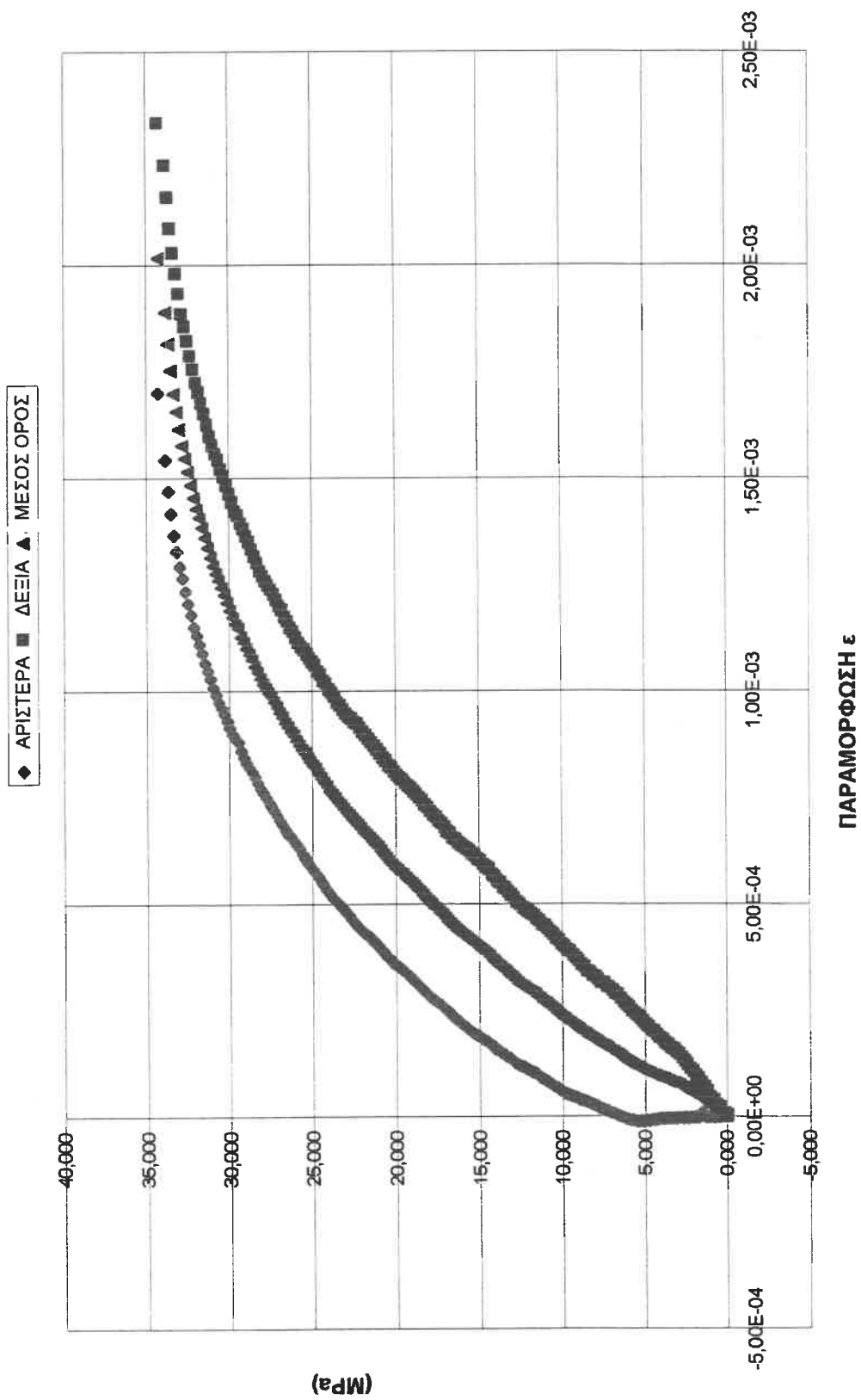


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ
ΔΟΚΙΜΙΟΥ Ζ-ΦΟΡΤΙΣΗ 5-ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ-ΘΡΑΥΣΗ

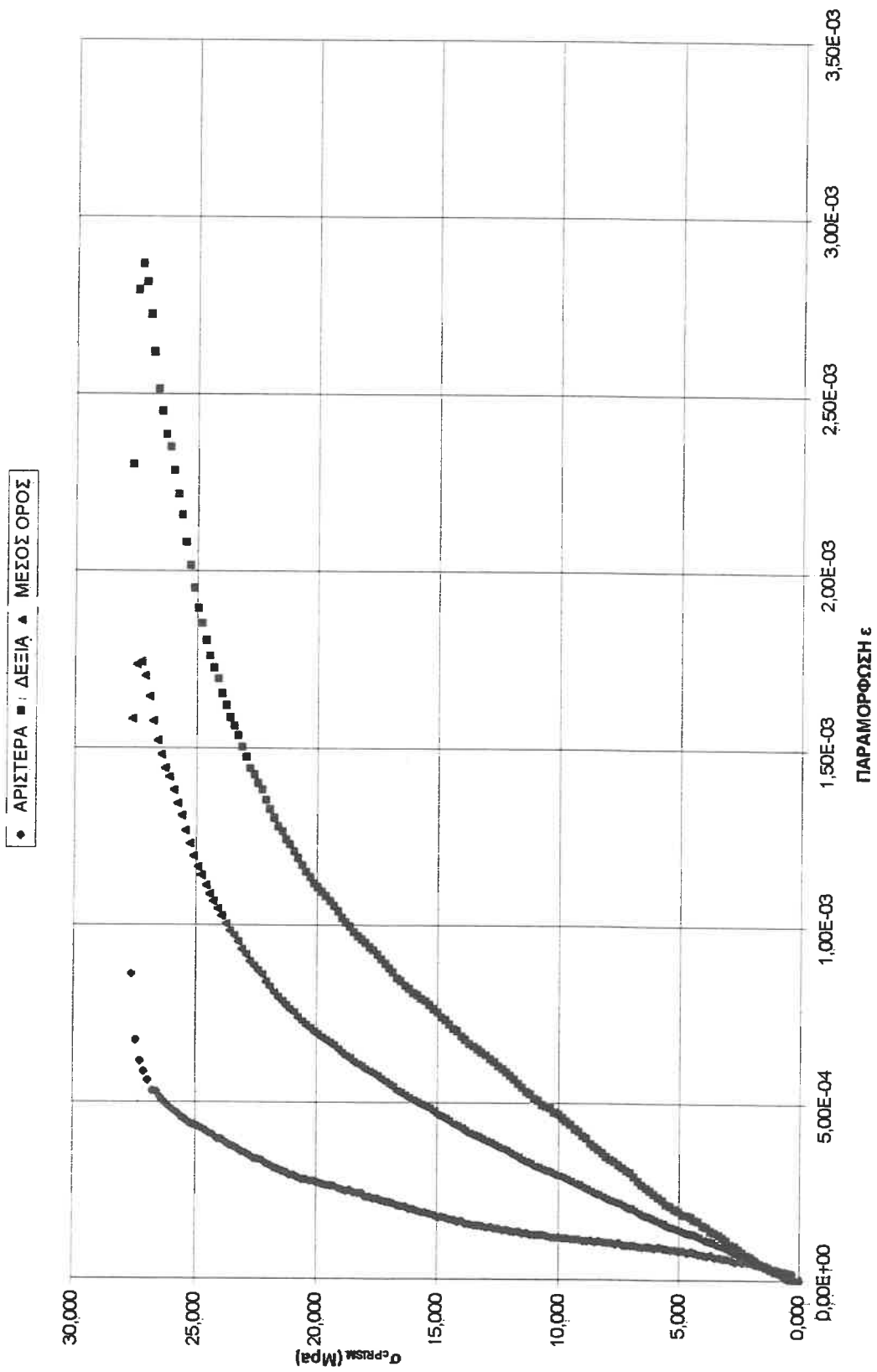
◆ ΑΡΙΣΤΕΡΑ ■ ΔΕΞΙΑ ▲ ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ



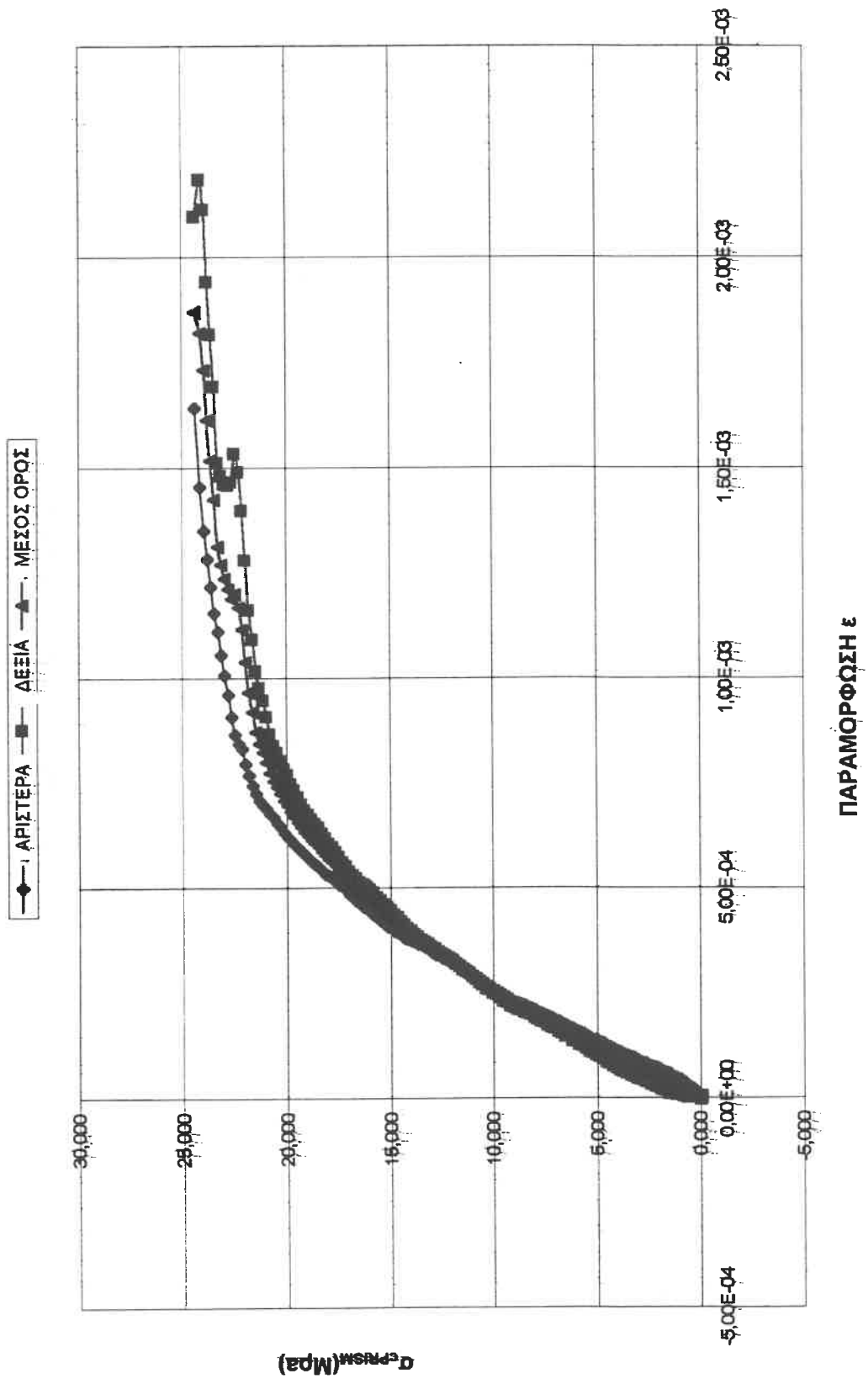
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ
ΔΟΚΙΜΙΟΥ Η-ΦΟΡΤΙΣΗ 5 ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ-ΘΡΑΥΣΗ



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΕ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗ ΘΛΙΨΗ
ΔΟΚΙΜΙΟΥ Θ-ΦΟΡΤΙΣΗ 4 (ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ-ΘΡΑΥΣΗ)

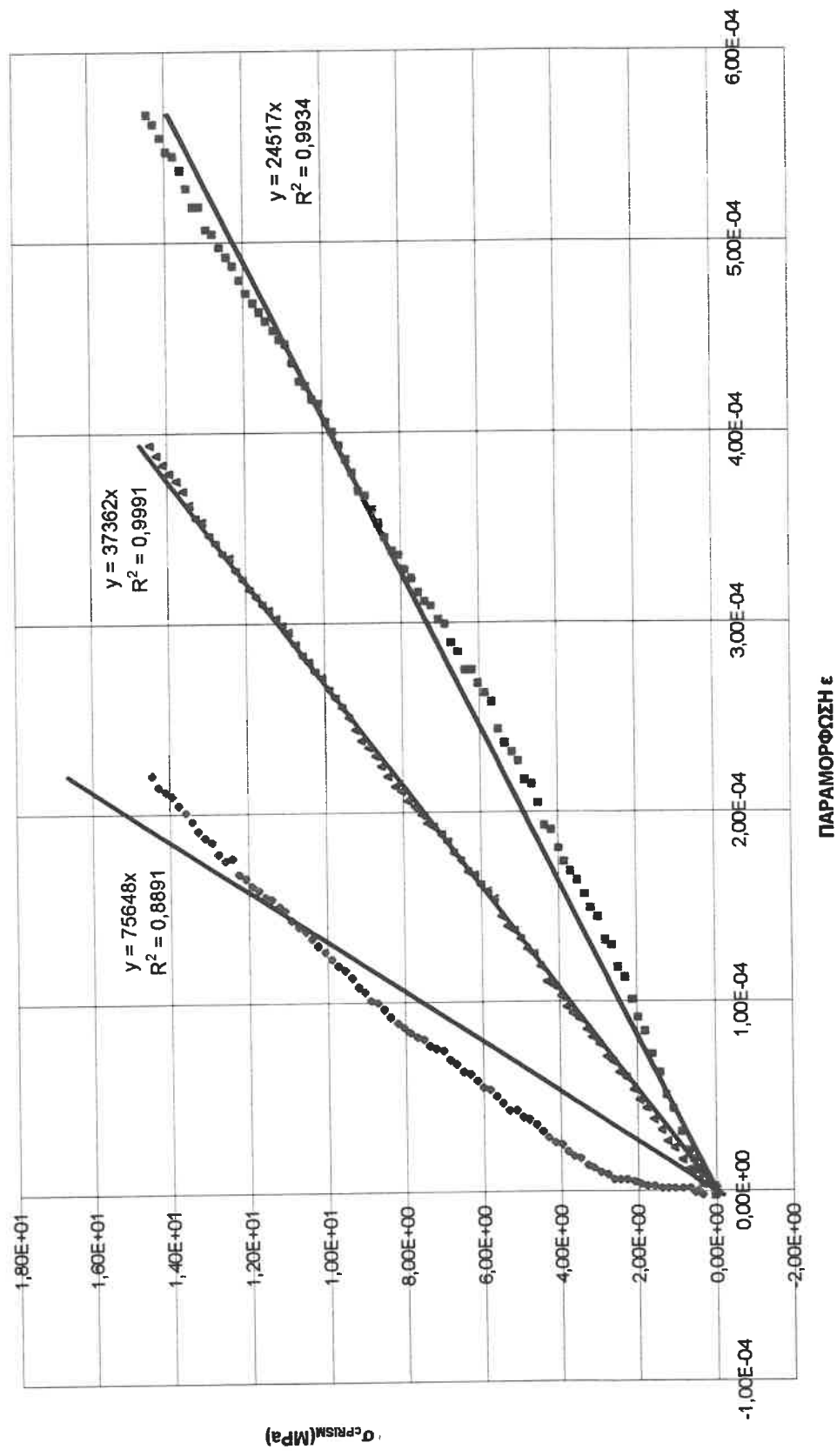


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΕ ΑΝΕΜΠΟΛΙΣΤΗ ΘΛΙΨΗ
ΔΟΚΙΜΙΟΥ Ι-ΦΟΡΤΙΣΗ 3 (ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ-ΦΡΑΥΣΗ)

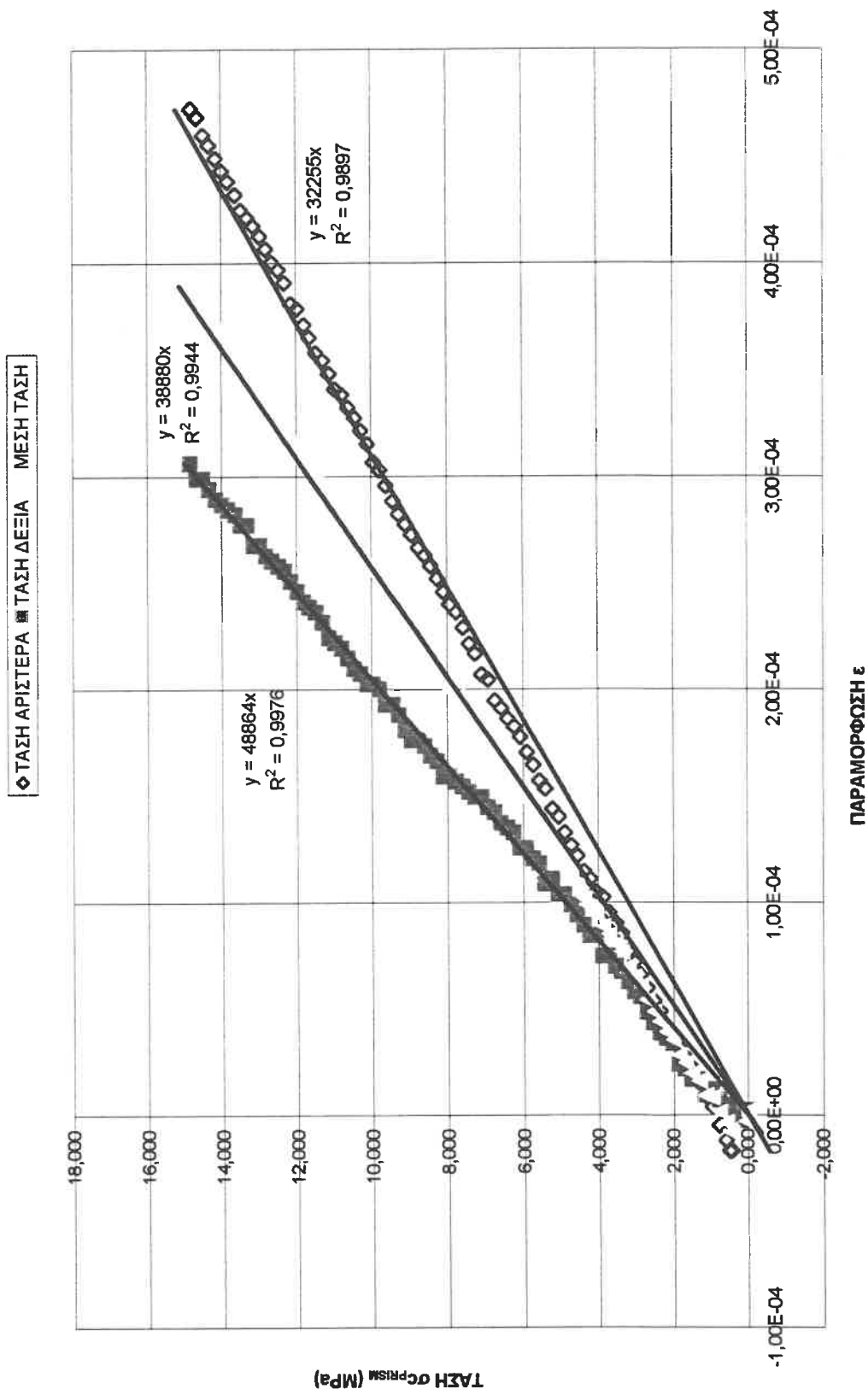


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΔΟΚΙΜΙΟΥ Α-ΦΟΡΤΙΣΗ 6-ΘΡΑΥΣΗ

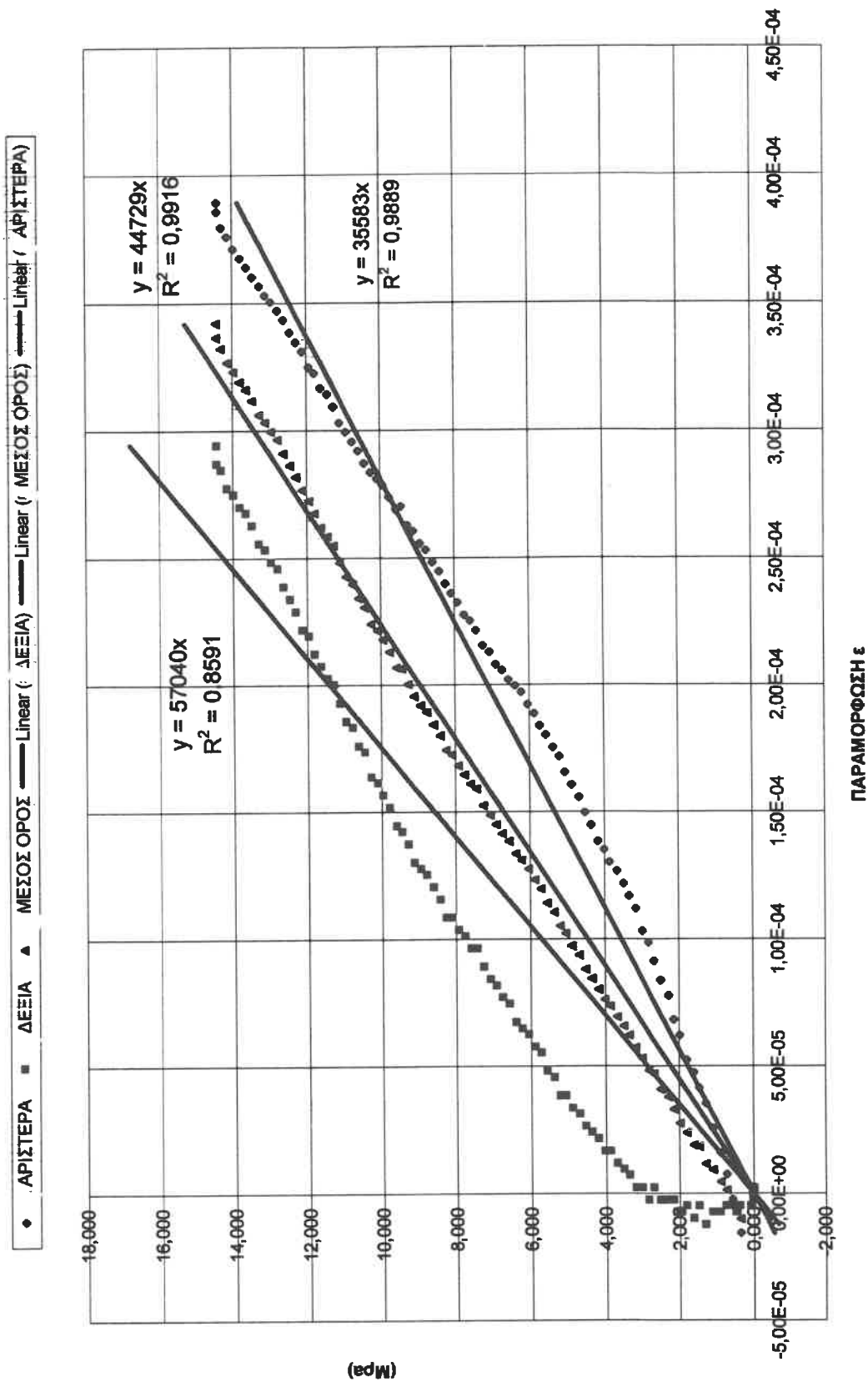
◆ ΤΑΣΗ ΑΡΙΣΤΕΡΑ ■ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ ▲ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΕ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗ ΘΛΙΨΗ
ΔΟΚΙΜΙΟΥ Β-ΦΟΡΤΙΣΗ 3-ΘΡΑΥΣΗ

