

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ : Σ. ΚΟΛΙΑΣ

**ΜΗΧΑΝΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ
ΕΛΑΦΡΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ ΜΕ ΑΔΡΑΝΗ
ΑΠΟ ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΗ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗ**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΚΟΜΠΟΤΙΑΤΗΣ ΠΑΝΑΓΙΩΤΗΣ

ΖΑΦΟΛΙΑΣ ΑΡΙΣΤΕΙΔΗΣ

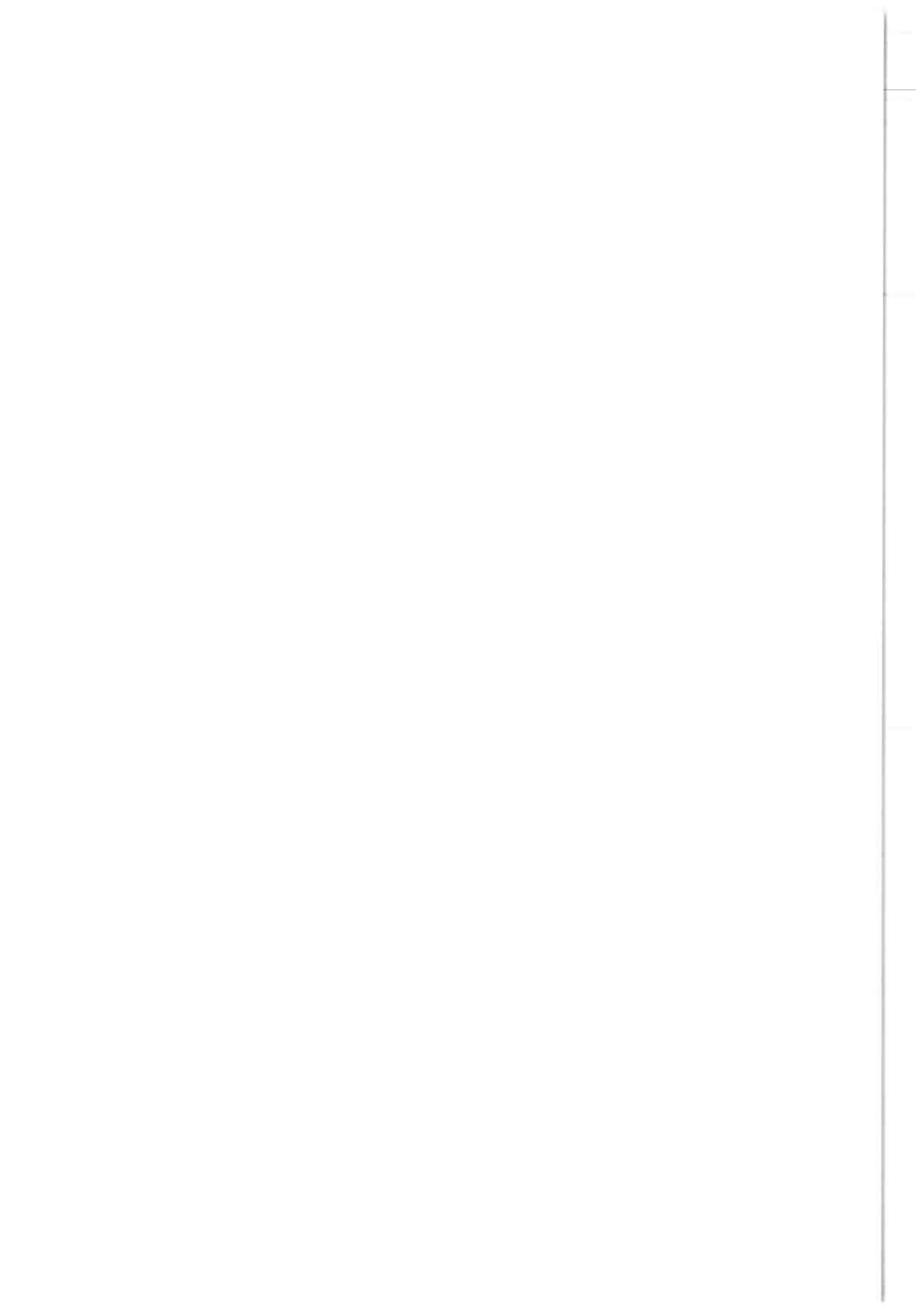
ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 1996