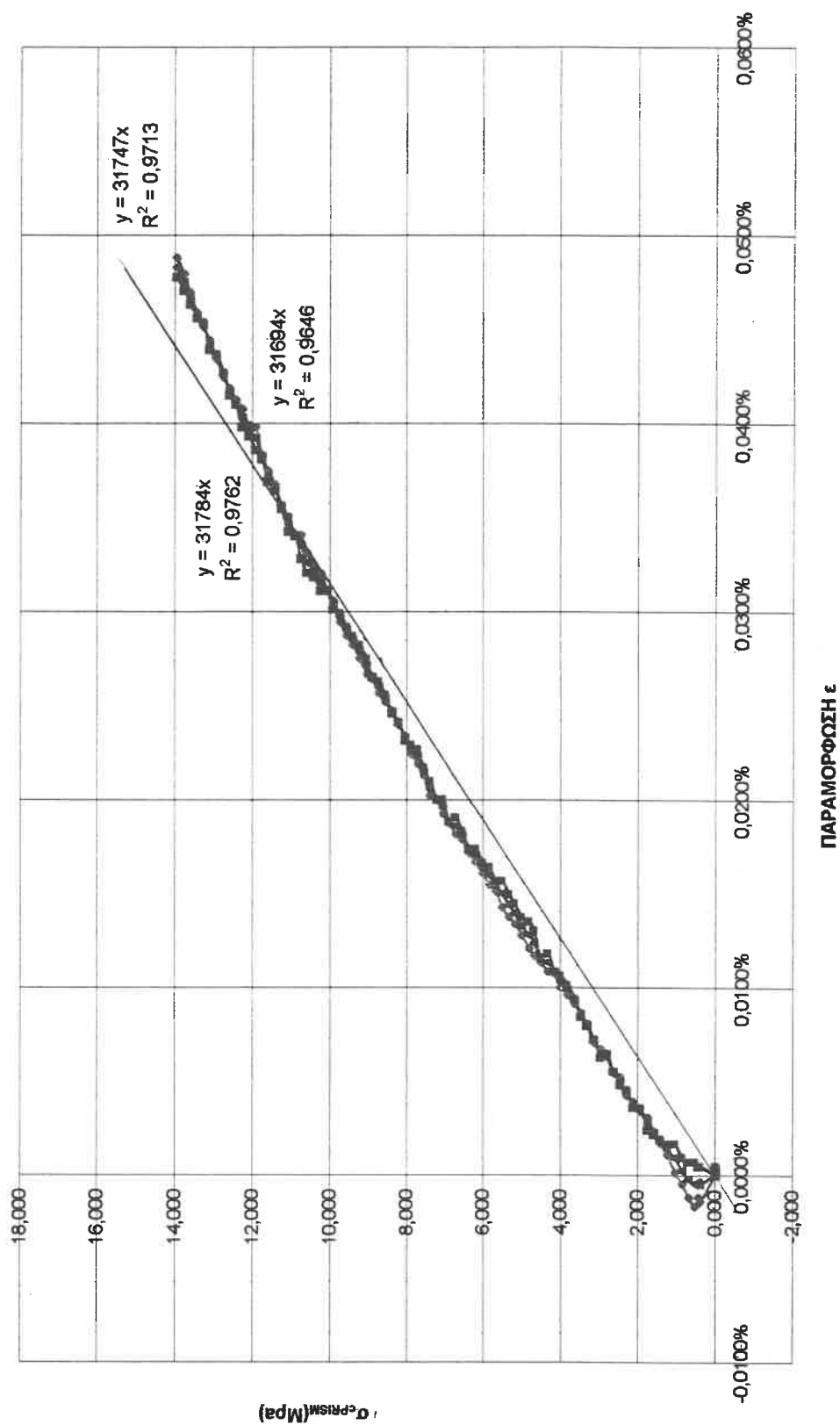


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ
ΔΟΚΙΜΙΟΥ Γ-ΦΟΡΤΙΣΗ 3-ΘΡΑΥΣΗ

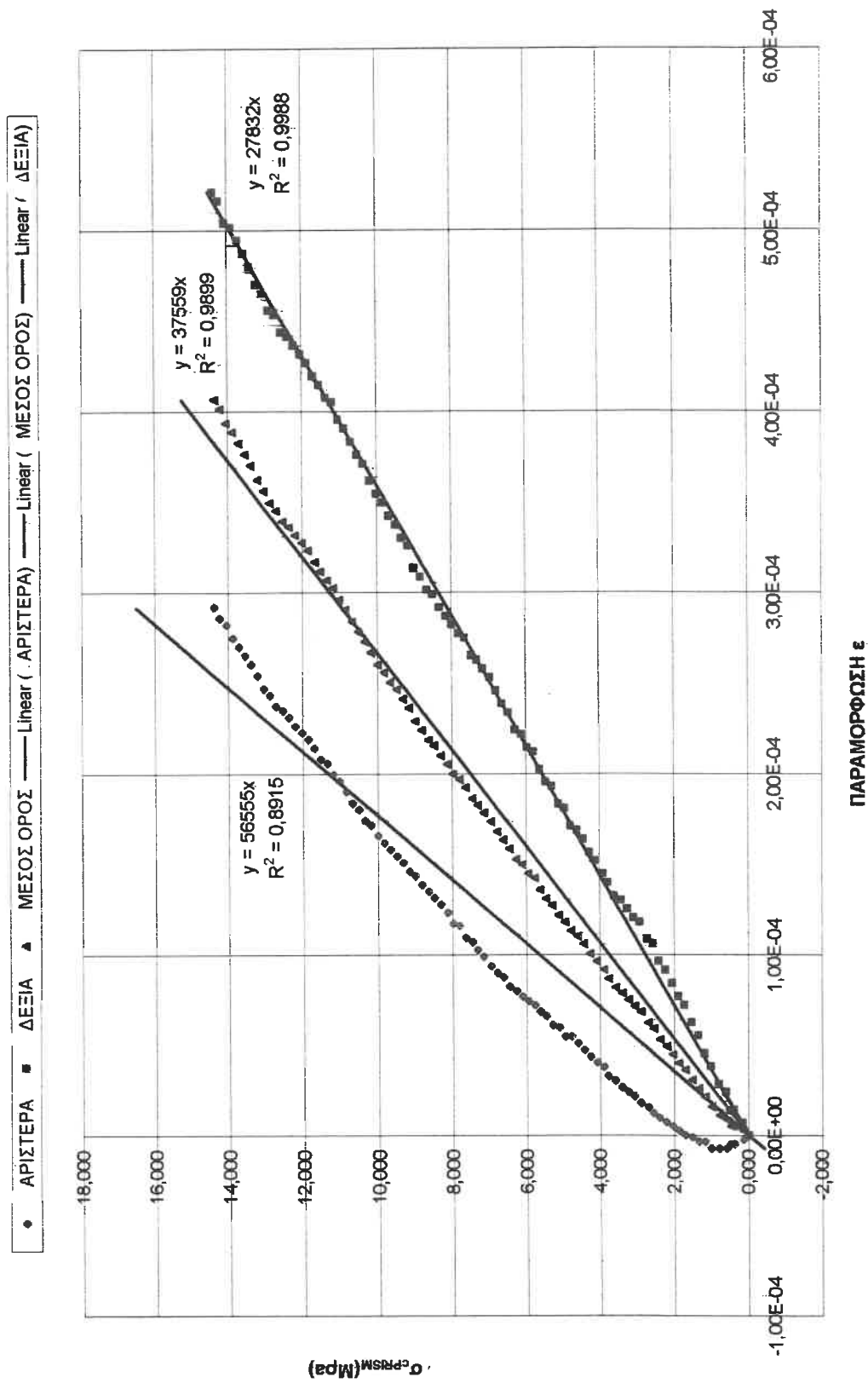


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ
ΔΟΚΙΜΙΟΥ Δ -ΦΟΡΤΙΣΗ 5 ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ-ΘΡΑΥΣΗ

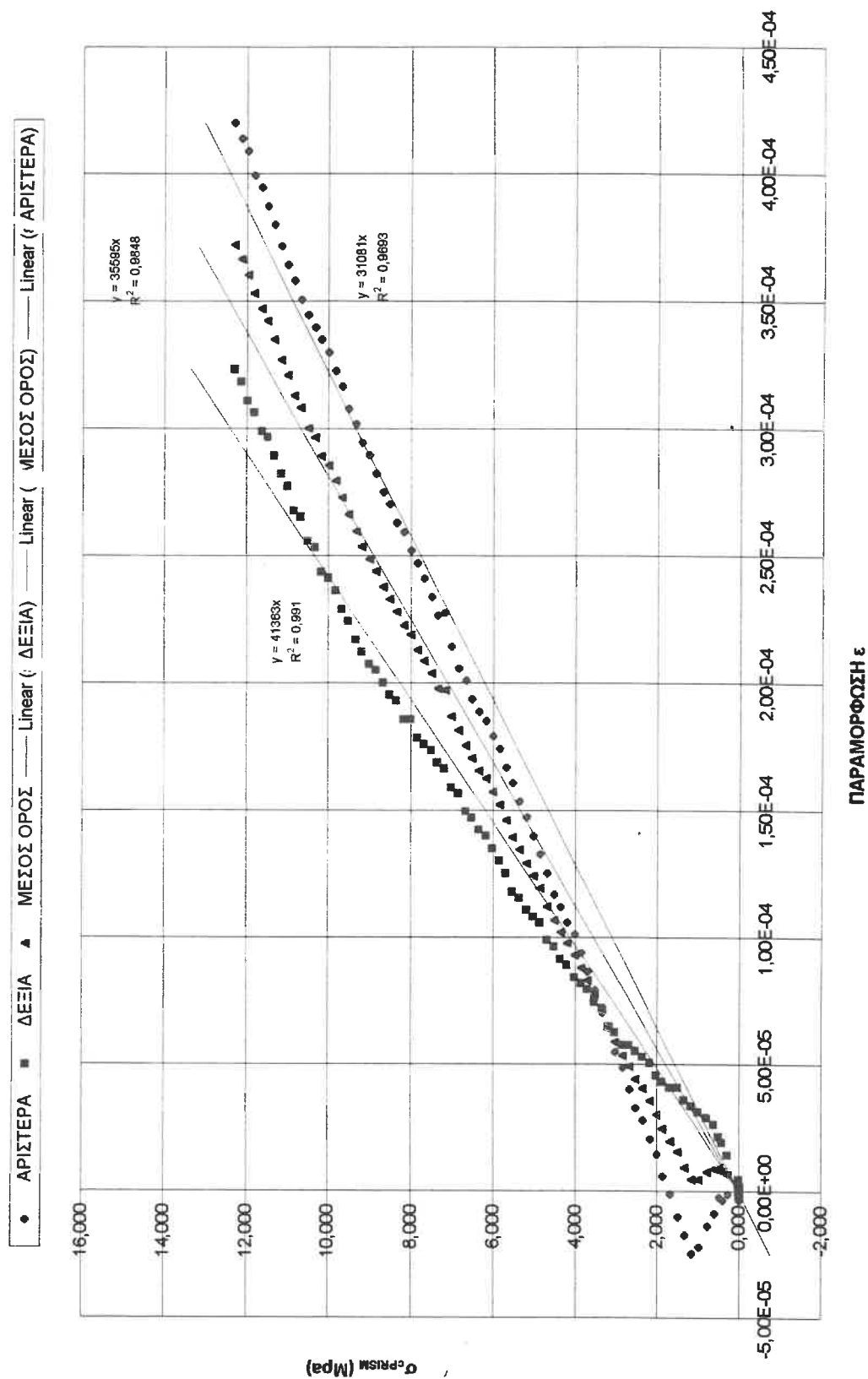
—•— ΑΡΙΣΤΕΡΑ —■— ΔΕΞΙΑ —•— ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ — Linear (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) — Linear (ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ) — Linear (ΔΕΞΙΑ)



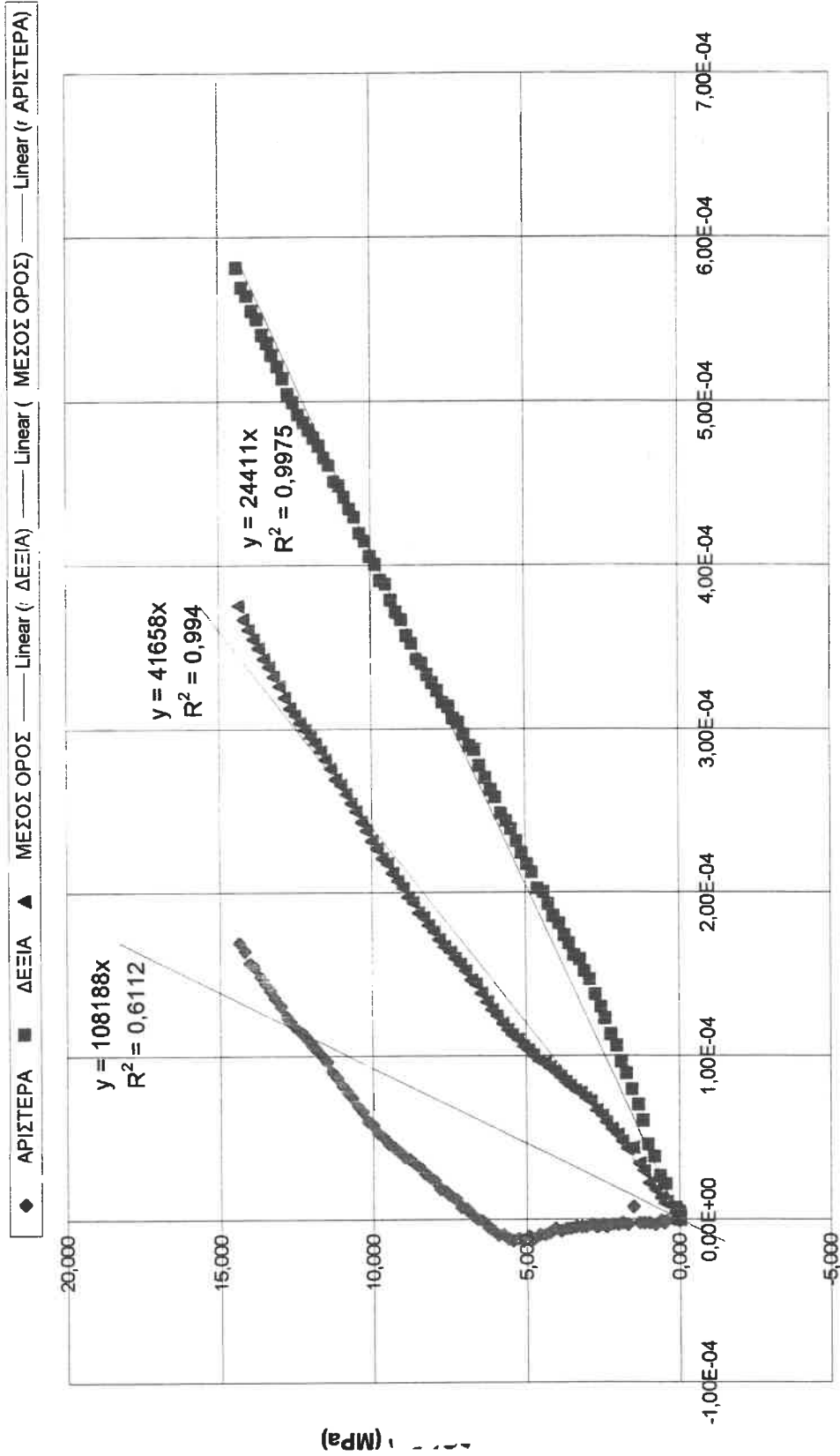
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΕ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗ ΘΛΙΨΗ
ΔΟΚΙΜΙΟΥ Ε-ΦΟΡΤΙΣΗ 5 (ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ-ΘΡΑΥΣΗ)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ
ΔΟΚΙΜΙΟΥ Ζ-ΦΟΡΤΙΣΗ 5-ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ-ΘΡΑΥΣΗ

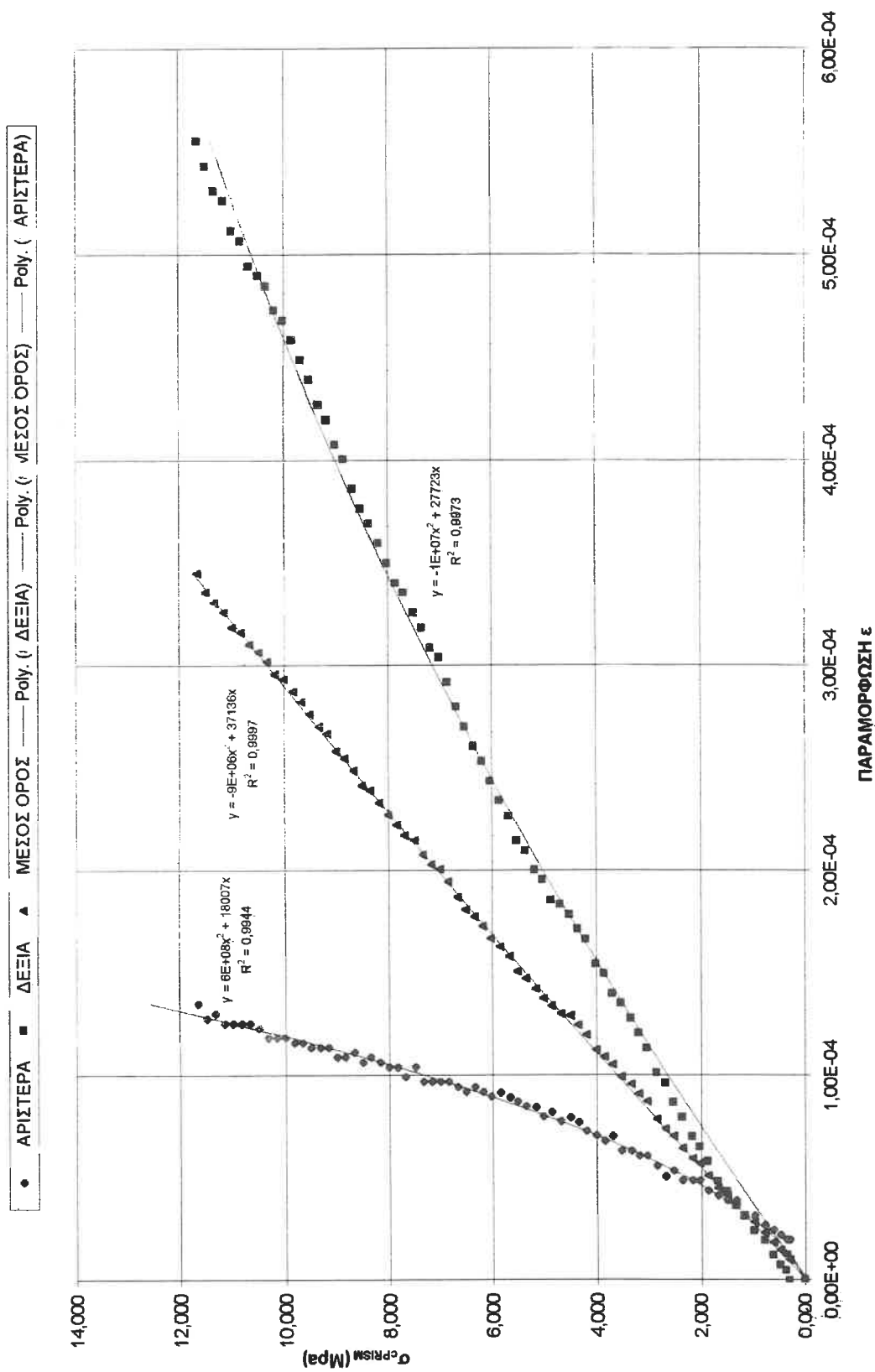


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΔΟΚΙΜΙΟΥ Η-ΦΟΡΤΙΣΗ 5 ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ-ΘΡΑΥΣΗ

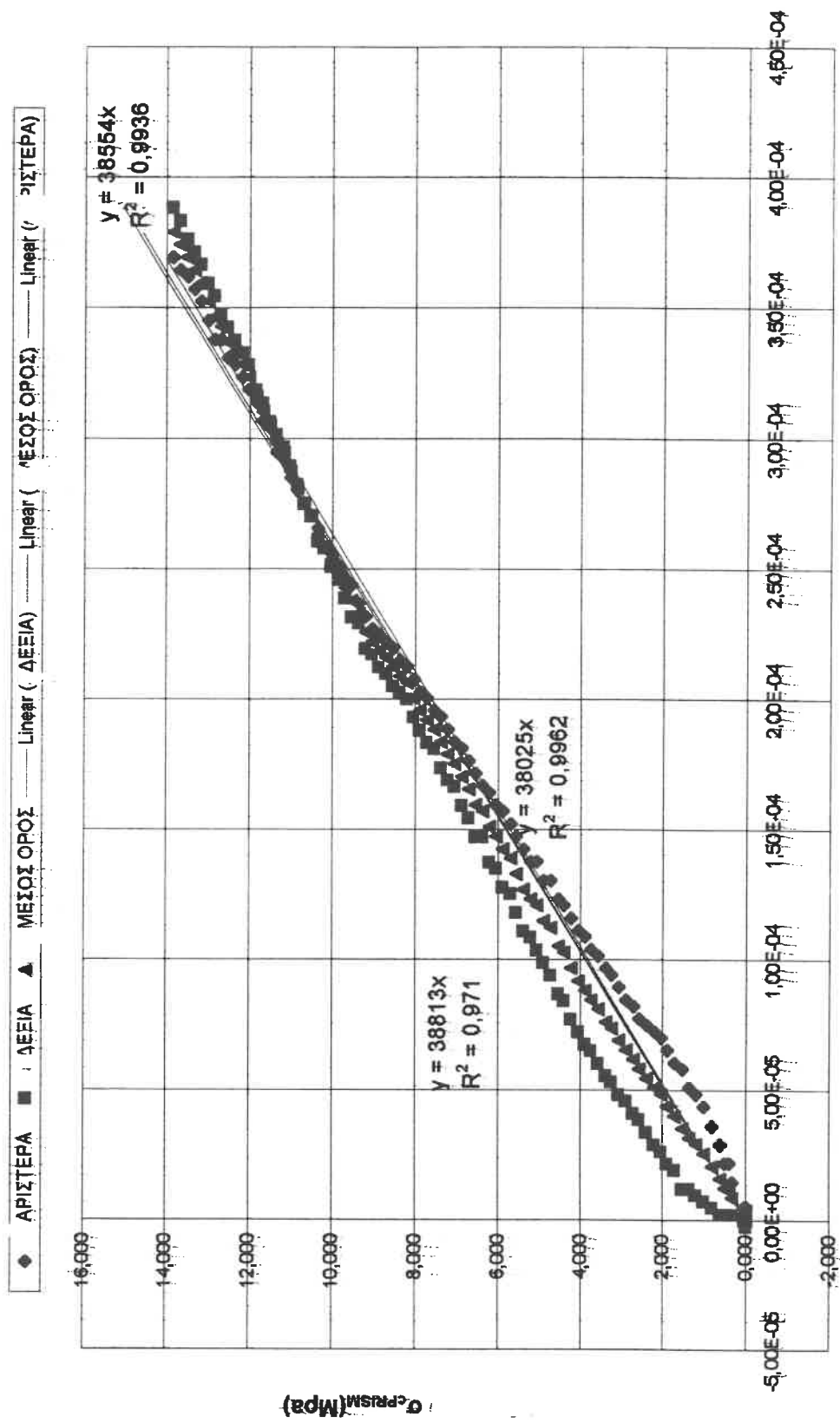


ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΗ ε

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΕ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗ ΘΛΙΨΗ
ΔΟΚΙΜΙΟΥ Θ-ΦΟΡΤΙΣΗ 4 (ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ-ΘΡΑΥΣΗ)

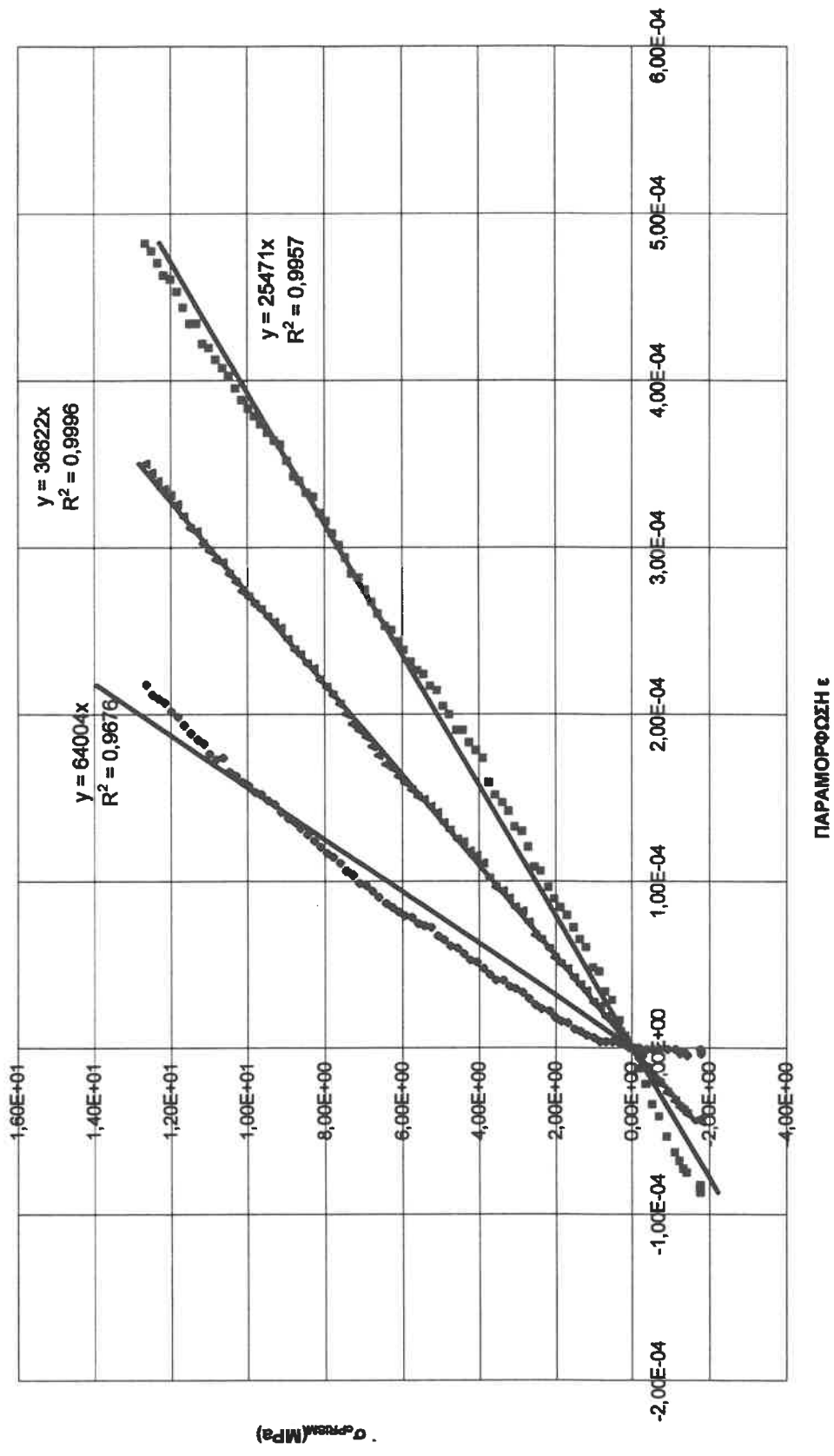


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝΣΕ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗ ΘΛΙΨΗ ΔΟΚΙΜΙΟΥ Ι-ΦΟΡΤΙΣΗ 3 (ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ-ΦΡΑΓΥΣΗ)