Αισθανόμαστε την ανάγκη να ευχαριστήσουμε θερμά τον Αναπληρωτή Καθηγητή του Ε.Μ.Π και Δρ. Πολιτικό Μηχανικό της Ένωσης Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος κ. Σ. Κόλια για την πολύτιμη βοήθεια που μας παρείχε κατά τη διάρκεια της εκπόνησης αυτής της εργασίας.

Επίσης, ευχαριστούμε την Ένωση Τσιμεντοβιομηχανιών Ελλάδος για την παραχώρηση του εργαστηρίου, στο οποίο πραγματοποιήθηκε το μεγαλύτερο τμήμα του πειραματικού μέρους της εργασίας.

Ευχαριστούμε τέλος την Διπλωματούχο Πολιτικό Μηχανικό Μ. Κατσάκου για την πολύτιμη βοήθειά της στο εργαστηριακό μέρος, αλλά και στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Κομποτιάτης Παναγιώτης
Ζαφόλιας Αριστείδης



ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο	
ΤΟ ΚΟΙΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ	
1.1 ΤΑ ΥΛΙΚΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΚΟΙΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	3
1.1.1 Τσιμέντο	4
1.1.1.1 Παραγωγή.....	4
1.1.1.2 Χημική σύνθεση.....	5
1.1.1.3 Τύποι τσιμέντων.....	6
1.1.1.4 Ενυδάτωση τσιμέντου.....	8
1.1.1.5 Πρόσμικτα υλικά του τσιμέντου.....	11
1.1.2 Αδρανή υλικά.....	12
1.1.2.1 Γενικά.....	12
1.1.2.2 Κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών.....	16
1.1.2.3 Χαρακτηριστικά μεγέθη κοκκομετρικής γραμμής.....	19
1.1.3 Το νερό.....	20
1.2 ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	22
1.2.1 Αναλογίες υλικών σύνθεσης.....	22
1.2.2 Μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος.....	24
1.2.3 Οι απαιτούμενες ποσότητες υλικών για 1m ³ σκυροδέματος.....	26
1.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	28
1.3.1 Ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος	28
1.3.1.1 Γενικά	28
1.3.1.2 Εξίδρωση	29
1.3.1.3 Απόμειξη	31
1.3.1.4 Εργασιμότητα	31
1.3.2 Ιδιότητες του στερεού σκυροδέματος	35
1.3.2.1 Η αντοχή του σκυροδέματος	35
1.3.2.2 Η εξάρτηση της αντοχής από την ποσότητα του νερού και τις αναλογίες σύνθεσης.....	38
1.3.2.4 Η μέτρηση της αντοχής	39
1.4 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ	40
1.4.1 Ο λόγος πολτού / χώρου	42
1.5 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΔΕΣΜΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ-ΑΔΡΑΝΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	44
1.5.1 Παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή των δεσμών.....	48
1.6 Η ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	53
1.7 ΤΑ ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ	53
1.7.1 Γενικά.....	53
1.7.2 Ρευστοποιητικά.....	55
1.7.3 Αερακτικά	55
1.7.4 Επιβραδυντικά.....	56
1.7.5 Επιταχυντικά.....	56
1.7.6 Στεγανοποιητικά.....	57
1.7.7 Αντιπαγετικά	58