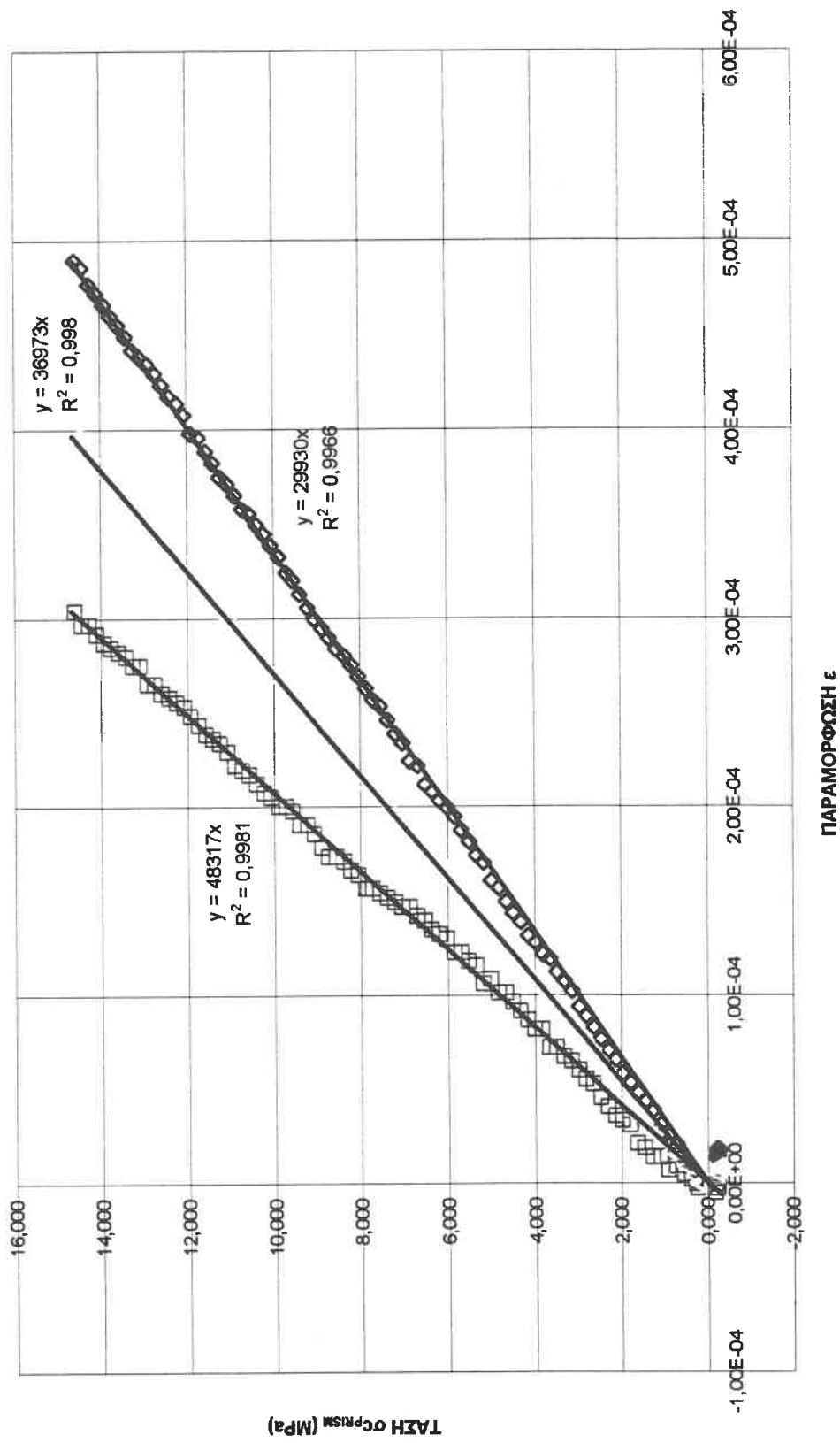
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ
ΔΟΚΙΜΙΟΥ Α-ΦΟΡΤΙΣΗ 6-ΘΡΑΥΣΗ

◆ ΤΑΣΗ ΑΡΙΣΤΕΡΑ ■ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ ▲ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ
ΔΟΚΙΜΙΟΥ Β-ΦΟΡΤΙΣΗ 3-ΘΡΑΥΣΗ

◆ ΤΑΣΗ ΑΡΙΣΤΕΡΑ □ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ ΜΕΣΗ ΤΑΣΗ

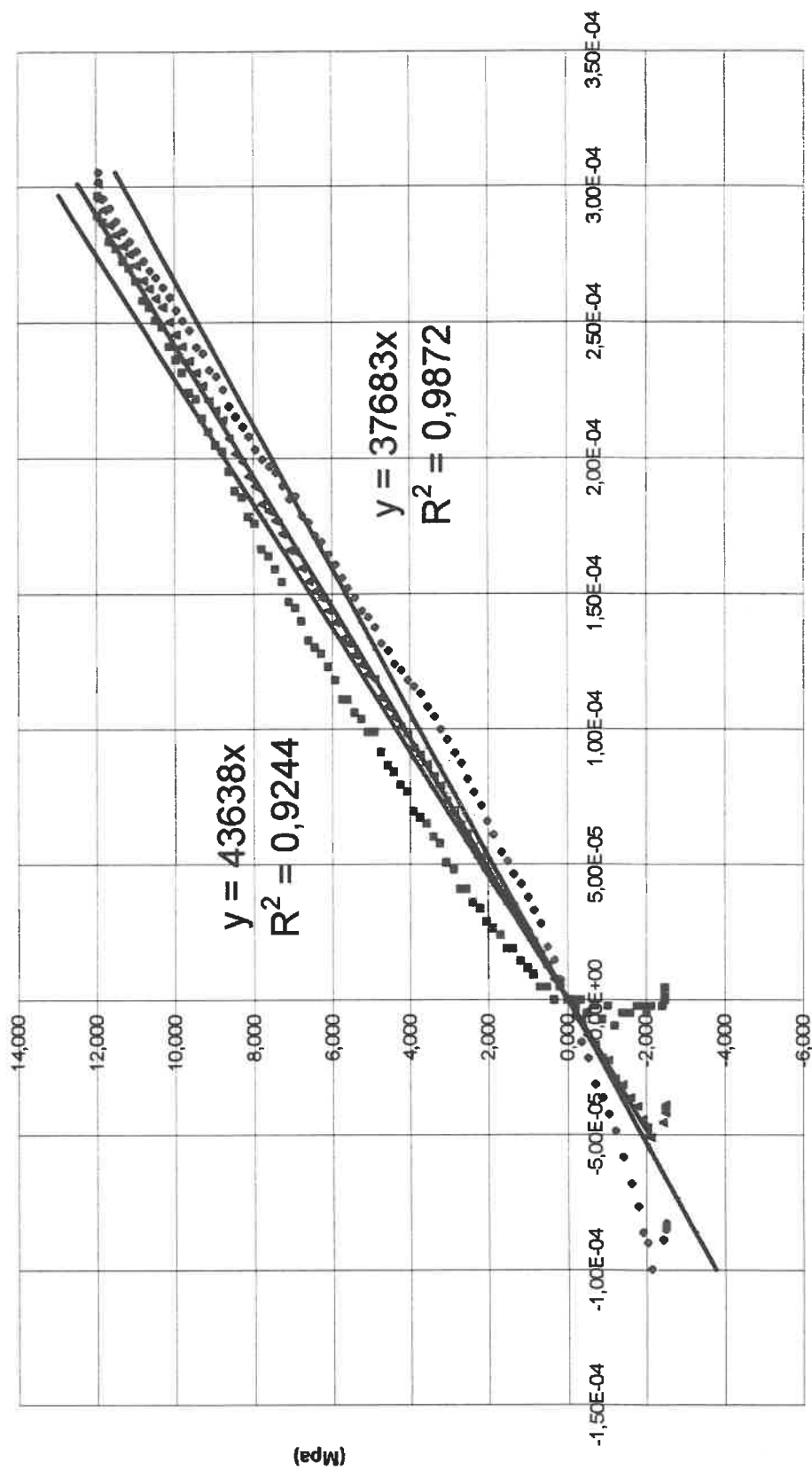


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ
ΔΟΚΙΜΙΟΥ Γ-ΦΟΡΤΙΣΗ 3-ΘΡΑΥΣΗ

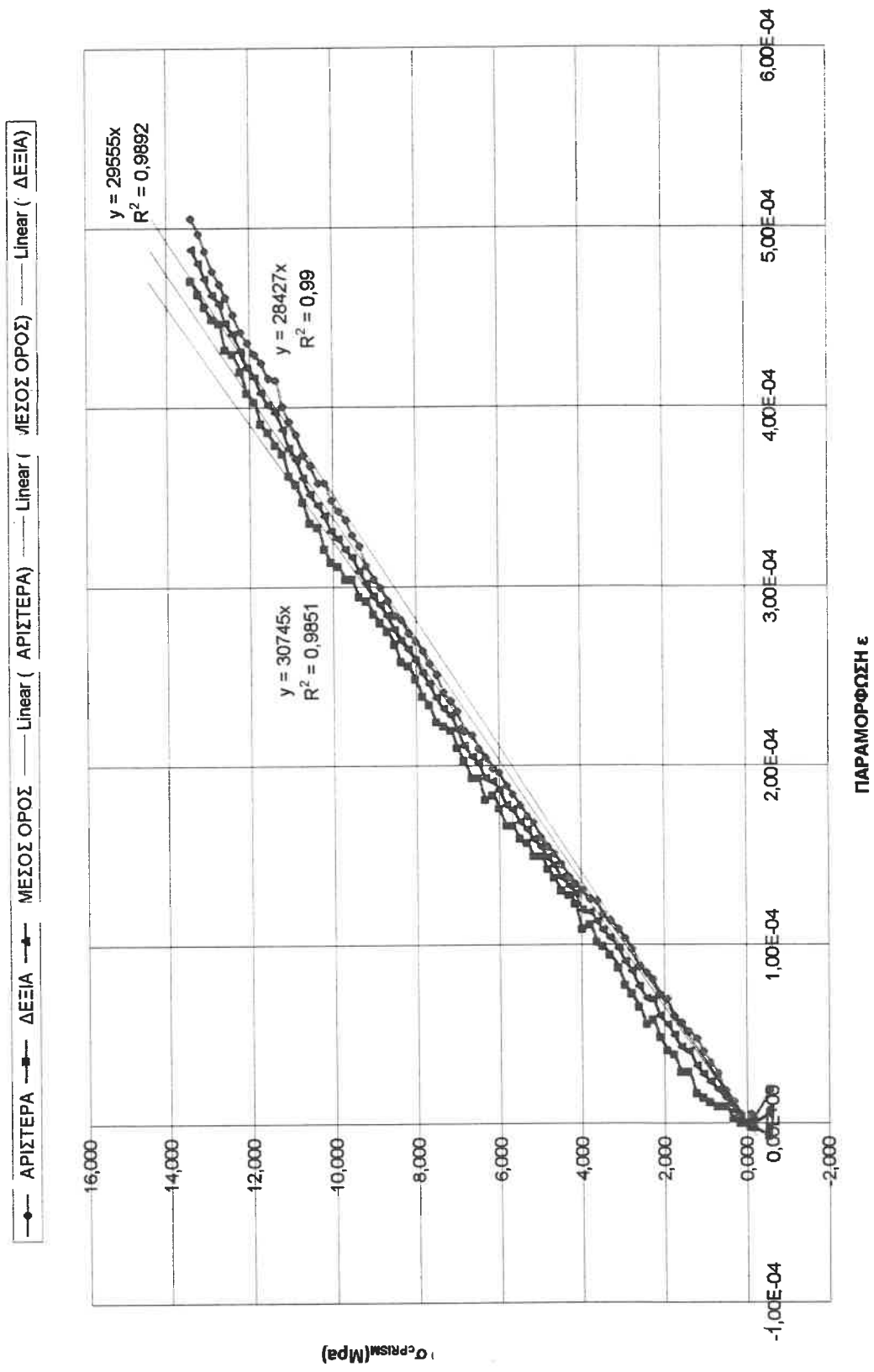
$$y = 41400x$$

Linear (1 ΑΡΙΣΤΕΡΑ) 994

• ΑΡΙΣΤΕΡΑ ■ ΔΕΞΙΑ ▲ ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ — Linear (1 ΔΕΞΙΑ) — Linear (1 ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ) — Linear (1 ΑΡΙΣΤΕΡΑ)



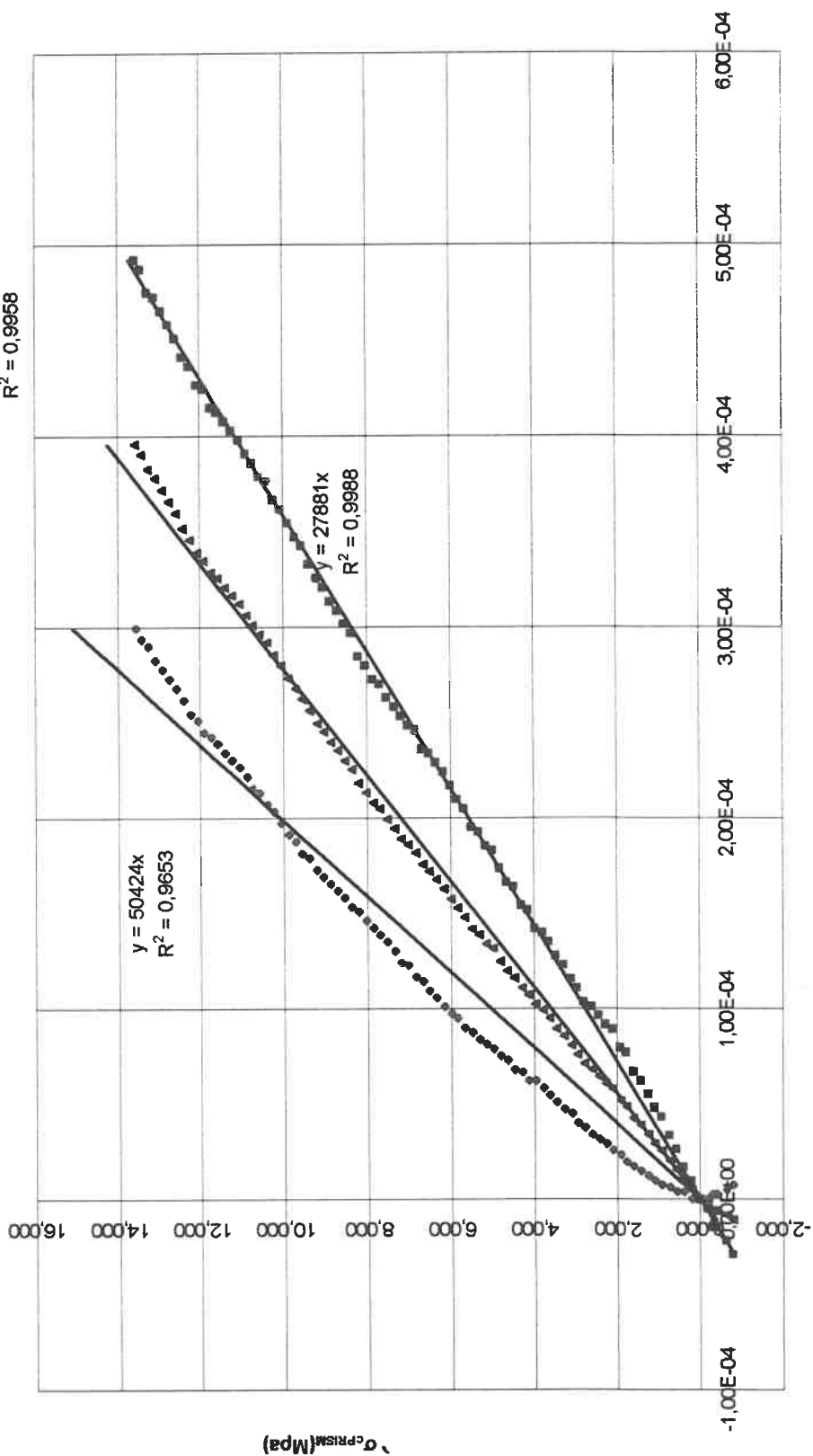
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ
ΔΟΚΙΜΙΟΥ Δ -ΦΟΡΤΙΣΗ 5 ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ-ΘΡΑΥΣΗ



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ
ΔΟΚΙΜΙΟΥ Ε-ΦΟΡΤΙΣΗ 5 ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ-ΘΡΑΥΣΗ

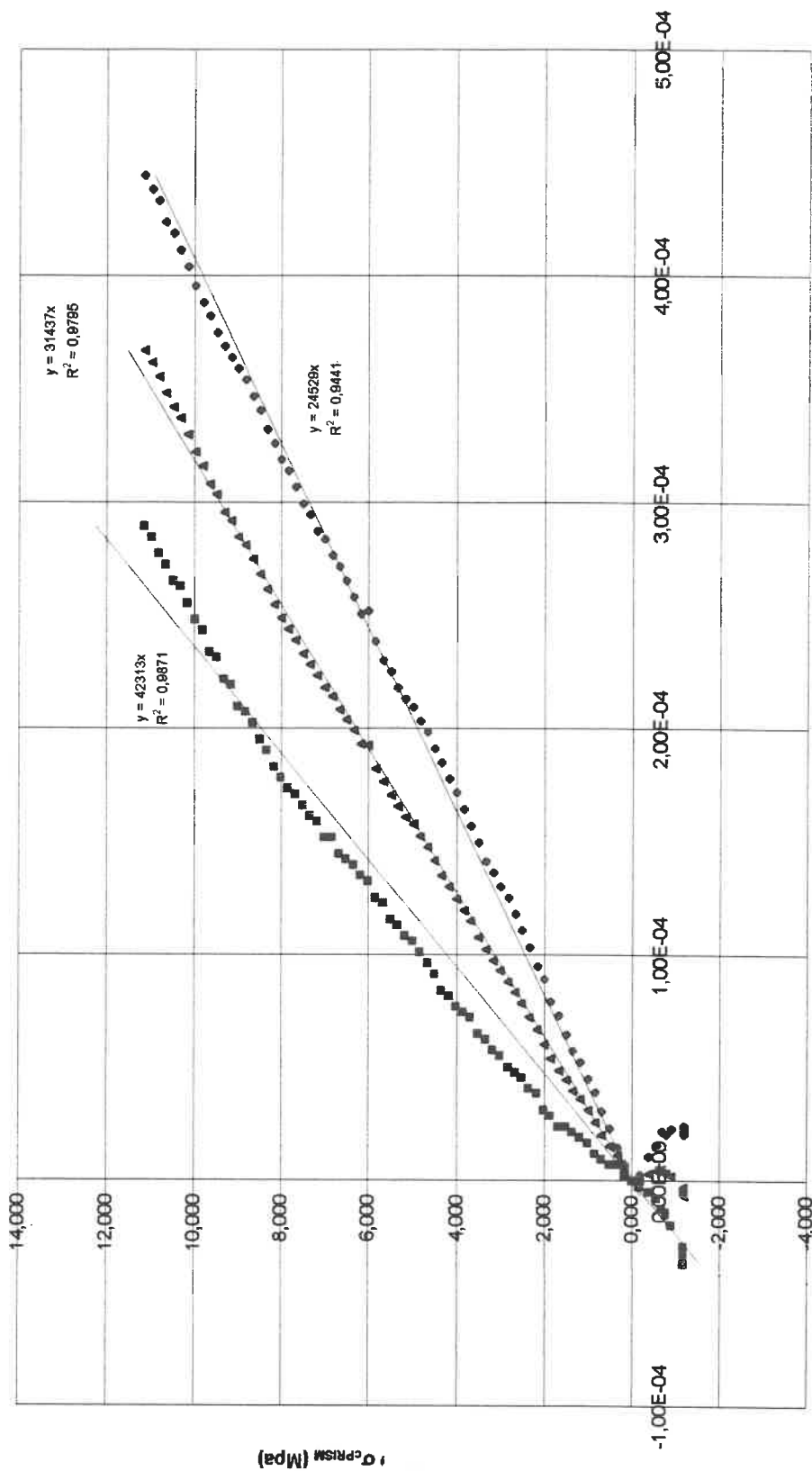
◆ ΑΡΙΣΤΕΡΑ ■ ΔΕΞΙΑ ▲ ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ — Linear (ΑΡΙΣΤΕΡΑ) — Linear (ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ) — Linear (ΔΕΞΙΑ)

$y = 36004x$
 $R^2 = 0,9958$

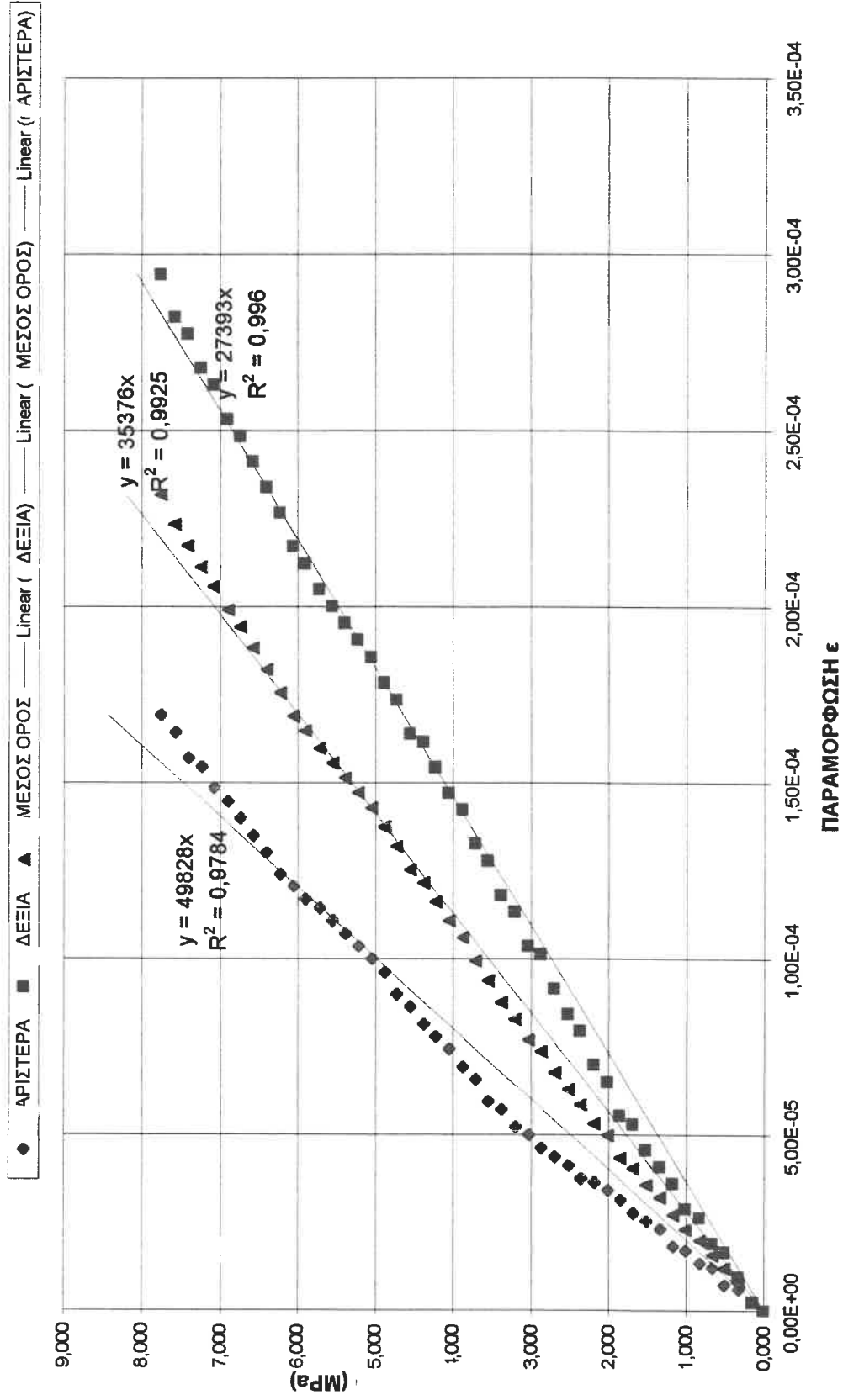


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΔΟΚΙΜΙΟΥ Ζ-ΦΟΡΤΙΣΗ 5-ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ-ΘΡΑΥΣΗ

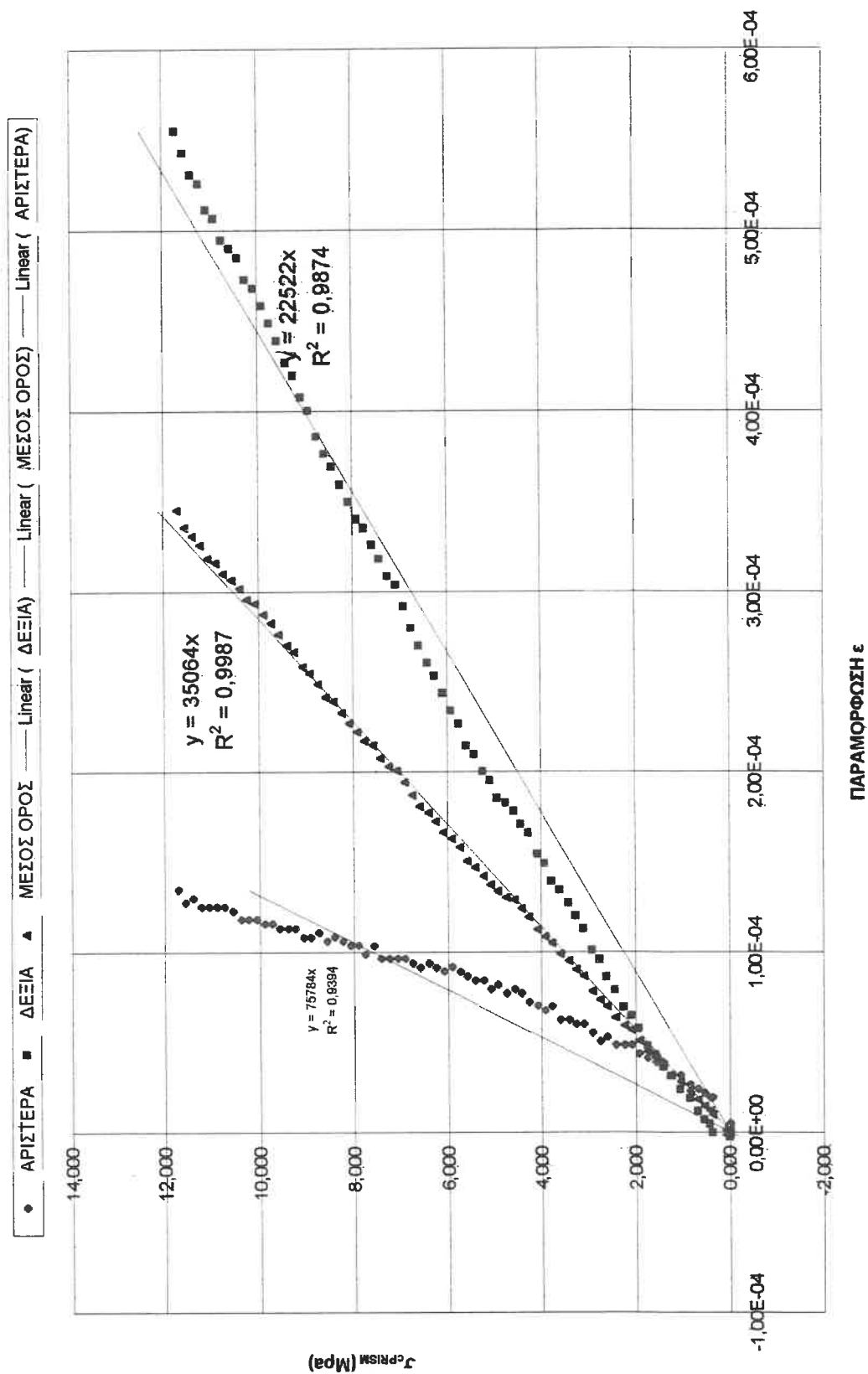
◆ ΑΡΙΣΤΕΡΑ ■ ΔΕΞΙΑ ▲ ΜΕΣΙΟΣ ΟΡΟΣ — Linear (ΔΕΞΙΑ) — Linear (ΑΡΙΣΤΕΡΑ)



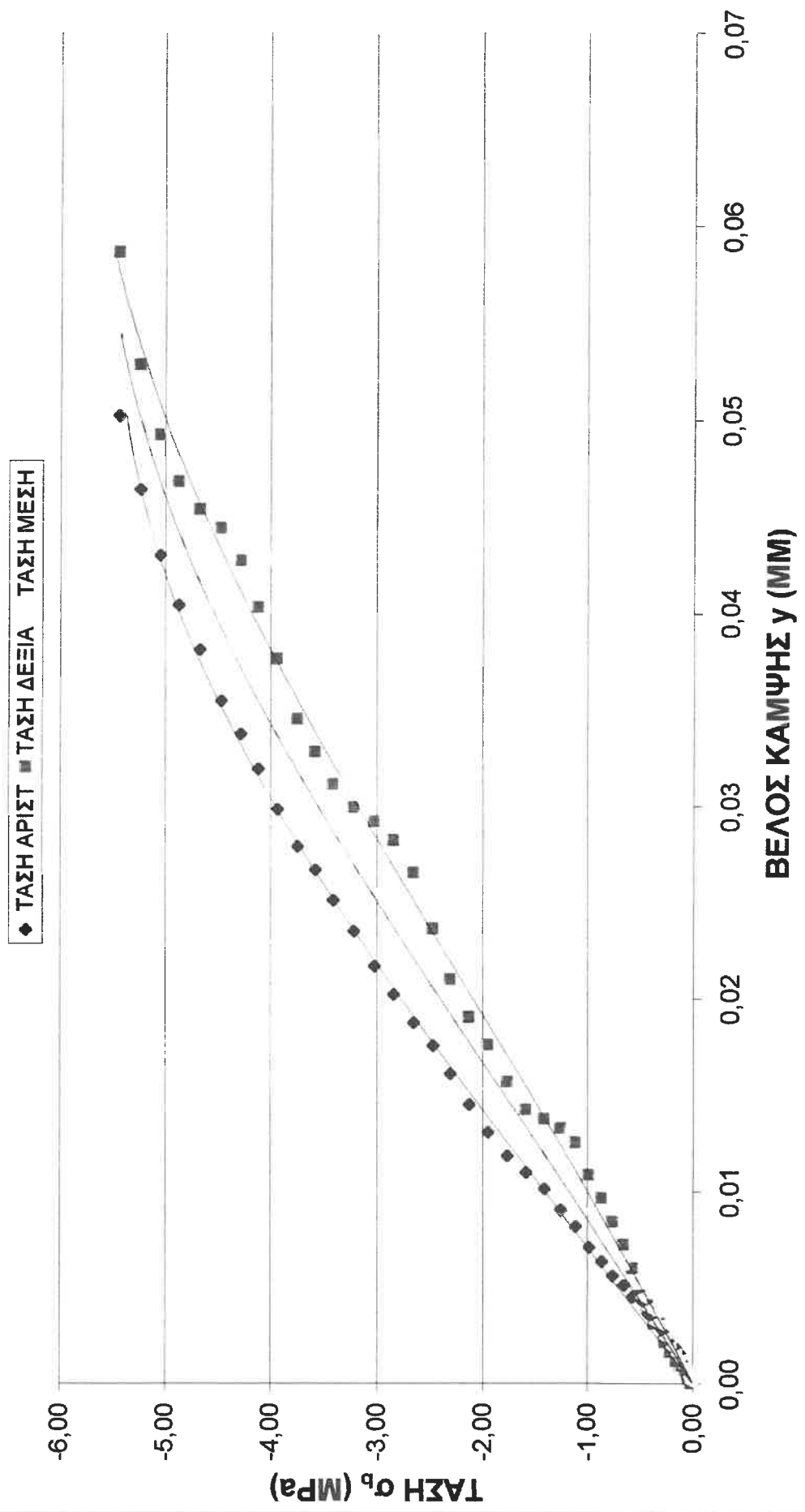
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΕ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗ ΘΛΙΨΗ
ΔΟΚΙΜΙΟΥ Η-ΦΟΡΤΙΣΗ 5 ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ-ΘΡΑΥΣΗ



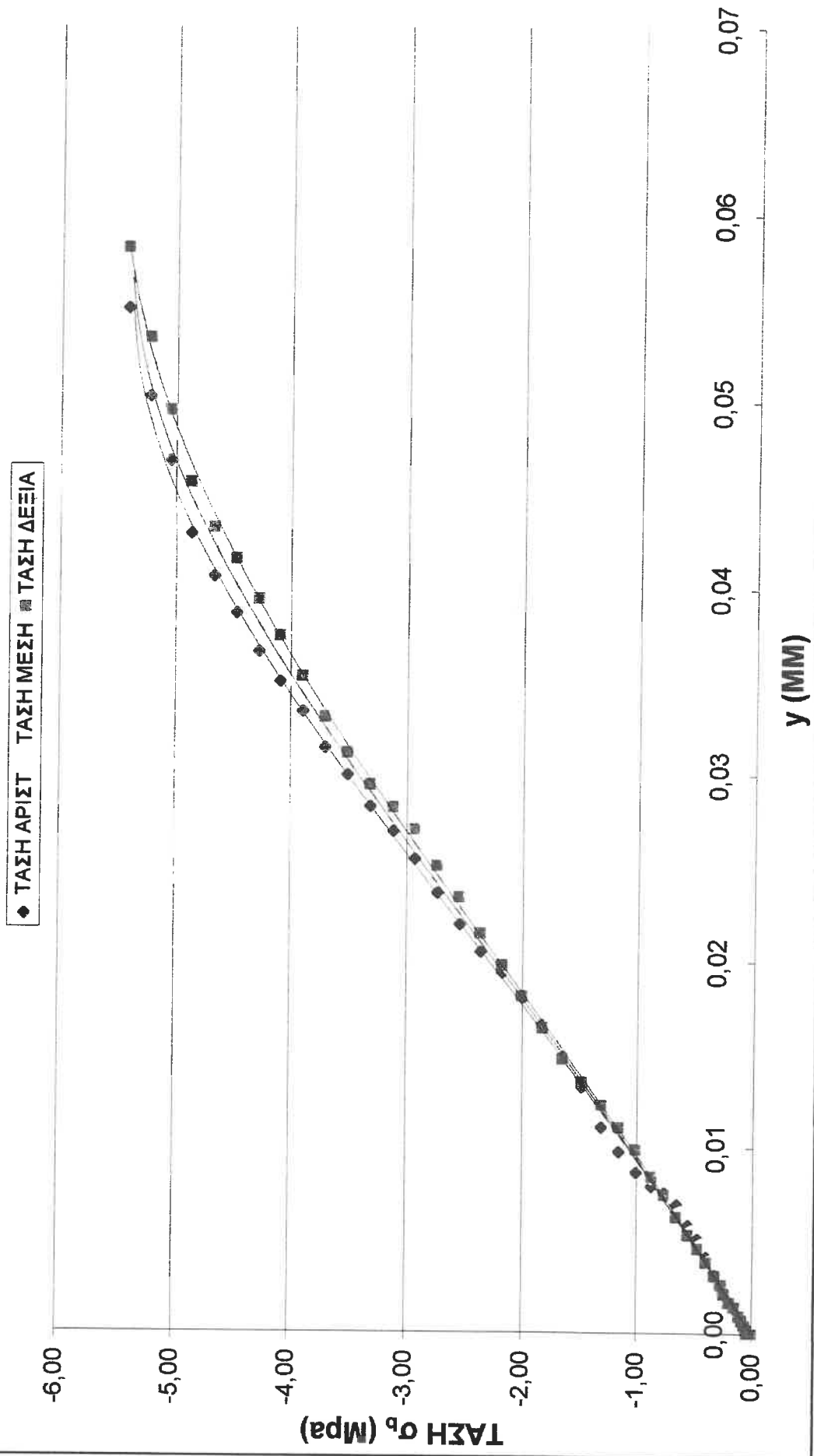
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΕΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΣΕ ΑΝΕΜΠΟΔΙΣΤΗ ΘΛΙΨΗ
ΔΟΚΙΜΙΟΥ Θ-ΦΟΡΤΙΣΗ 4 (ΠΕΡΙΣΤΡΟΦΗ-ΦΡΑΥΣΗ)



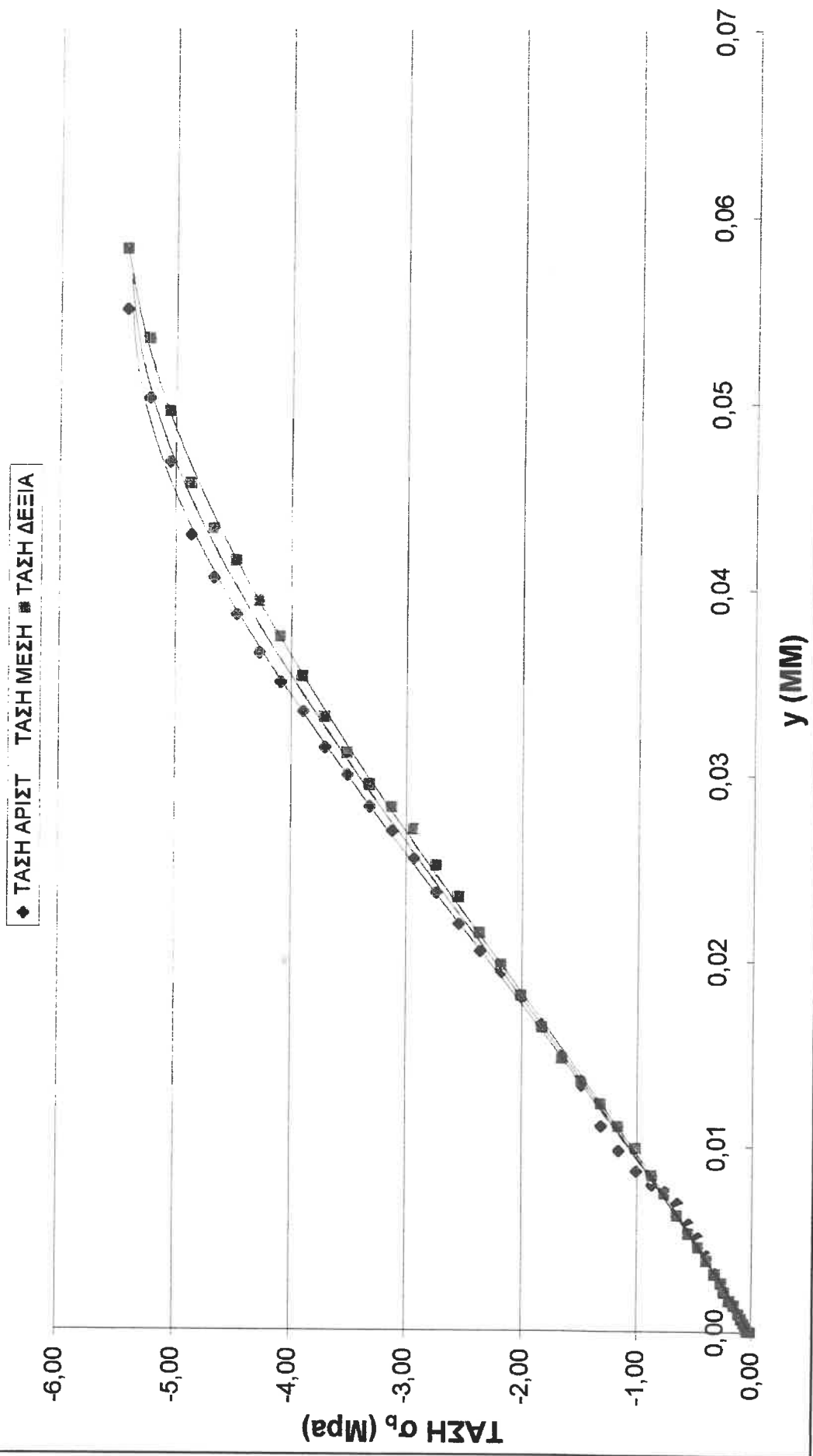
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 1



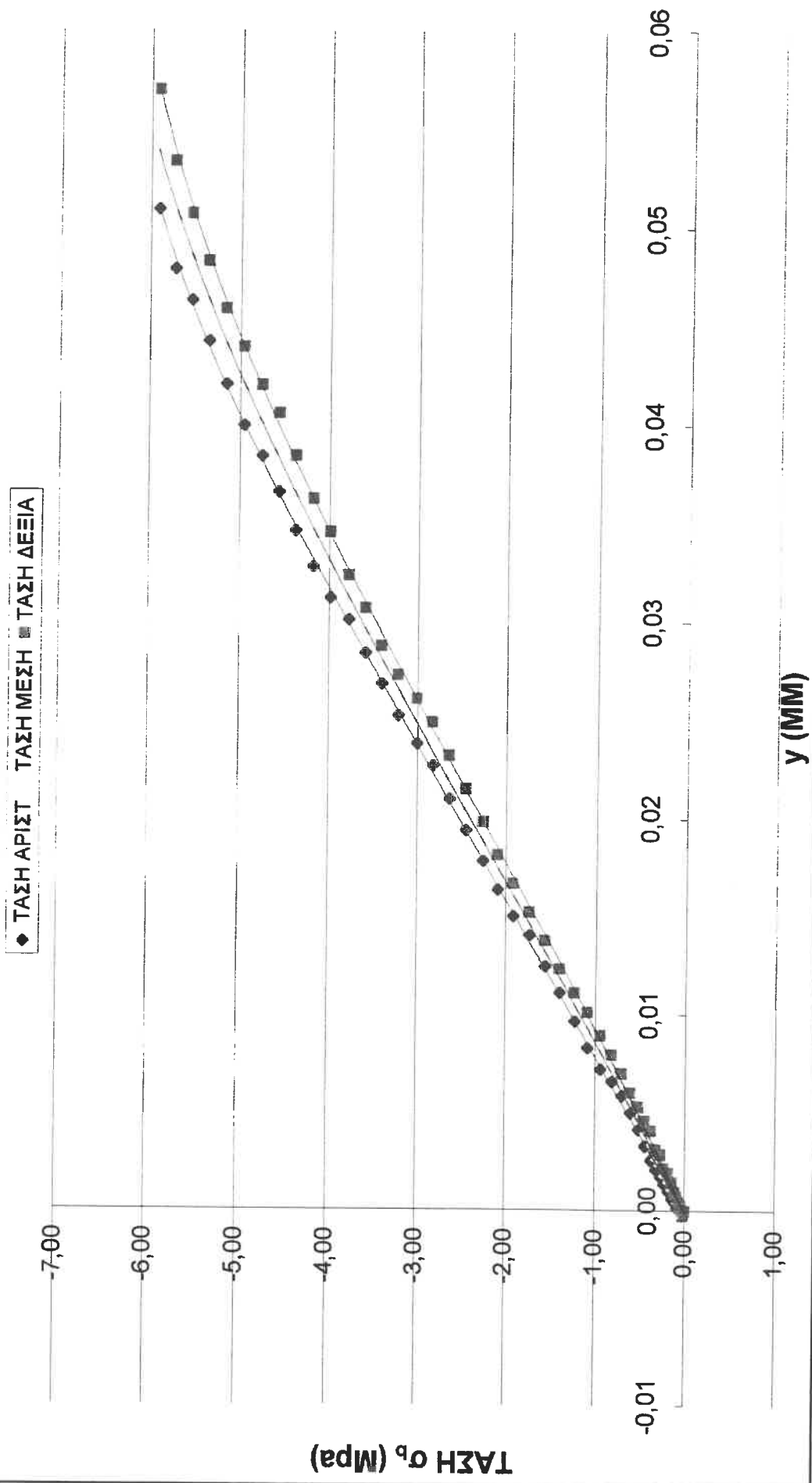
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 2



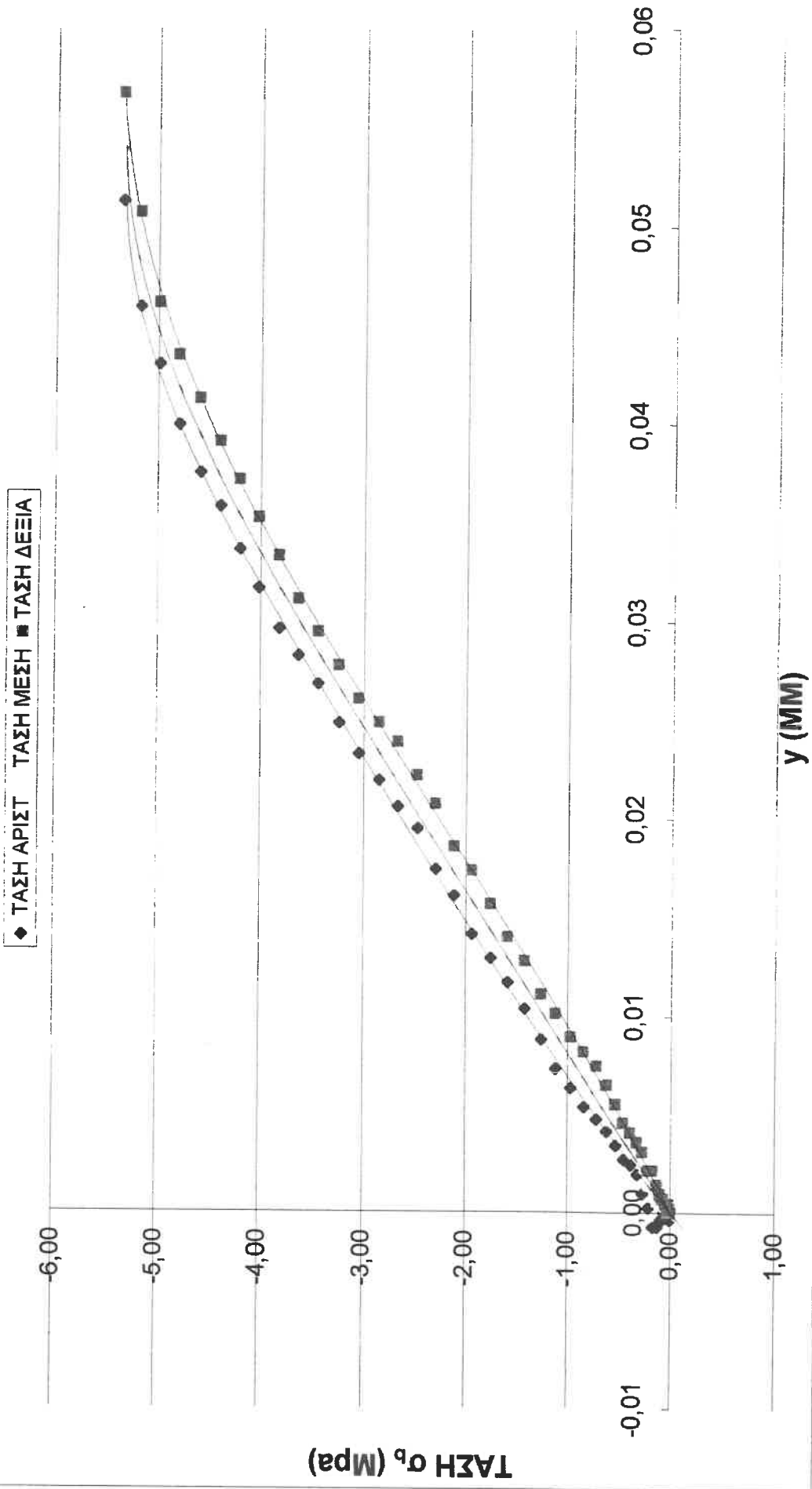
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 3