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

ΕΛΑΦΡΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΑ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ.....	59
2.2 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΕΛΑΦΡΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ.....	60
2.3 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΑ ΜΕ ΕΛΑΦΡΑ ΑΔΡΑΝΗ.....	61
2.3.1 Κισηρομπετόν.....	61
2.3.2 Περλιτομπετόν.....	63
2.3.3 Σκωριοκισηρομπετόν.....	63
2.3.4 Σπογγοκεραμομπετόν.....	64
2.3.5 Ξυλομπετόν.....	64
2.3.6 Σκυρόδεμα από διογκωμένη πολυστερίνη.....	65
2.4 ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΑ.....	66
2.4.1 Αεριομπετόν.....	66
2.4.2 Αφρομπετόν.....	67
2.5 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΑ ΧΩΡΙΣ ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΟ ΥΛΙΚΟ.....	68
2.6 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΛΑΦΡΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	71
2.6.1 Αμερικάνικοι Κανονισμοί.....	73
2.6.2 Βρετανικοί Κανονισμοί.....	76
2.7 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΕΛΑΦΡΑ ΑΔΡΑΝΗ.....	78
2.7.1 Πυκνότητα.....	78
2.7.2 Στεγνό ειδικό βάρος.....	79
2.7.3 Ειδικό βάρος σκυροδέματος στην φάση του καλουπώματος.....	79
2.7.4 Αντοχή σε θλίψη.....	80
2.7.5 Μέτρο ελαστικότητας.....	81
2.7.6 Συστολή ξηράνσεως.....	82
2.7.8 Εργασιμότητα.....	83
2.7.9 Ικανότητα διάτρησης.....	84
2.7.10 Θερμική αγωγιμότητα.....	84
2.7.11 Αντίσταση στη φωτιά.....	85

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3ο

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΝΤΟΧΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

3.1 ΕΛΕΓΧΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ.....	87
3.1.1 Γενικά.....	87
3.1.2 Η δοκιμή A.S.T.M για κυλινδρικά δοκίμια.....	87
3.1.2.1 Τα καλούπια.....	88
3.1.2.2 Διαδικασία λήψης δοκιμίων.....	88
3.1.2.3 Η ωρίμανση των δοκιμίων.....	89
3.1.2.4 Διαμόρφωση κυλινδρικών δοκιμίων (καπέλωμα).....	90
3.1.2.5 Καθορισμός της θλιπτικής αντοχής (A.S.T.M C39).....	91
3.1.3 Άλλοι έλεγχοι προσδιορισμού της θλιπτικής αντοχής.....	91
3.1.3.1 Έλεγχος κυβικών δοκιμίων.....	92
3.1.3.2 Έλεγχος πρισματικών δοκιμίων (έλεγχος ισοδύναμου κύβου).....	92
3.1.4 Παράγοντες που επηρεάζουν την μετρούμενη θλιπτική αντοχή.....	94
3.1.4.1 Η κατανομή των τάσεων στα δοκίμια.....	94
3.1.4.2 Η μηχανή θραύσης.....	97
3.1.4.3 Η επιρροή του λόγου h/d	99
3.1.4.4 Η γεωμετρία των δοκιμίων.....	100
3.1.4.5 Η ταχύτητα φόρτισης.....	102
3.1.4.6 Η περιεχόμενη υγρασία.....	102
3.1.4.7 Η θερμοκρασία κατά τον έλεγχο.....	103