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 4

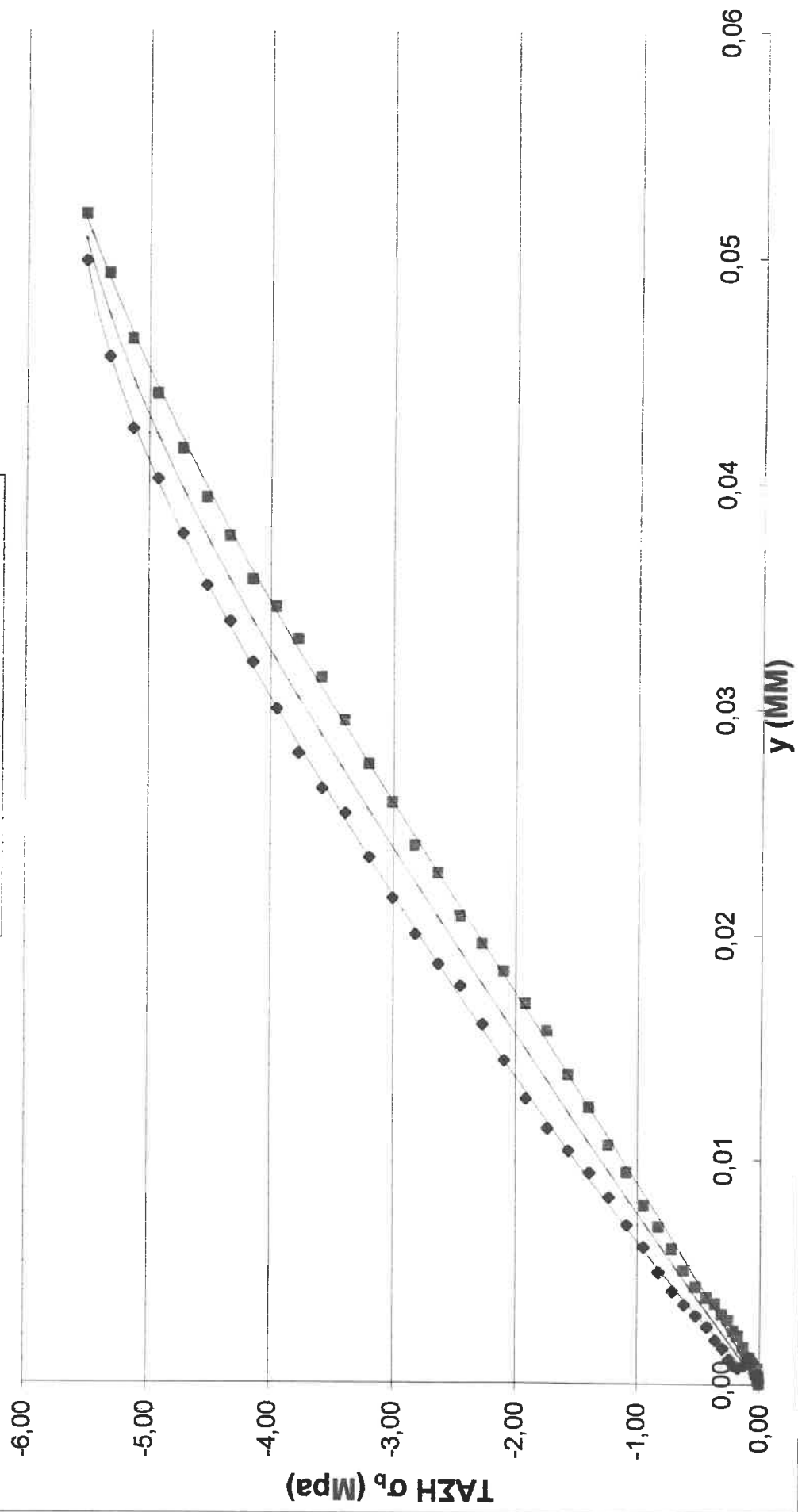


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 5



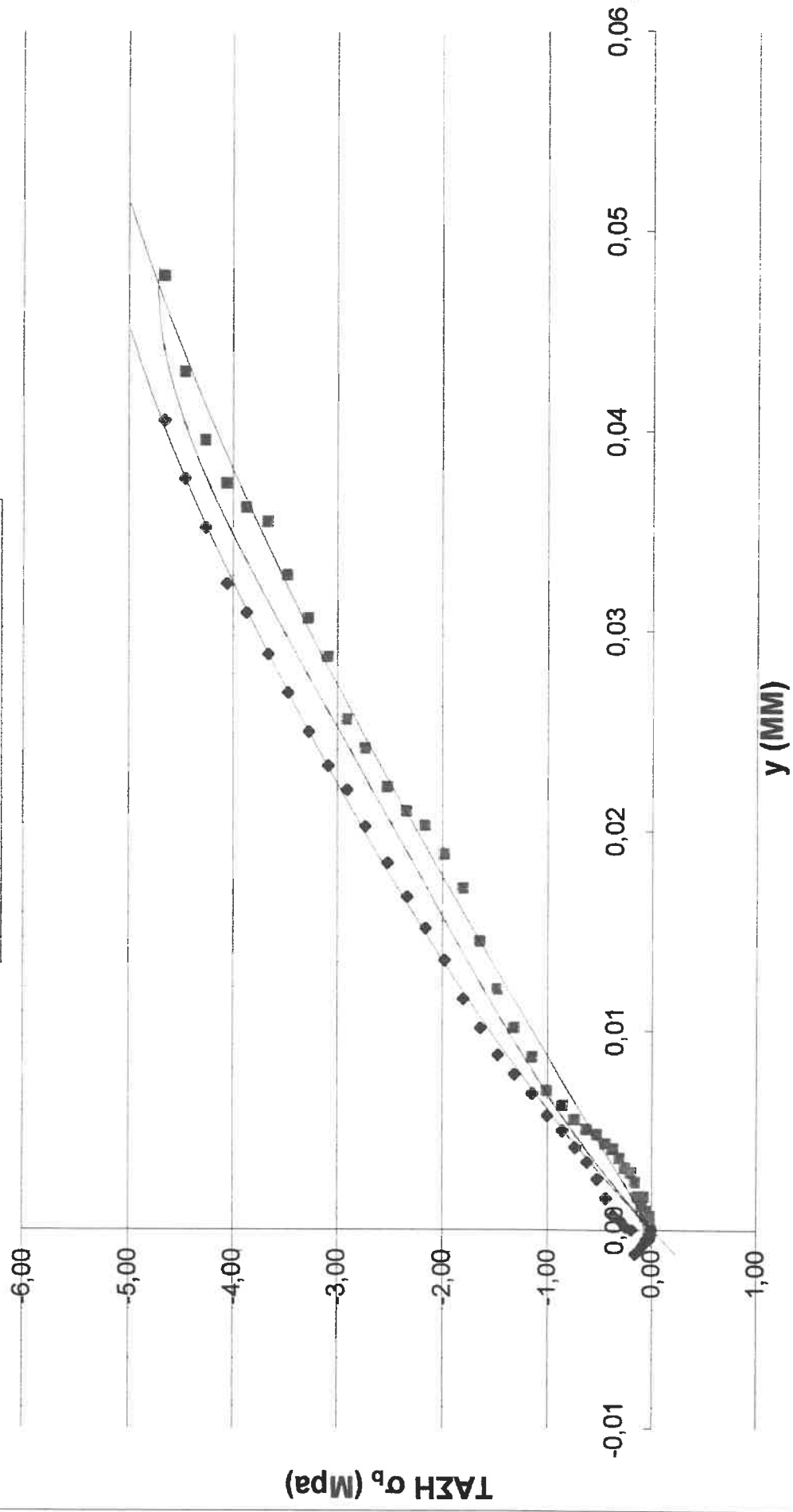
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 6

ΤΑΣΗ ΜΕΣΗ ■ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ ♦ ΤΑΣΗ ΑΡΙΣΤ



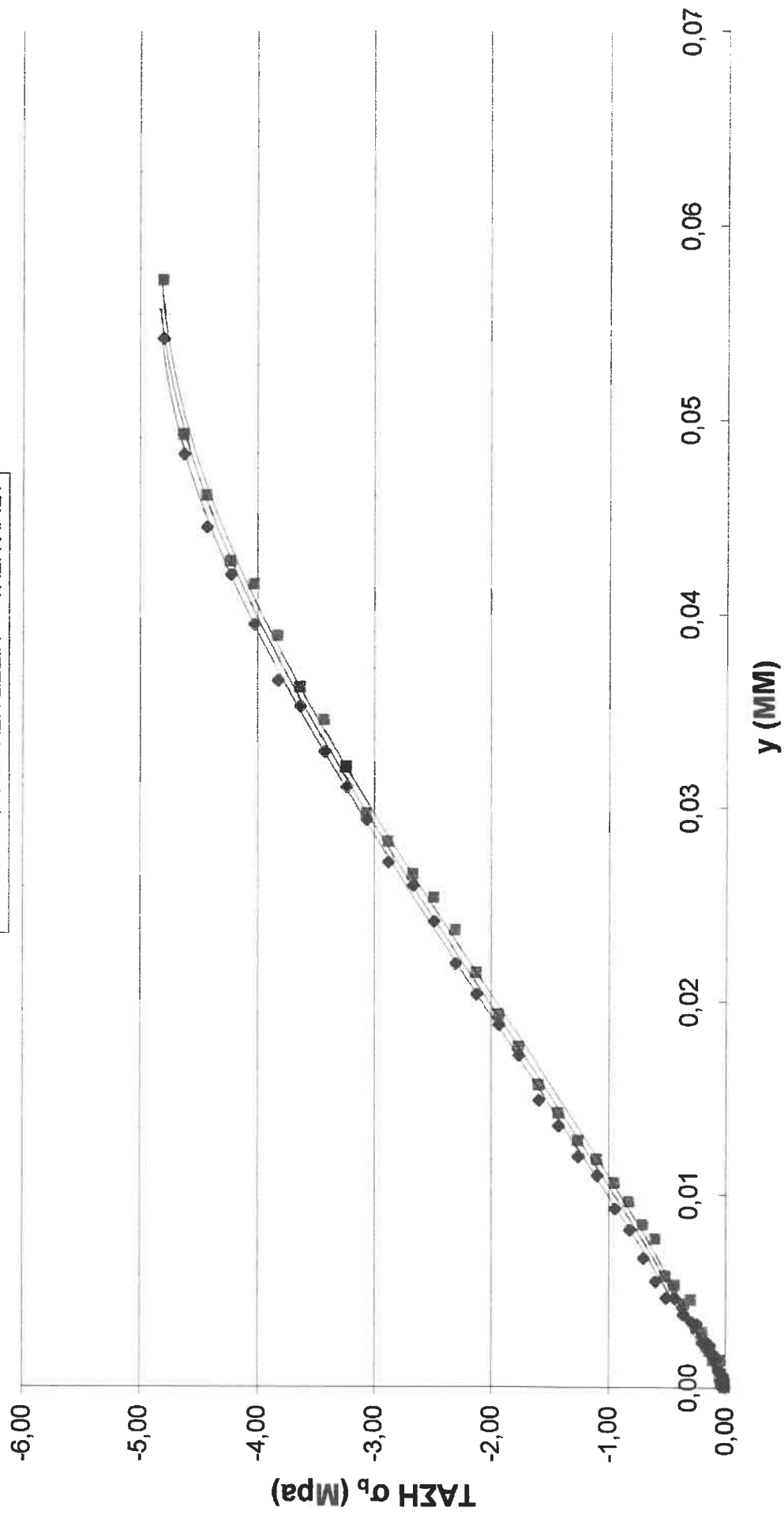
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 7

■ ΤΑΣΗ ΜΕΣΗ ■ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ ♦ ΤΑΣΗ ΑΡΙΣΤ



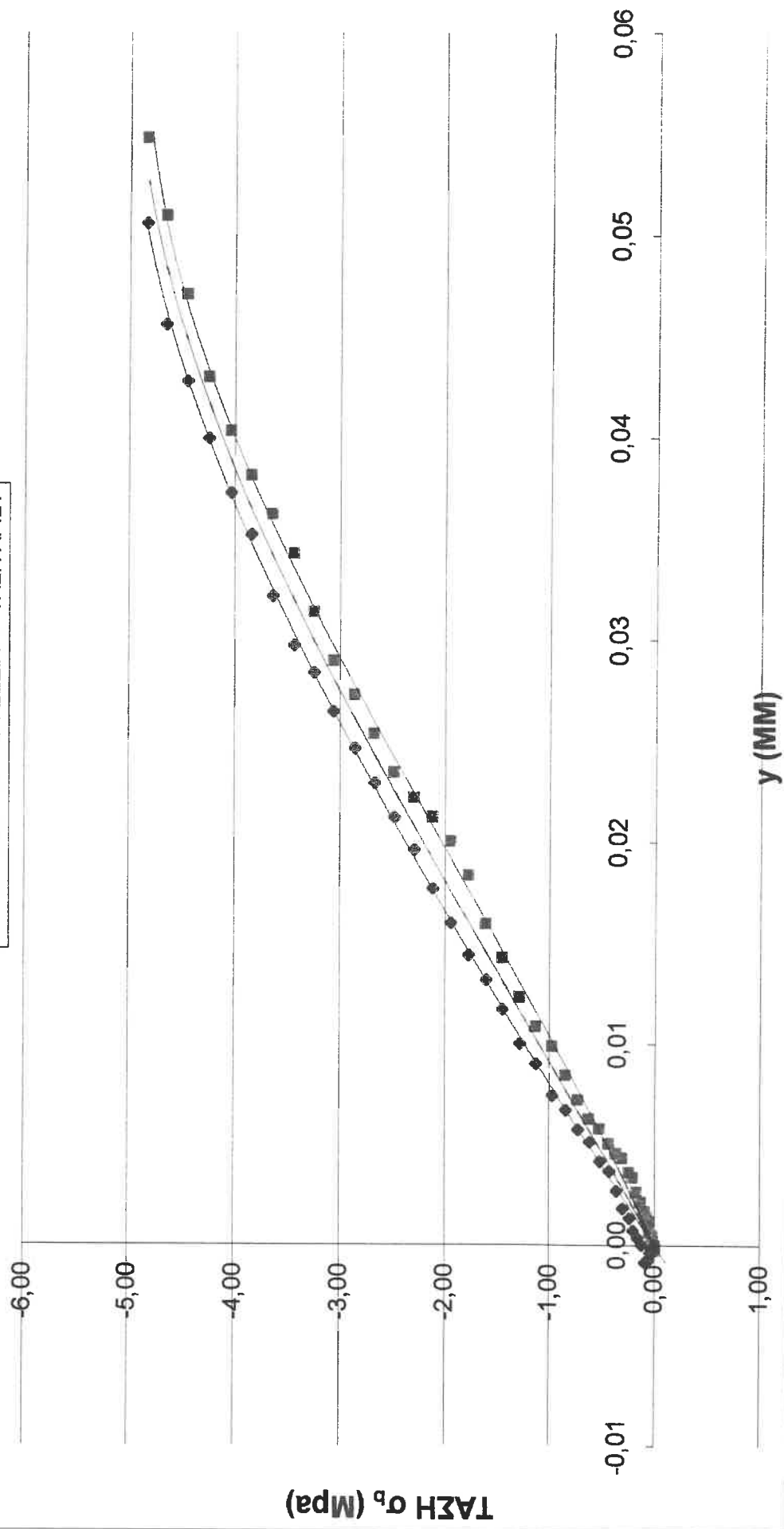
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 8

ΤΑΣΗ ΜΕΣΗ ■ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ ♦ ΤΑΣΗ ΑΡΙΣΤ



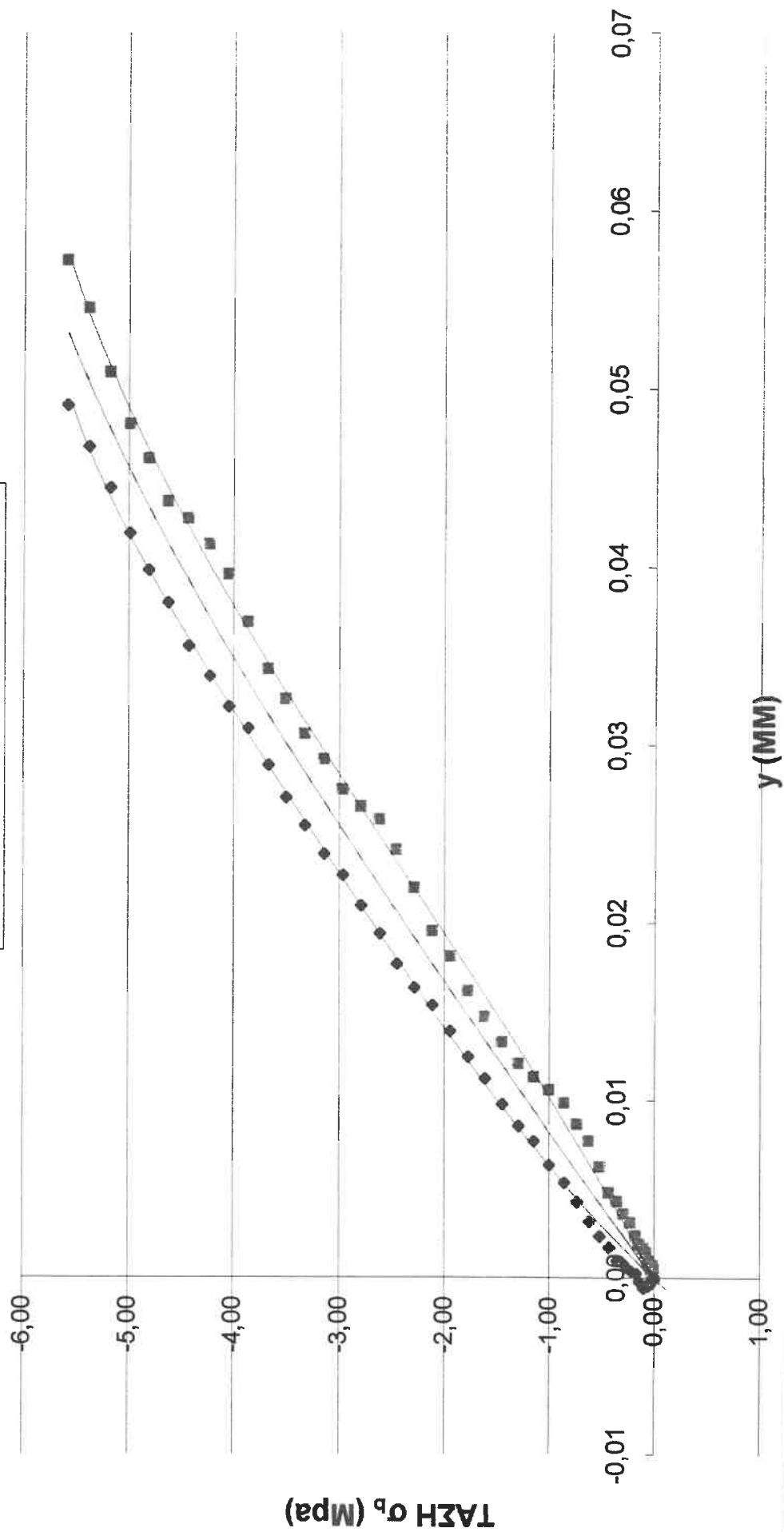
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 9

■ ΤΑΣΗ ΜΕΣΗ ■ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ ◆ ΤΑΣΗ ΑΡΙΣΤ



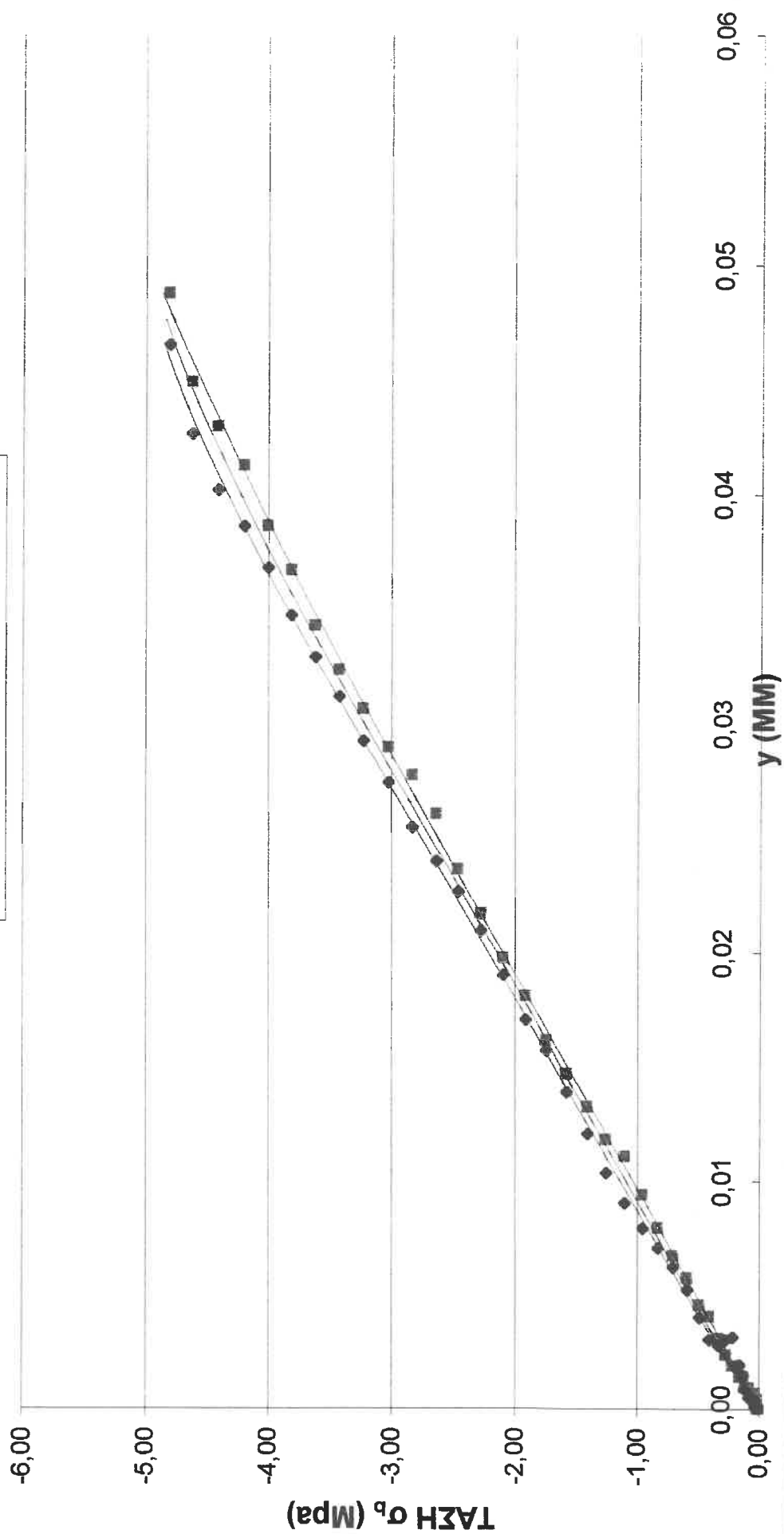
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 10

ΤΑΣΗ ΜΕΣΗ ■ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ ♦ ΤΑΣΗ ΑΡΙΣΤ

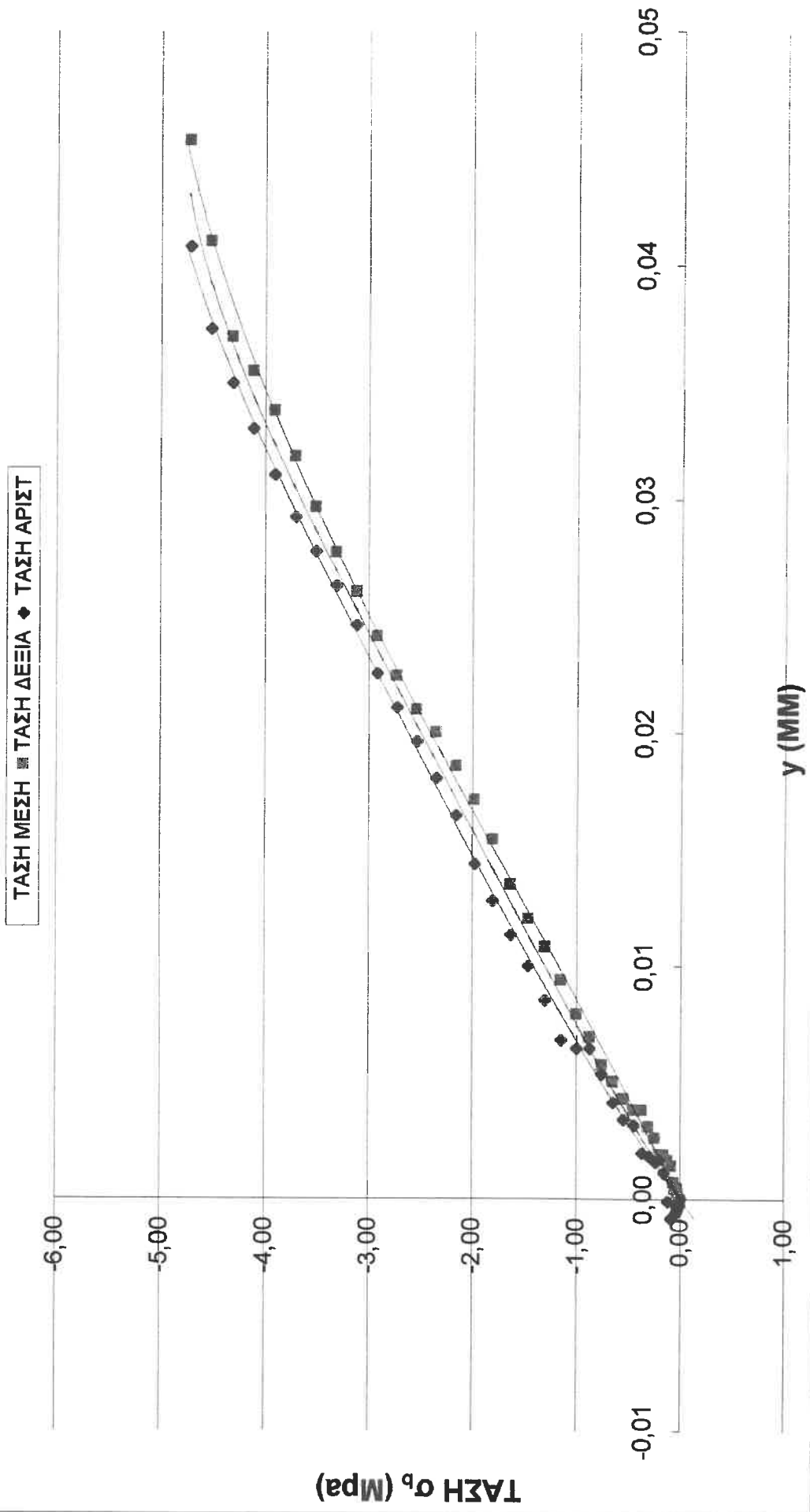


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 11

ΤΑΣΗ ΜΕΣΗ ■ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ ♦ ΤΑΣΗ ΑΡΙΣΤ

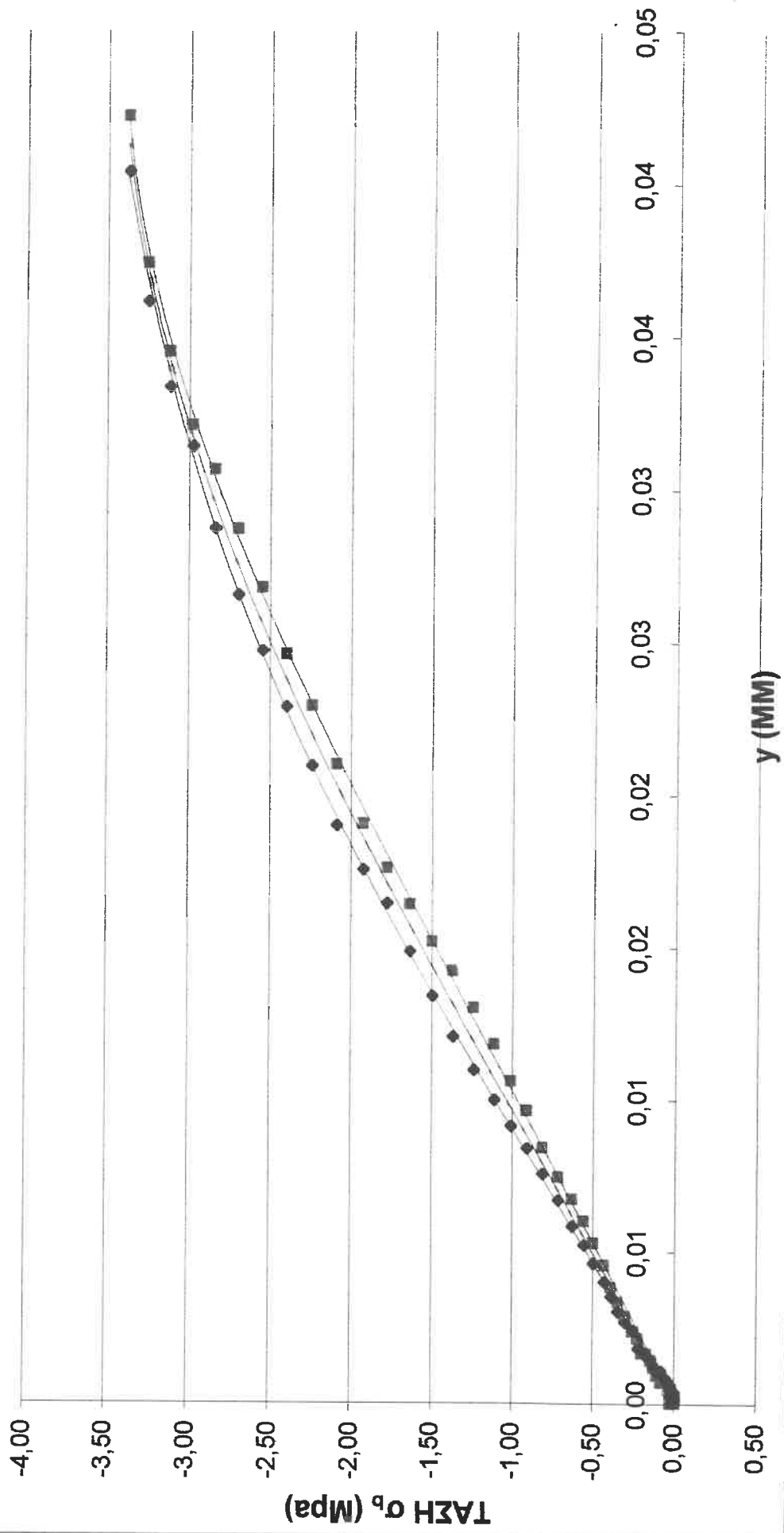


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 12



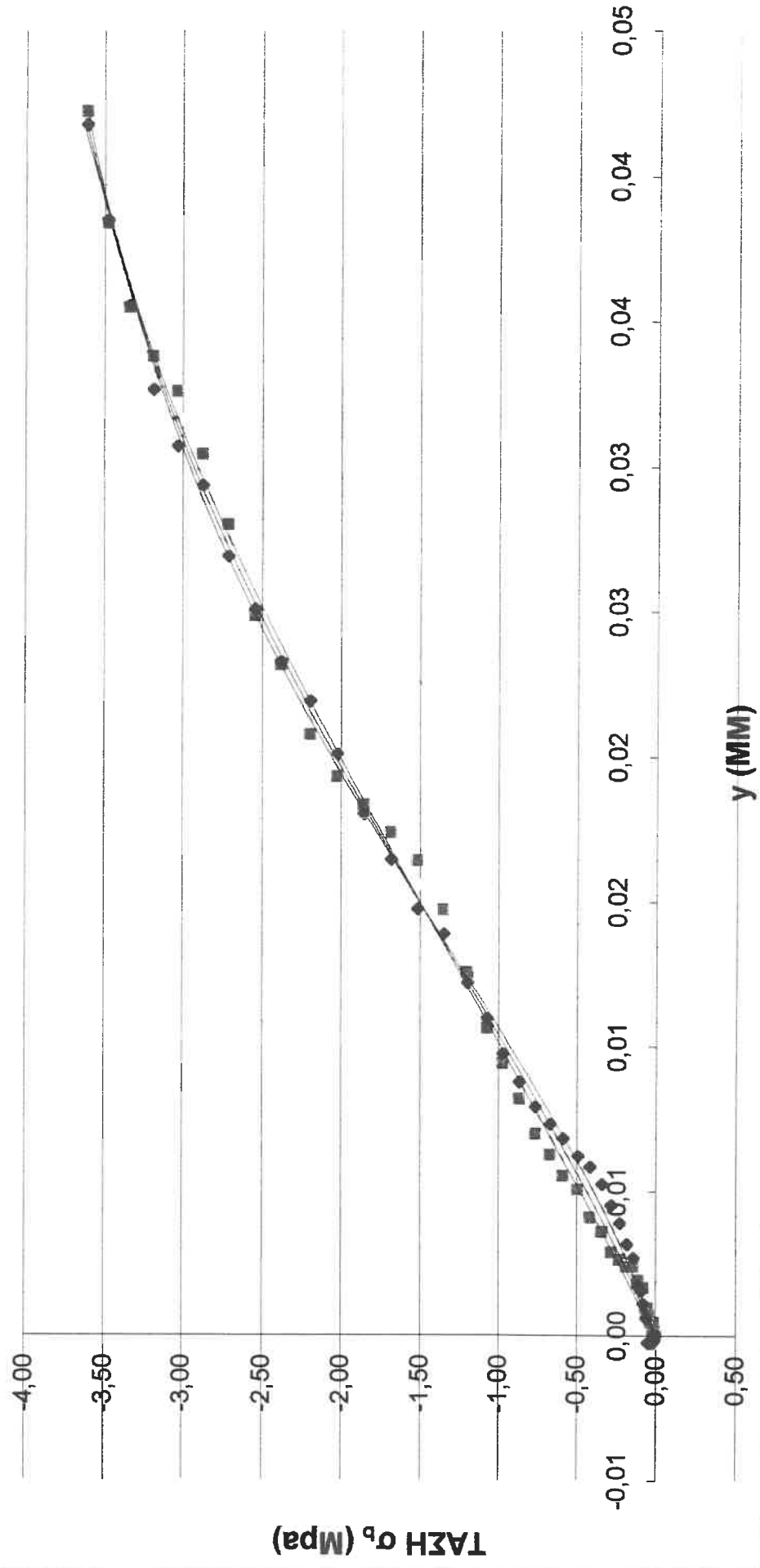
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 13

ΤΑΣΗ ΜΕΣΗ ■ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ ♦ ΤΑΣΗ ΑΡΙΣΤ



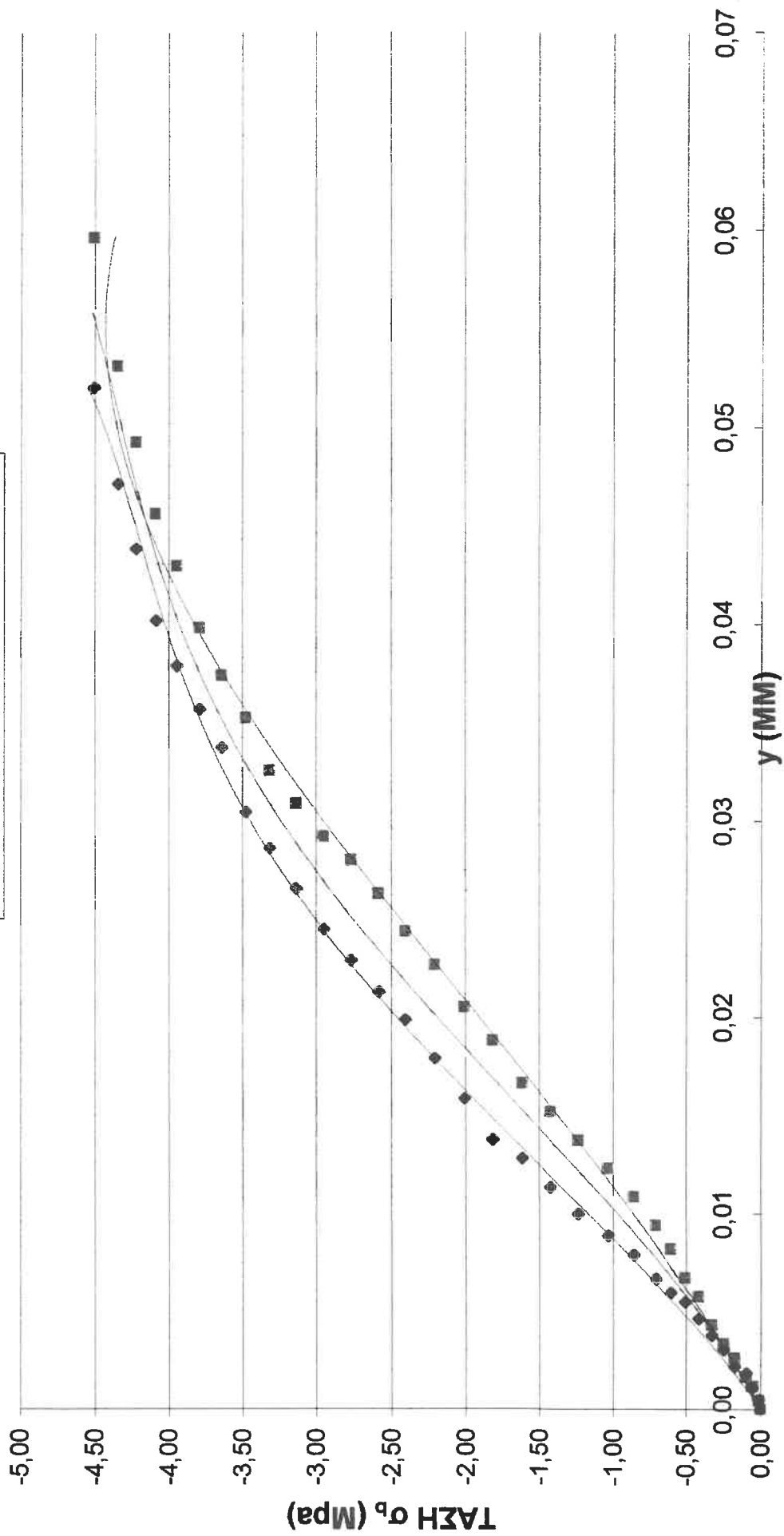
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 15

ΤΑΣΗ ΜΕΣΗ ■ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ ♦ ΤΑΣΗ ΑΡΙΣΤ



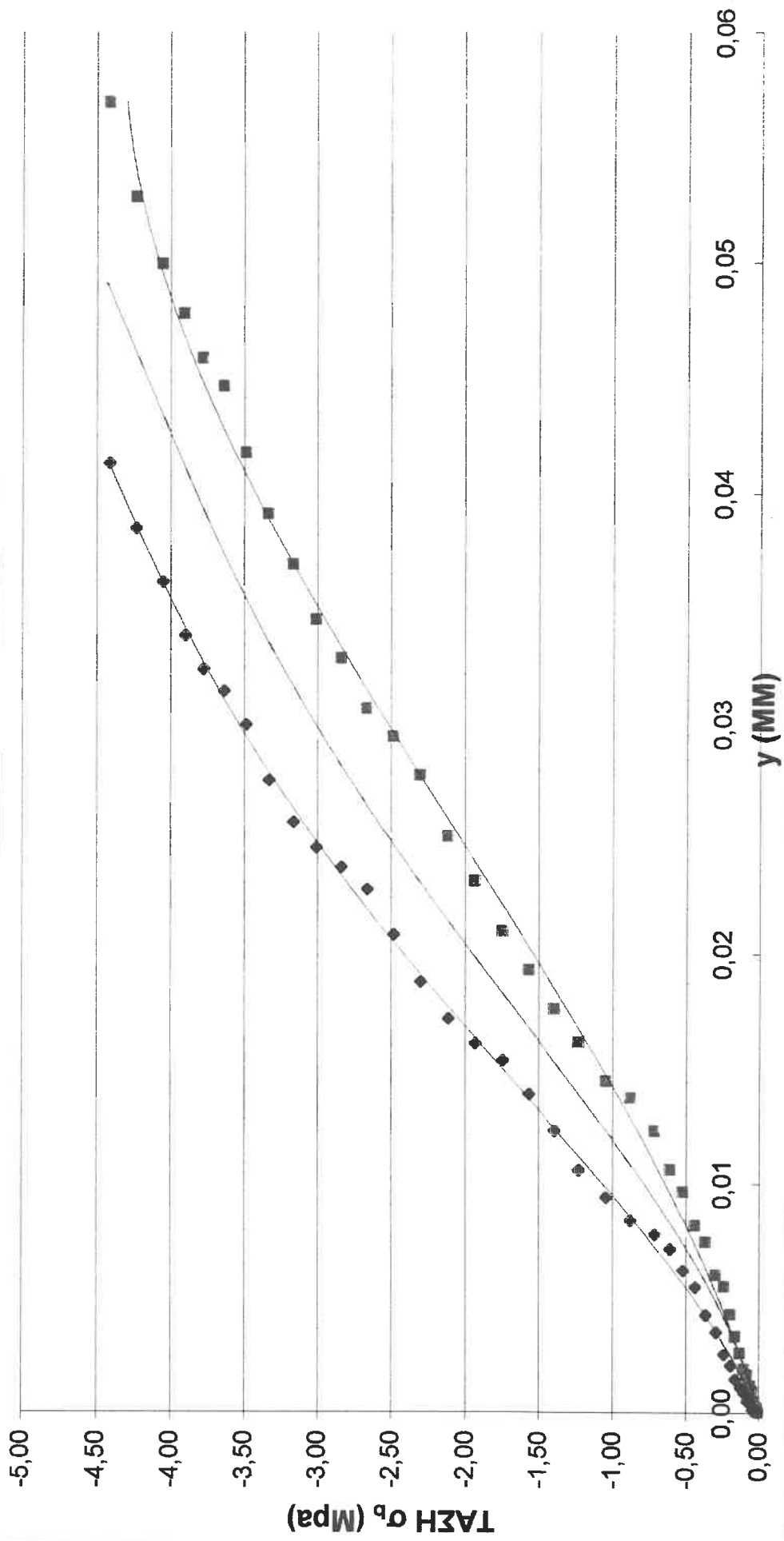
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 16

ΤΑΣΗ ΜΕΣΗ ■ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ ♦ ΤΑΣΗ ΑΡΙΣΤ



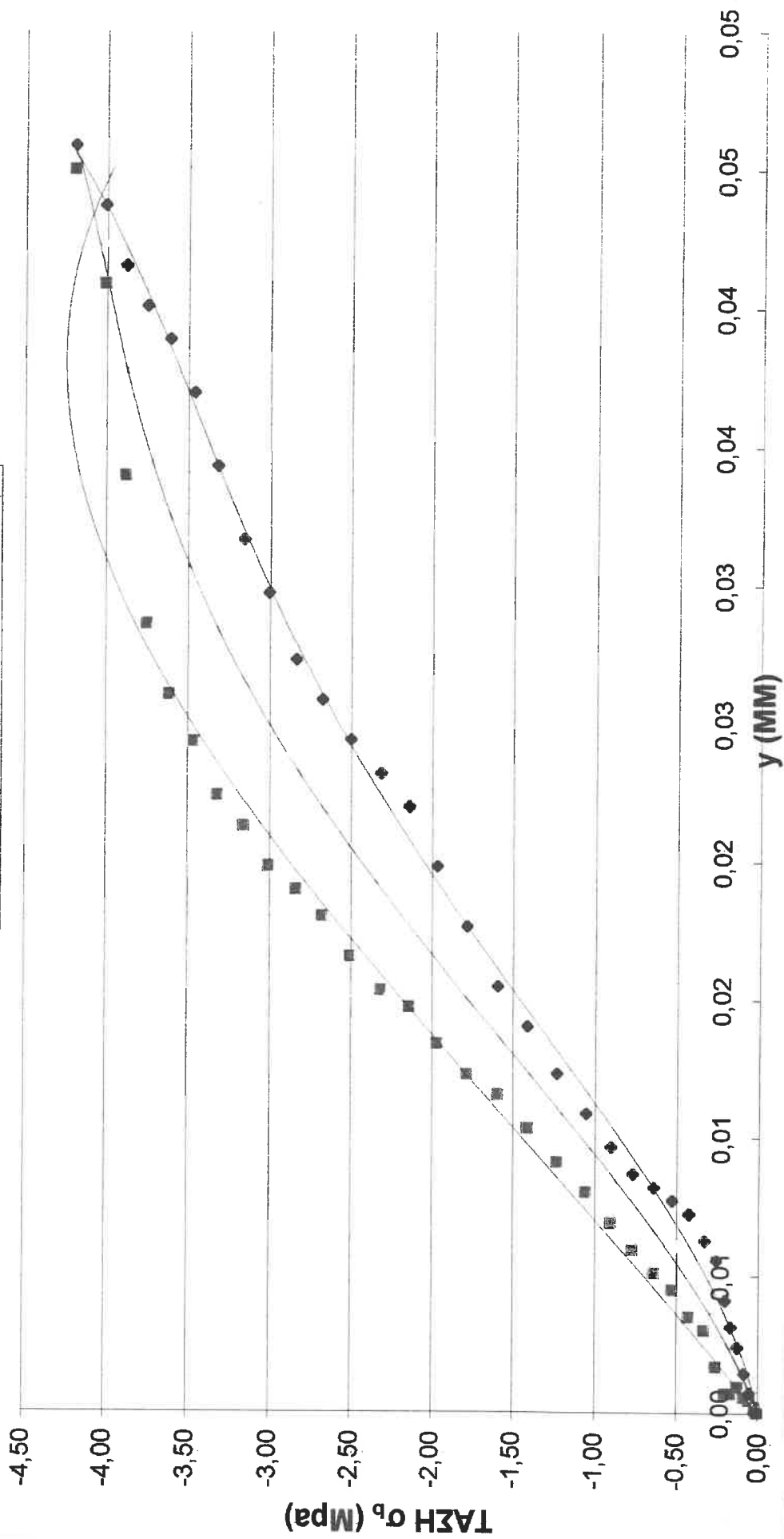
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 17

ΤΑΣΗ ΜΕΣΗ ■ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ ♦ ΤΑΣΗ ΑΡΙΣΤ



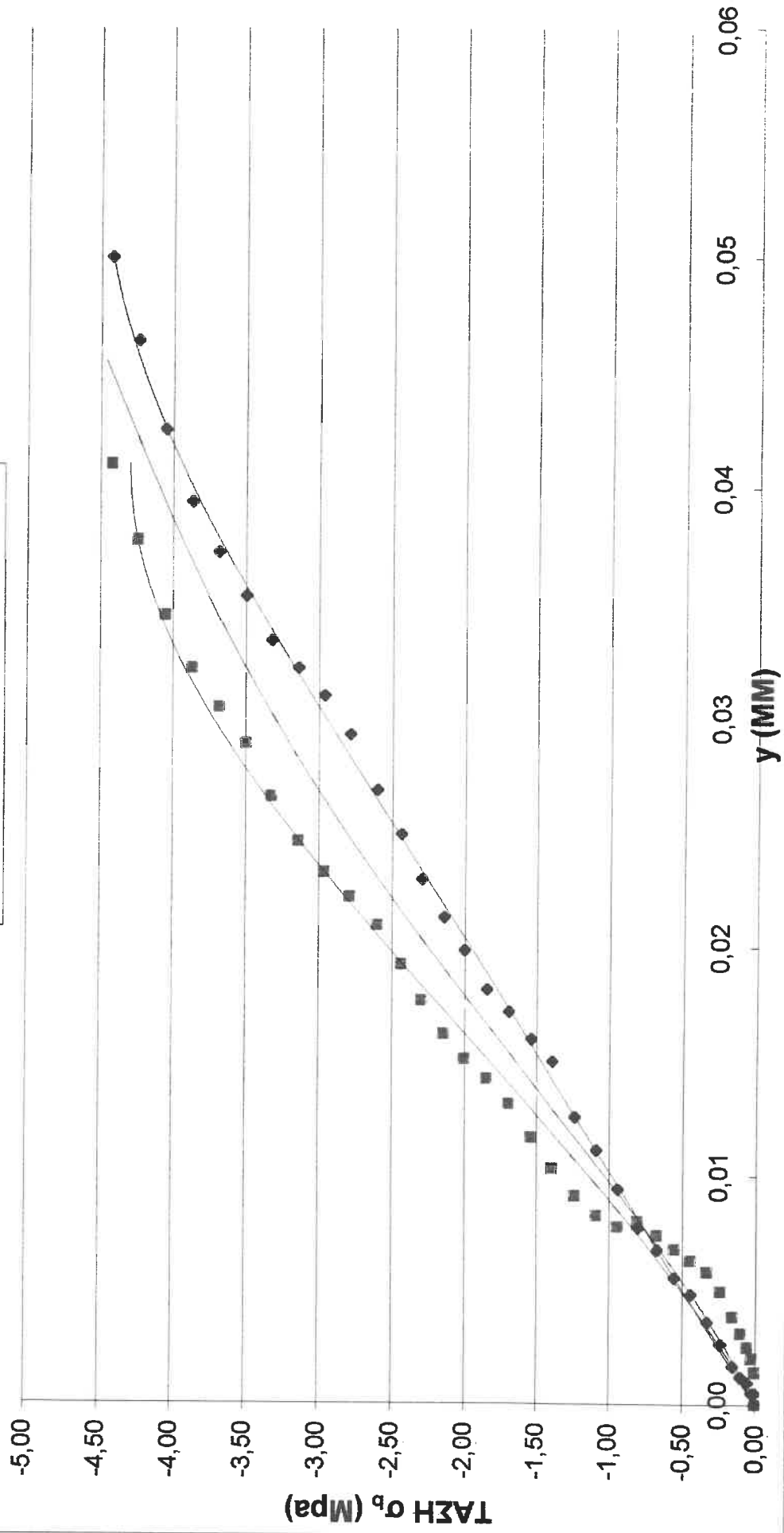
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 18