3.2 ΑΛΛΟΙ ΤΥΠΟΙ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	105
3.2.1 Γενικά.....	105
3.2.2 Εφελκυστική αντοχή.....	105
3.2.3 Καμπτική αντοχή.....	109
3.3 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΕΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΙ ΣΥΜΜΟΡΦΩΣΕΩΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	112
3.3.1 Γενικά.....	112
3.3.2 Εργοστασιακό σκυρόδεμα.....	113
3.3.3 Εργοταξιακό σκυρόδεμα μικρών έργων.....	114
3.3.4 Εργοταξιακό σκυρόδεμα μεγάλων έργων.....	115
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4ο	
ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	
4.1 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ.....	117
4.2 ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	118
4.3 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	123
4.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	125
4.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	127
4.6 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	131
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο	
ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ	
5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	132
5.2 ΑΡΧΙΚΑ ΜΙΓΜΑΤΑ.....	133
5.2.1 Μίγματα 1 — 10.....	134
5.2.1.1 Συμπεράσματα.....	135
5.2.3 Διαγράμματα αρχικών μιγμάτων — Σχόλια.....	141
5.3 ΚΥΡΙΑ ΕΡΕΥΝΑ — ΜΙΓΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ.....	149
5.3.1 Είδη δοκιμών.....	150
5.3.2 Τα καλούπια.....	150
5.3.3 Διαδικασία παραγωγής μιγμάτων.....	151
5.4 ΔΟΚΙΜΗ ΘΛΙΨΗΣ ΚΥΒΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	152
5.4.1 Διαγράμματα θλιπτικής αντοχής κυβικών δοκιμών — Σχόλια.....	152
5.5 ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΤΙΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ (ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ).....	167
5.5.1 Διαγράμματα εφελκυστικής αντοχής κυλινδρικών δοκιμών — Σχόλια.....	168
5.6 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΕΛΑΦΡΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	181
5.6.1 Διαγράμματα τάσεων — παραμορφώσεων.....	183
5.6.2 Διαγράμματα μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας — Σχόλια.....	183
5.6.3 Διαγράμματα θλιπτικής αντοχής κυλινδρικών δοκιμών.....	206
5.7 ΛΟΓΟΙ ΑΝΤΟΧΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.....	216
5.8 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ.....	224
5.9 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	227
5.10 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.....	230
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	232

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το Ρωμαϊκό Κολοσσαίο παραμένει στην θέση του ακόμη και μετά από 2000 χρόνια χάρη στο σκυρόδεμα, παρά την κλοπή των εξωτερικών του μαρμάρων. Το φράγμα Grant Coulee περιέχει πάνω από 8 εκατομμύρια κυβικά μέτρα σκυροδέματος, ενώ πάνω από 4,8 εκατομμύρια χιλιόμετρα του Αμερικάνικου συστήματος αυτοκινητοδρόμων είναι φτιαγμένα από κοινό σκυρόδεμα.

Στην αρχή του αιώνα πολλοί μηχανικοί χαιρέτησαν τον αιώνα αυτόνως τον ``αιώνα του σκυροδέματος``. Πράγματι στην τελευταία εκατονταετία η χρήση όλων των τύπων σκυροδέματος αναπτύχθηκε σε μέγιστο βαθμό πράγμα το οποίο οφείλεται κυρίως σε δύο γεγονότα.

α) Στη βιομηχανική παραγωγή του τσιμέντου (1824)

β) Στην επινόηση του οπλισμένου σκυροδέματος (1867)

Ωστόσο η χρήση των διαφόρων σκυροδεμάτων είναι παλαιότατη. Οι Ρωμαίοι πριν από δύο χιλιάδες χρόνια χρησιμοποιούσαν σε μεγάλη κλίμακα για χυτές κατασκευές το κουρασάνι ένα δομικό υλικό από μίγμα σκύρων, άμμου, ασβέστη και νερού. Τα σκύρα ήταν ειδικής προέλευσης γιατί αποτελούνταν από τεμάχια κεραμικών ειδών, ενώ η άμμος προερχόταν από παρόμοια αλεσμένα υλικά. Στη Σαντορίνη επίσης για την κατασκευή των οροφών κυρίως των οικιών χρησιμοποιούσαν σκυρόδεμα το οποίο ήταν μίγμα σκύρων από ελαφρόπετρά (κίσσηρη), θηραϊκή γη, ασβέστη και νερό.

Σήμερα παντού στον κόσμο το σκυρόδεμα με τις διάφορες μορφές του είναι το υλικό το οποίο χρησιμοποιείται περισσότερο από οποιοδήποτε άλλο. Ιδιαίτερα το κοινό σκυρόδεμα σκληρό και κατεργάσιμο αποτε-

λεί το πιο ευρέως χρησιμοποιούμενο οικοδομικό υλικό καθώς και το φθηνότερο.

Τα σκυροδέματα ανάλογα με το βάρος τους κατατάσσονται σε κοινά, βαριά και ελαφρά.

Επίσης μπορούν να αναφερθούν μια σειρά από ειδικά σκυροδέματα όπως είναι:

- Το ινοπλισμένο σκυρόδεμα
- Το προεντεταμένο σκυρόδεμα
- Το εκοξευόμενο σκυρόδεμα

Σ' αυτή την διπλωματική εργασία το κύριο ερευνητικό τμήμα έχει σαν θέμα του την μελέτη μιας κατηγορίας σκυροδέματος το λεγόμενο ελαφροσκυρόδεμα, και ειδικότερα αυτό το που τα αδρανή του αποτελούνται από κόκκους διογκωμένης πολυστερίνης. Λόγω έλλειψης αρχικών στοιχείων έγιναν πολλές δοκιμαστικές παρτίδες μέχρι να καταλήξουμε σε τρεις αναλογίες σύνθεσης με βάση το λόγο Αδρανή / Πολτο. Με βάση αυτές κατασκευάστηκαν οι τελικές παρτίδες δοκιμών (κυβικών και κυλινδρικών) απ' τις οποίες στόχος μας ήταν η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με :

- α) Την αντοχή σε θλίψη του υλικού
- β) Το μέτρο ελαστικότητας του υλικού
- γ) Την αντοχή σε εφελκυσμό του υλικού

Στα κεφάλαια που ακολουθούν γίνεται διεξοδική αναφορά στο κοινό σκυρόδεμα το οποίο αποτελεί και την κυριότερη κατηγορία σκυροδέματος, στους διάφορους τύπους ελαφροσκυροδεμάτων με τα κυριότερα χαρακτηριστικά τους, και φυσικά σ' όλη την πειραματική διαδικασία και τα συμπεράσματα που εξήχθησαν απ' αυτή για το ελαφροσκυρόδεμα με διογκωμένη πολυστερίνη ως αδρανή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1ο

ΤΟ ΚΟΙΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

1.1 ΤΑ ΥΛΙΚΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΚΟΙΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Το σκυρόδεμα αποτελεί ένα τεχνητό σύνθετο στερεό υλικό. Σχηματίζεται με την ανάμιξη σε κατάλληλες αναλογίες τσιμέντου, νερού, άμμου και σκύρων (χαλίκια). Σε ορισμένες περιπτώσεις περιέχει και άλλα υλικά τα οποία ονομάζονται πρόσθετα μάζας. [4]

Τα δύο πρώτα υλικά ονομάζονται ενεργά γιατί αντιδρούν μεταξύ τους, σχηματίζοντας ένυδρες ενώσεις οι οποίες στερεοποιούνται συγκολλώντας τα αδρανή υλικά, άμμο και σκύρα, μεταξύ τους σ' ένα τεχνητό σύνθετο υλικό.

Ο τσιμεντοπολτός ο οποίος σχηματίζεται από την χημική αντίδραση μεταξύ τσιμέντου και νερού, αρχικά έχει ρευστή μορφή. Στην συνέχεια λόγω της χημικής αντίδρασης μεταξύ τσιμέντου και νερού, και της ανάπτυξης της αντοχής, αποκτά στερεά μορφή και ονομάζεται πήγμα.