ΤΑΣΗ ΜΕΣΗ ■ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ ♦ ΤΑΣΗ ΑΡΙΣΤ



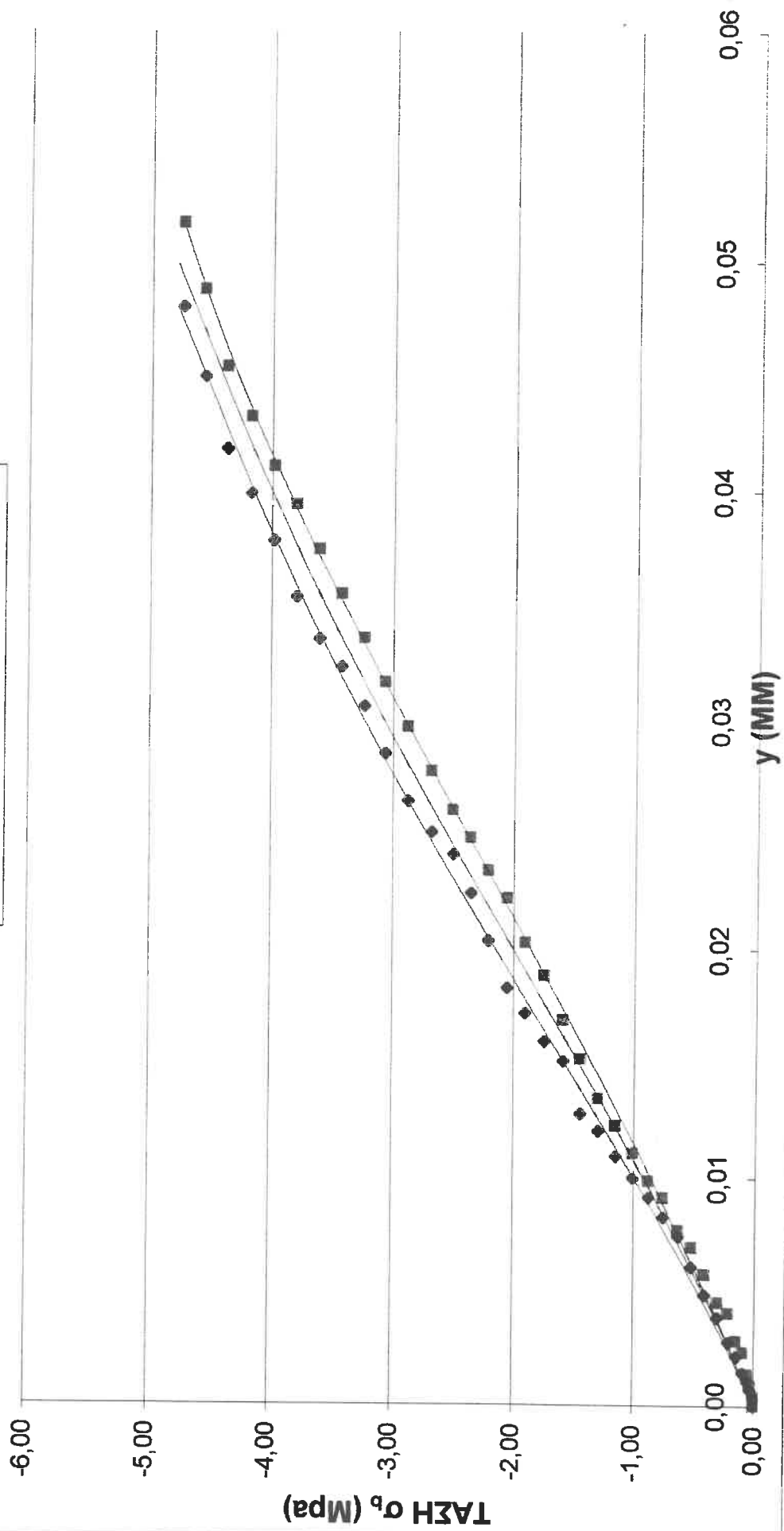
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 19

ΤΑΣΗ ΜΕΣΗ ■ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ ♦ ΤΑΣΗ ΑΡΙΣΤ



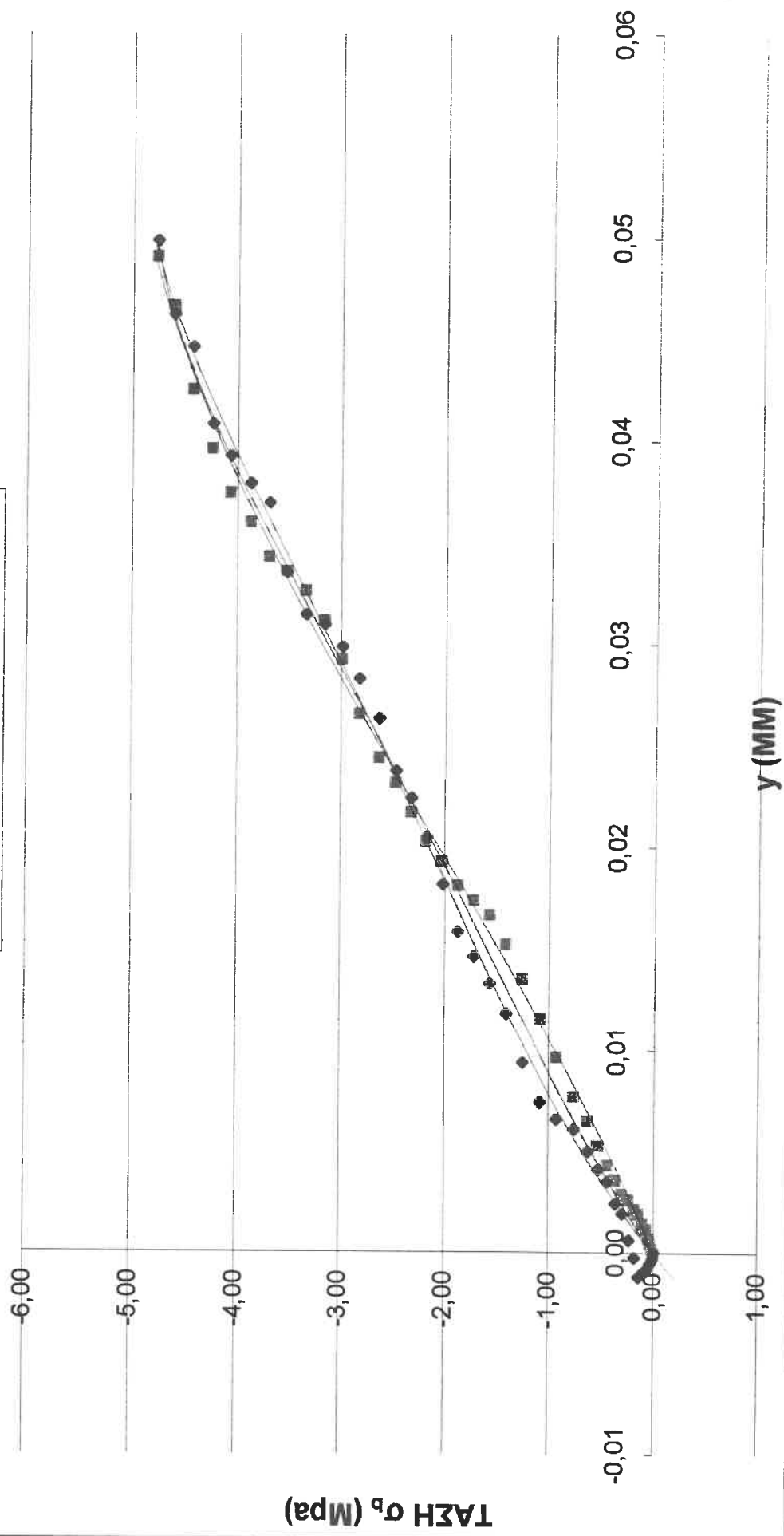
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 20

ΤΑΣΗ ΜΕΣΗ ■ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ ♦ ΤΑΣΗ ΑΡΙΣΤ



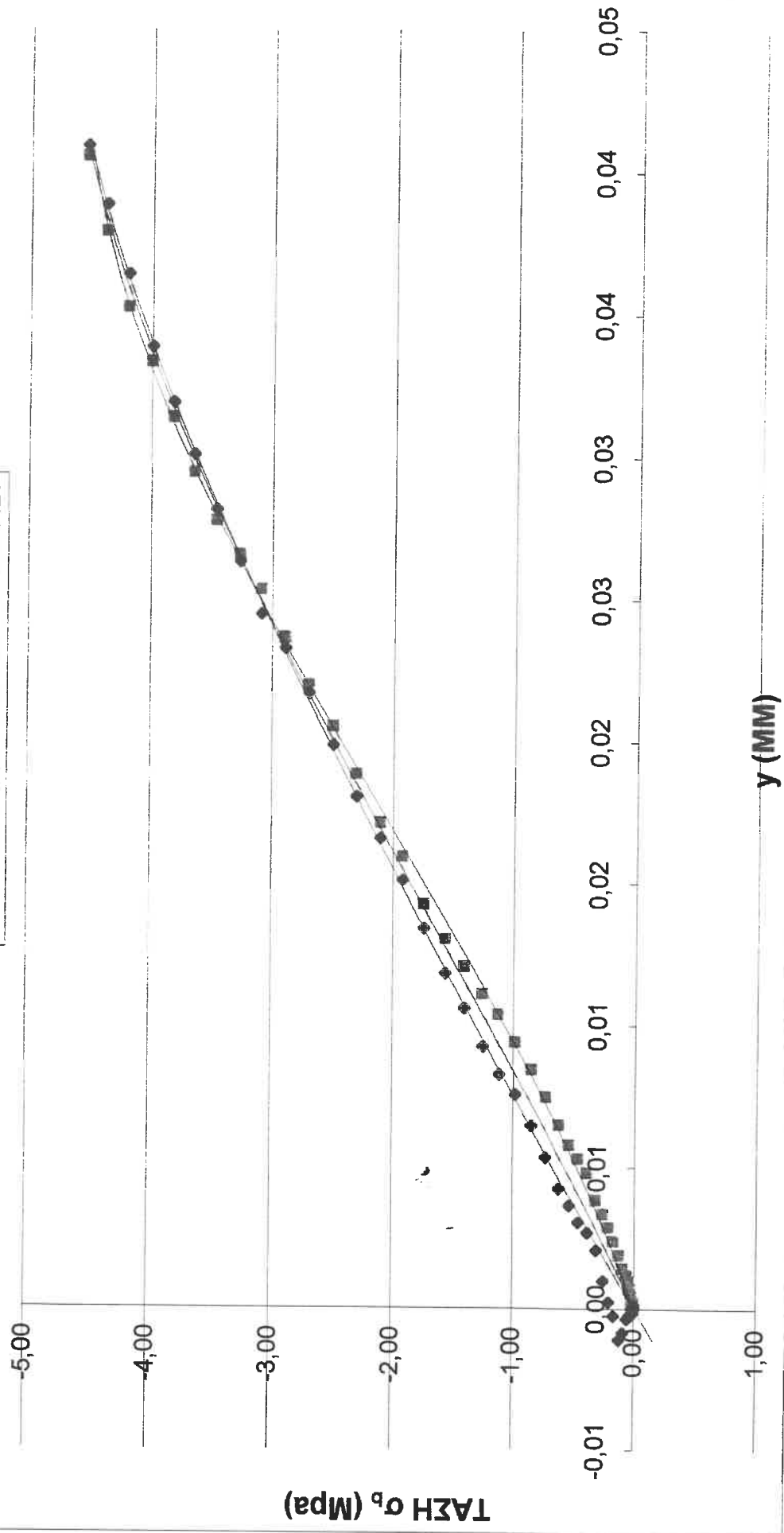
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 21

ΤΑΣΗ ΜΕΣΗ ■ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ ◆ ΤΑΣΗ ΑΡΙΣΤ



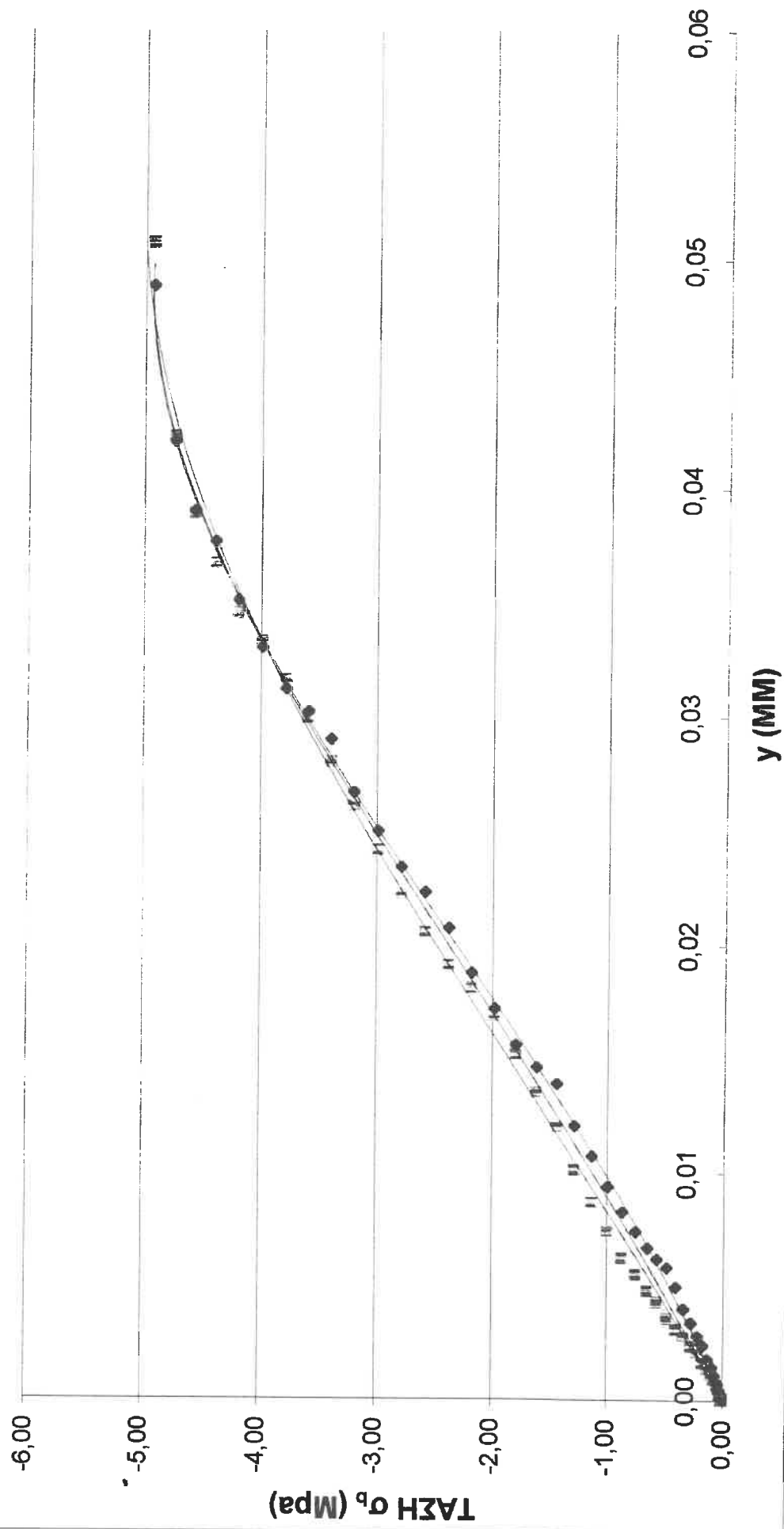
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 22

ΤΑΣΗ ΜΕΣΗ ■ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ ♦ ΤΑΣΗ ΑΡΙΣΤ



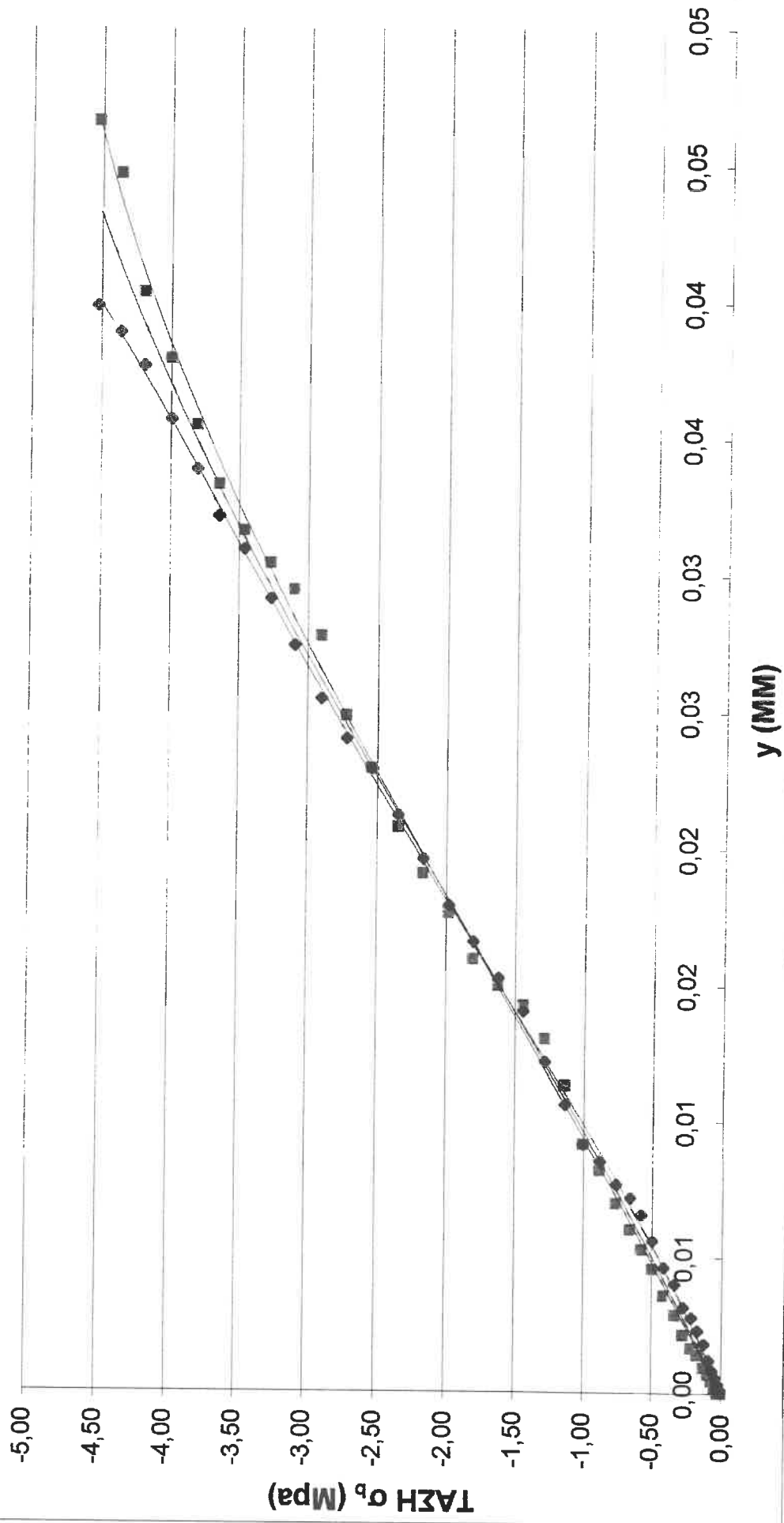
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 23

ΤΑΣΗ ΜΕΣΗ ◊ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ ◊ ΤΑΣΗ ΑΡΙΣΤ



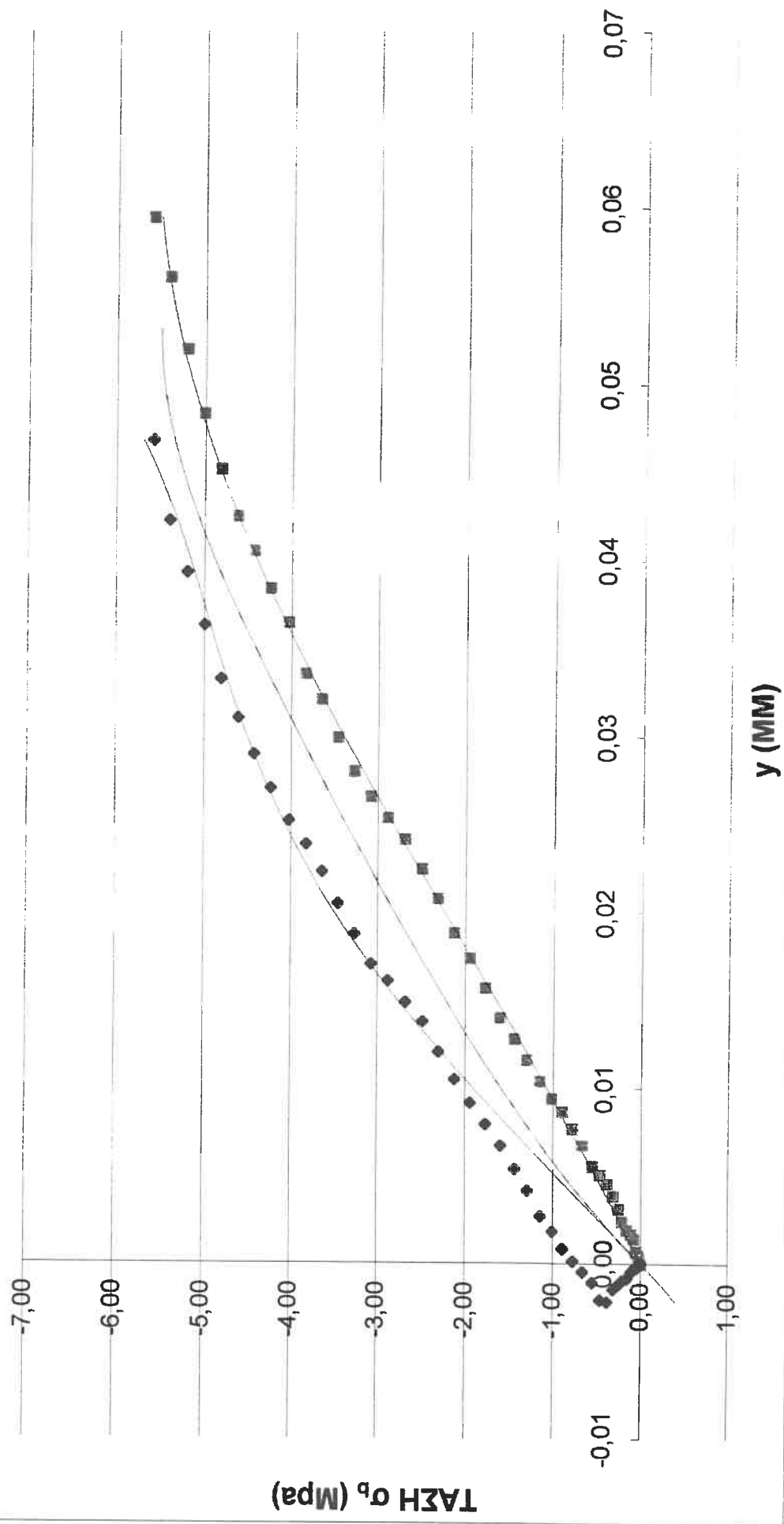
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ 24

ΤΑΣΗ ΜΕΣΗ ■ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ ◆ ΤΑΣΗ ΑΡΙΣΤ



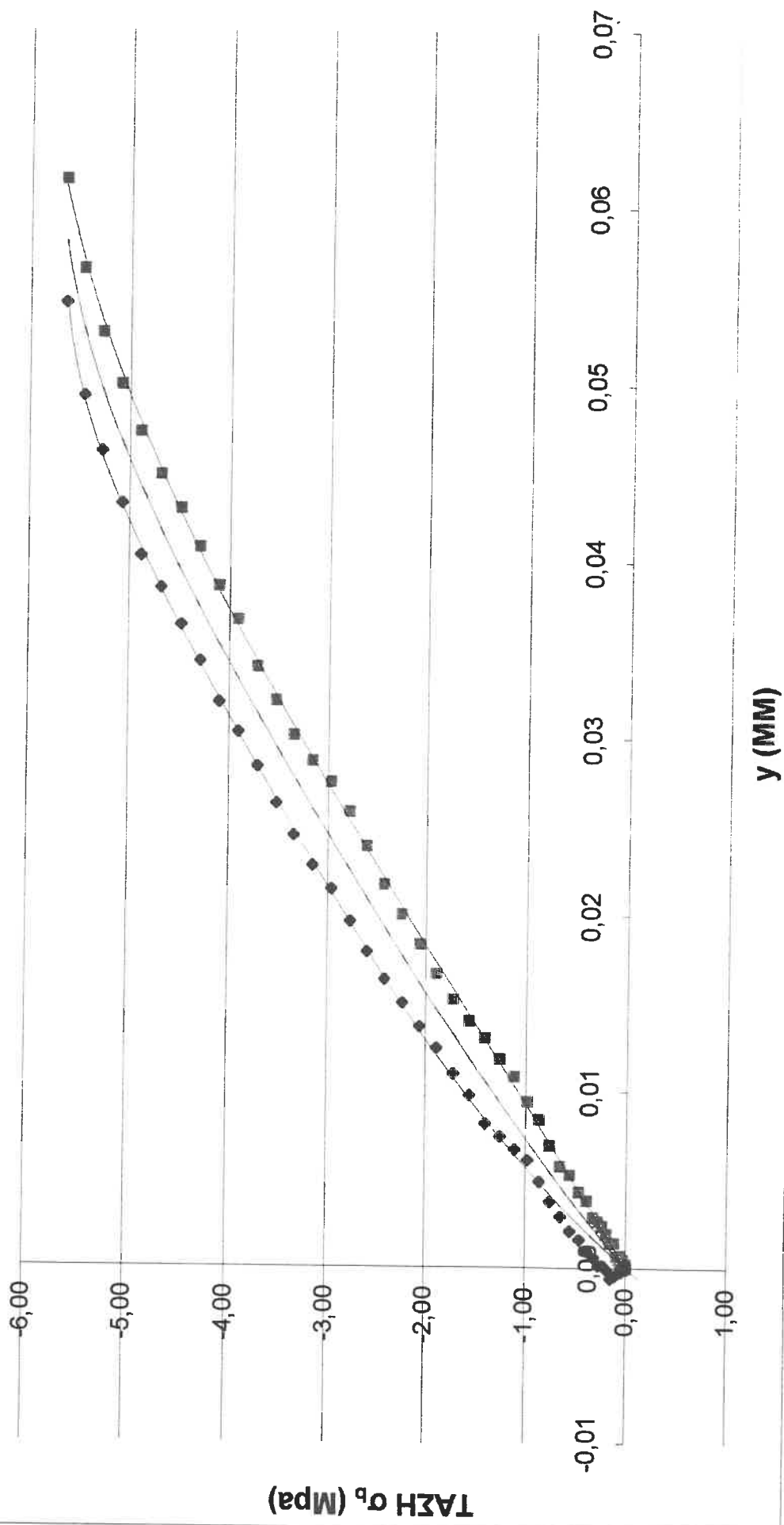
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ Α

ΤΑΣΗ ΜΕΣΗ ■ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ ♦ ΤΑΣΗ ΑΡΙΣΤ



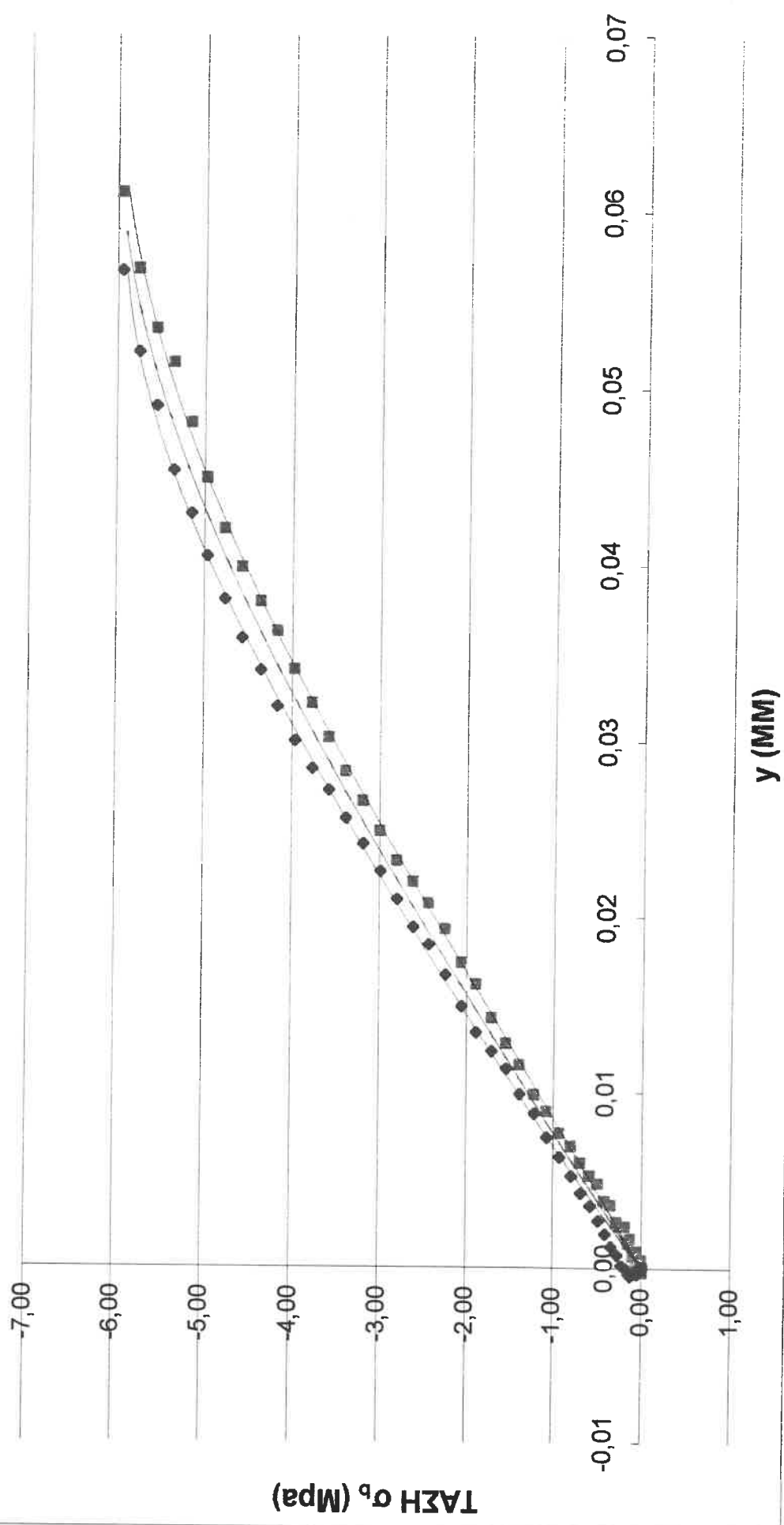
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ Β

ΤΑΣΗ ΜΕΣΗ ■ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ ♦ ΤΑΣΗ ΑΡΙΣΤ



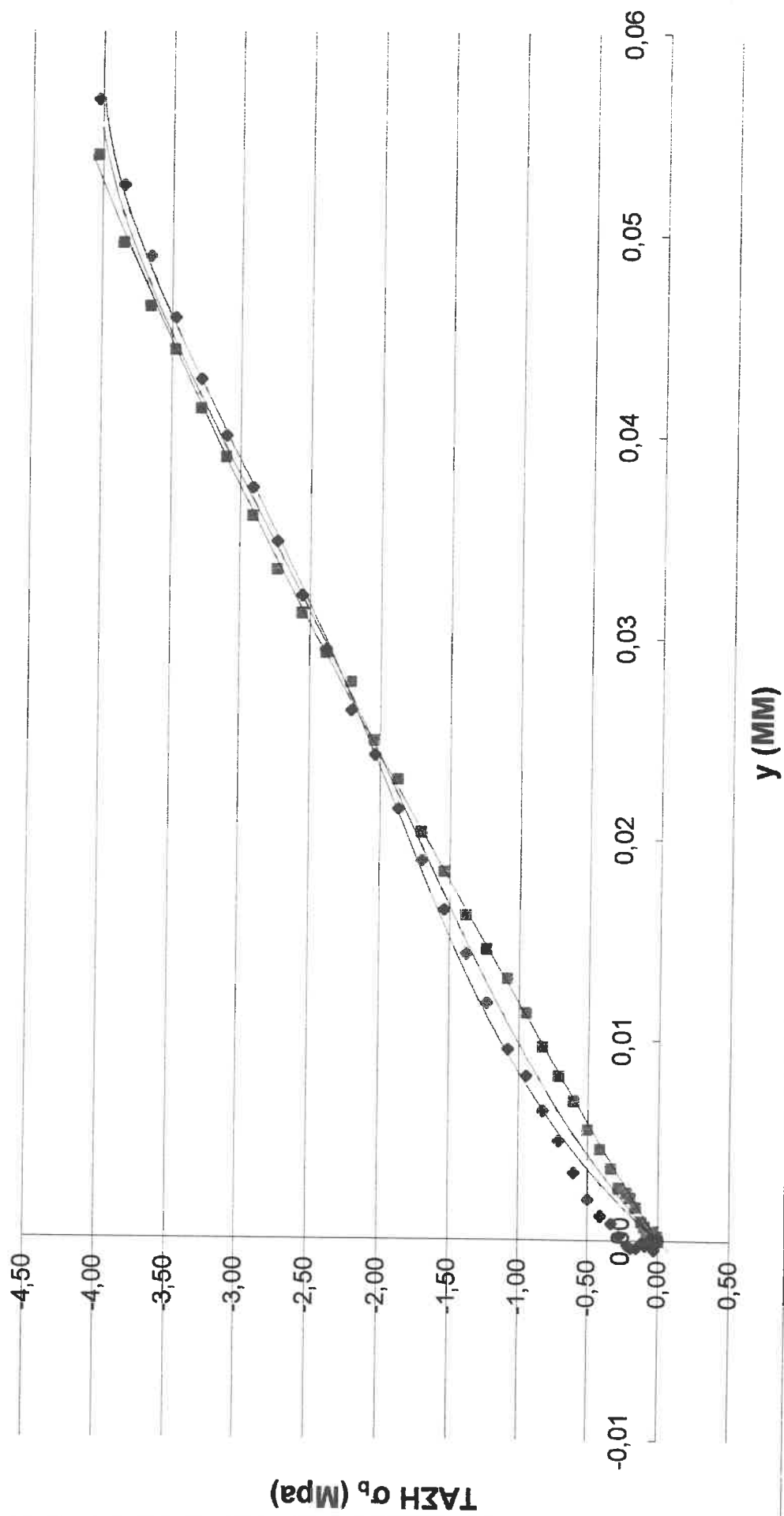
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ Γ

ΤΑΣΗ ΜΕΣΗ ■ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ ◆ ΤΑΣΗ ΑΡΙΣΤ



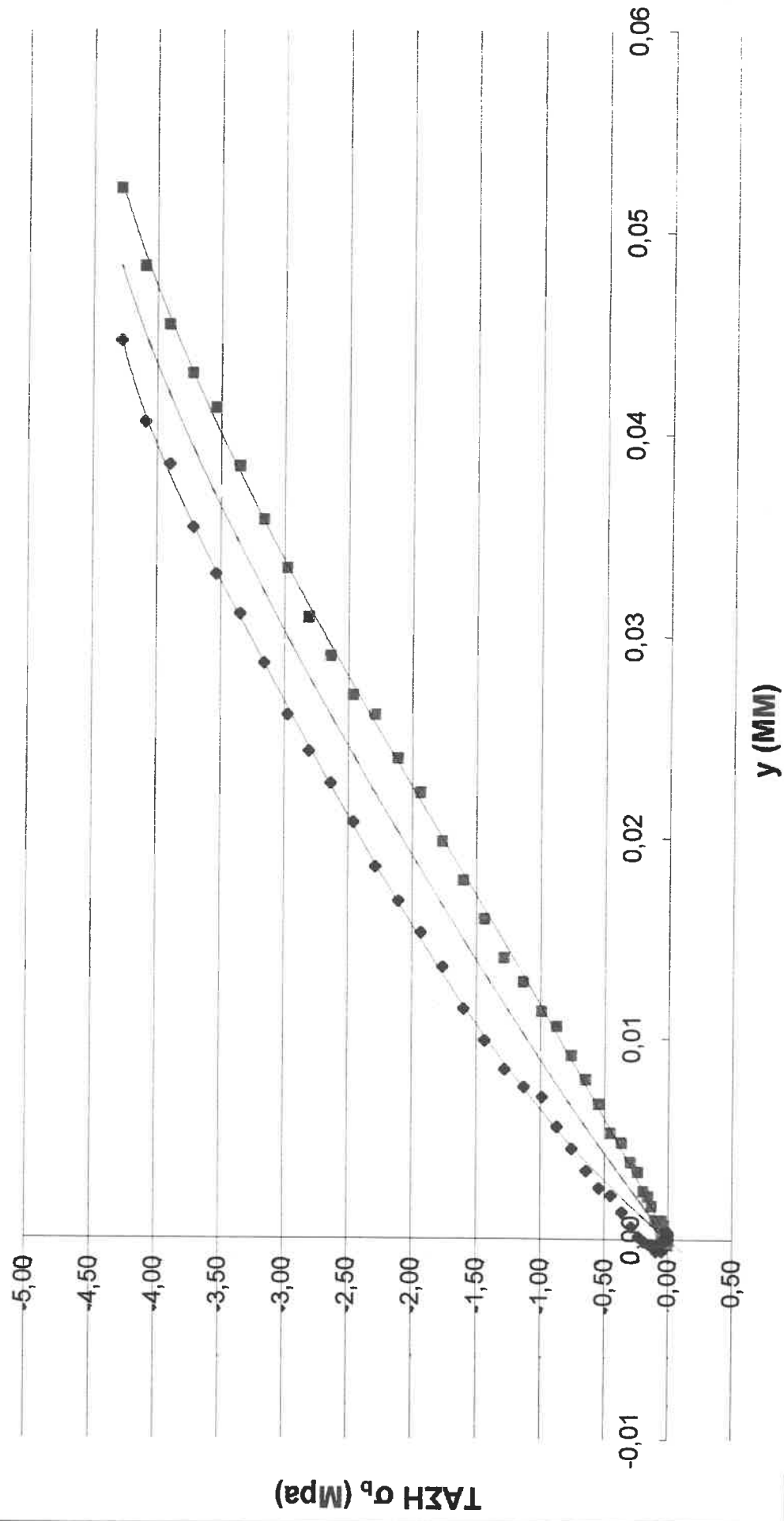
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥΔ

ΤΑΣΗ ΜΕΣΗ ■ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ ♦ ΤΑΣΗ ΑΡΙΣΤ



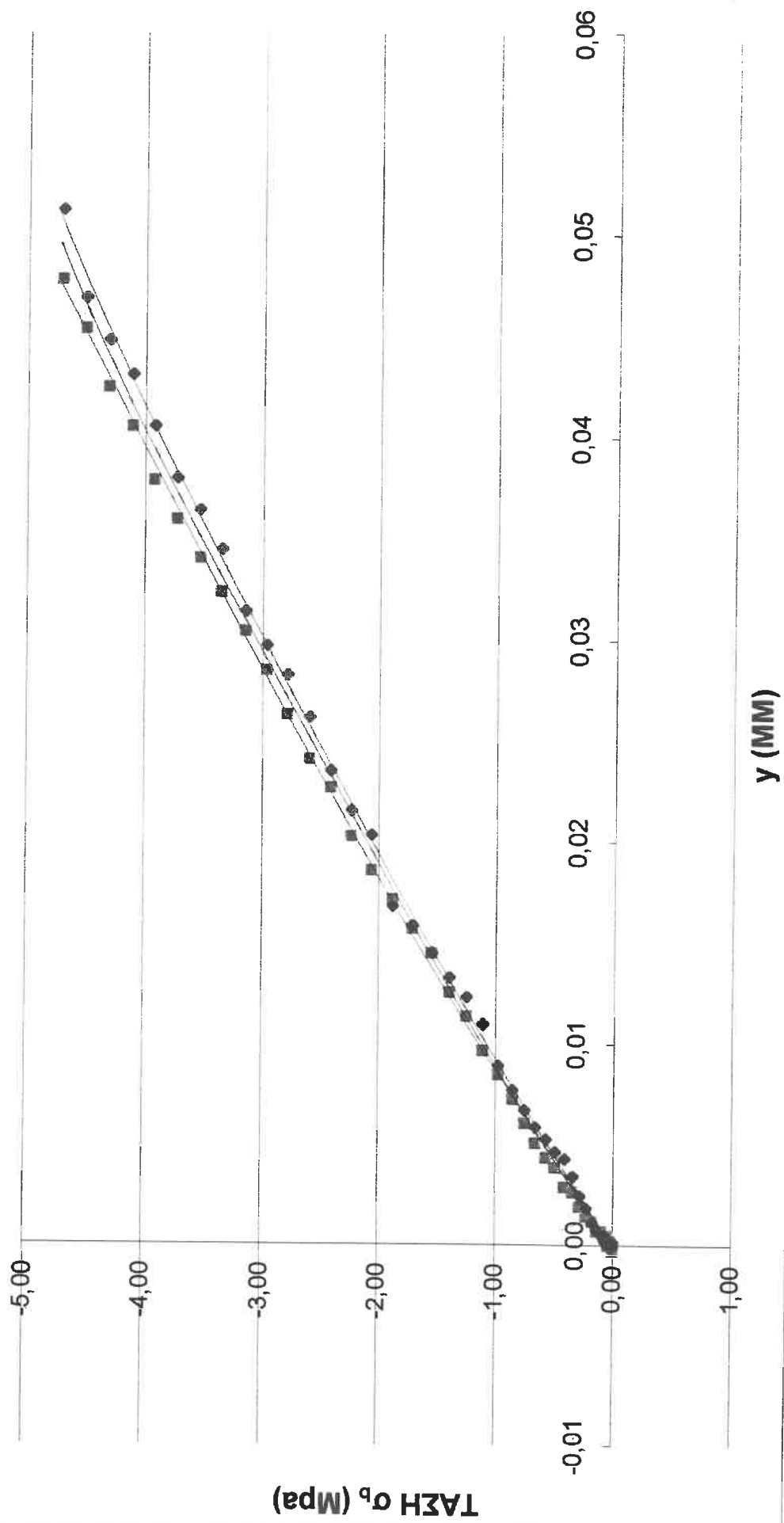
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ

ΤΑΣΗ ΜΕΣΗ ■ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ ♦ ΤΑΣΗ ΑΡΙΣΤ



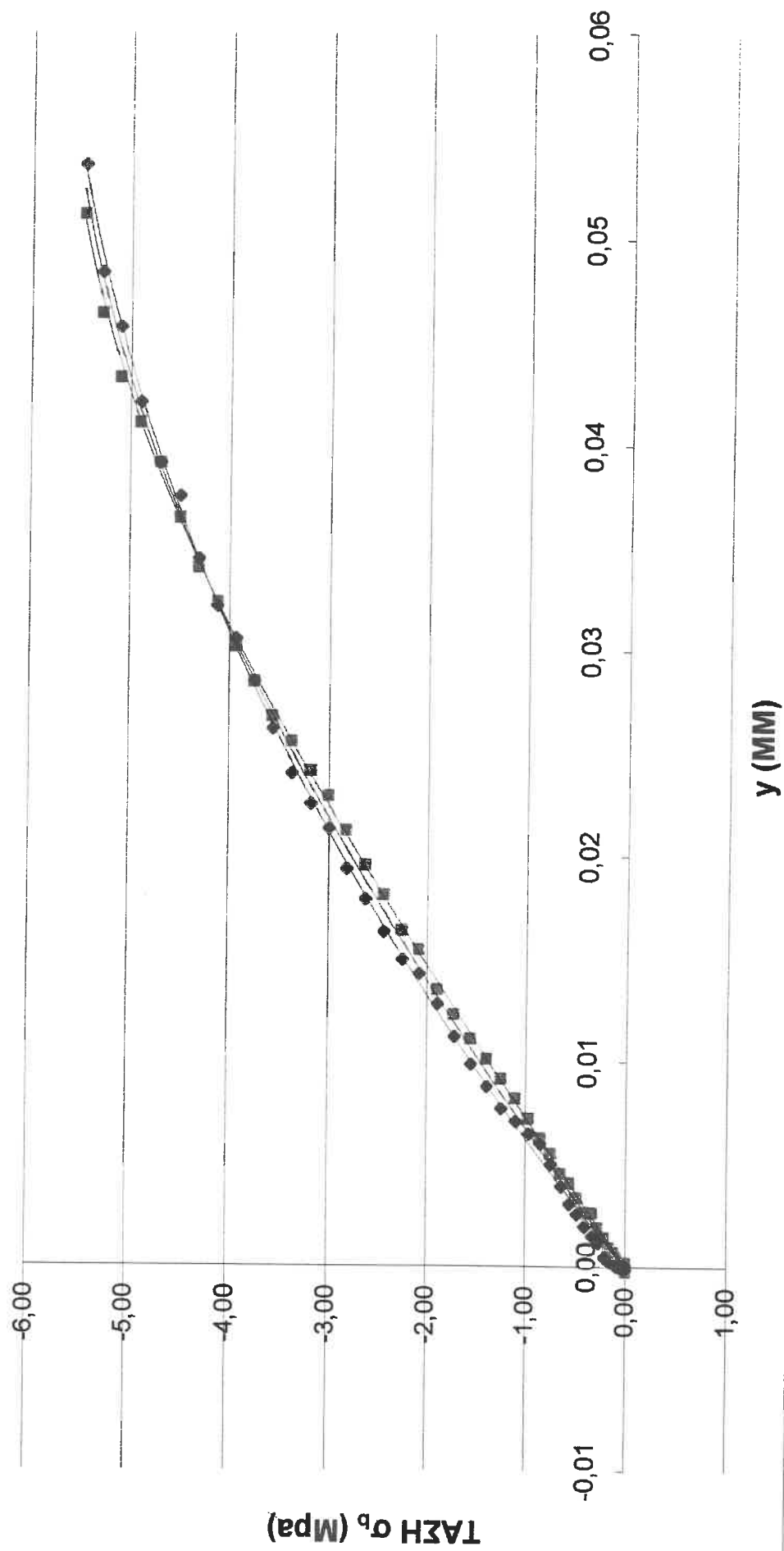
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ Z

ΤΑΣΗ ΜΕΣΗ ■ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ ◆ ΤΑΣΗ ΑΡΙΣΤ

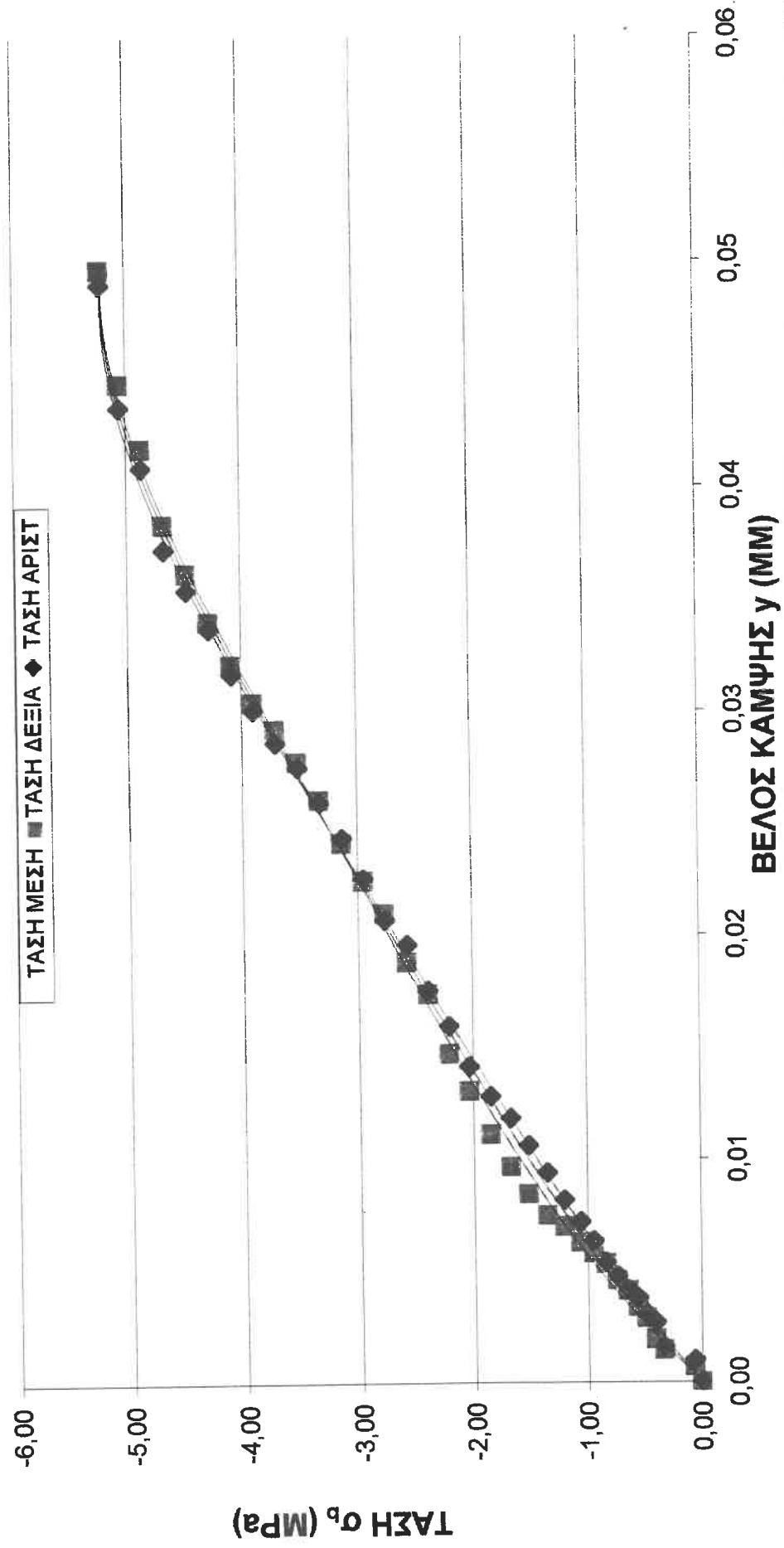


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ Η

ΤΑΣΗ ΜΕΣΗ ■ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ ♦ ΤΑΣΗ ΑΡΙΣΤ



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ Θ



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΤΑΣΗΣ - ΒΕΛΟΥΣ ΚΑΜΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ Ι

ΤΑΣΗ ΜΕΣΗ ■ ΤΑΣΗ ΔΕΞΙΑ ◆ ΤΑΣΗ ΑΡΙΣΤ