Το σκυρόδεμα μπορούμε να το κατατάξουμε σε κατηγορίες: [7], [1]

α) Ανάλογα με το βάρος του σε :

- Ελαφρύ με ειδικό βάρος $0,3 - 2 \text{ tn/m}^3$
- Κοινό με ειδικό βάρος $2 - 2,5 \text{ tn/m}^3$
- Βαρύ με ειδικό βάρος $3 - 5 \text{ tn/m}^3$

β) Ανάλογα με την σκλήρυνση του σε :

- Νωπό (1 — 3 ώρες μετά την παρασκευή του)
- Σκλήρυνμένο (6 — 12 ώρες τουλάχιστο μετά την παρασκευή του)

γ) Ανάλογα με την θέση ανάμιξης σε :

- Εργοταξιακό στο οποίο ο κύριος του έργου έχει πλήρη έλεγχο της παραγωγής του .
- Εργοστασιακό στο οποίο ο κύριος του έργου ελέγχει μόνο το έτοιμο προϊόν στην θέση της παράδοσης του.
- Έτοιμο το οποίο παρασκευάζεται σε απόσταση από το έργο και μεταφέρεται εκεί μετά από πλήρη ή μερική ανάμιξη.

δ) Ανάλογα με τις ειδικές απαιτήσεις που τίθενται σε :

- Σκυρόδεμα υψηλής αντίστασης στην υδατοπερατότητα.
- Σκυρόδεμα ανθεκτικό σε χημικές προσβολές.
- Σκυρόδεμα ανθεκτικό σε τριβή.
- Σκυρόδεμα ανθεκτικό στον παγετό.
- Σκυρόδεμα ανθεκτικό σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες.
- Σκυρόδεμα κρυογενικό (αποθήκευση αερίων σε υγρά μορφή)

1.1.1 ΤΣΙΜΕΝΤΟ

1.1.1.1 ΠΑΡΑΓΩΓΗ

Το τσιμέντο είναι βιομηχανικό προϊόν το οποίο παρασκευάζεται από την σύγχρονη όπτηση ασβεστόλιθου και αργίλου (καμιά φορά και σχιστόλιθου). Η διαδικασία παραγωγής του αποτελείται από τα εξής στάδια:

α) Εξόρυξη αργιλικών εδαφών ξεχωριστά από ασβεστολιθικά πετρώματα τα οποία οδηγούνται σε σπαστήρες για να αποκτήσουν διαμέτρους μερικών εκατοστών.

β) Ανάμιξη των δύο υλικών που προκύπτουν (προομογενοποίηση)

γ) Το προϊόν προομογενοποίησης αλέθεται σε τριβεία, ώστε να αποκτήσει διάμετρο λίγων χιλιοστών. Το προϊόν αυτό ονομάζεται φαρίνα.

δ) Η φαρίνα εισάγεται στο πάνω άκρο κυλινδρικής καμίνου το οποίο βρίσκεται σε θερμοκρασία $600\text{ }^{\circ}\text{C}$. Στο κάτω άκρο που είναι το σημείο εξόδου των προϊόντων η θερμοκρασία φτάνει στους $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Τα προϊόντα της όπτησης ονομάζονται klinker, έχουν διάμετρο μερικών εκατοστών, χρώμα μαυροπράσινο και αποτελούν το κύριο συστατικό του τσιμέντου.

ε) Από την άλεση των klinker, προκύπτει ένα λεπτόκοκκο υλικό γνωστό ως "τσιμέντο πόρτλαντ". Η λεπτότητα αλέσεως του κλίνκερ επηρεάζει την ταχύτητα ενυδάτωσης του τσιμέντου και άρα την ταχύτητα ανάπτυξης της αντοχής του, όχι όμως και την τελική τιμή αυτής. [1]

1.1.1.2 ΧΗΜΙΚΗ ΣΥΝΘΕΣΗ

Η χημική σύνθεση του τσιμέντου εξαρτάται από την χημική σύνθεση των πετρωμάτων που χρησιμοποιούνται ως πρώτες ύλες, από τον τρόπο παραγωγής, και κυρίως από τον χρόνο και την θερμοκρασία όπτησης.

Οι κύριες ενώσεις του τσιμέντου είναι το οξείδιο του ασβεστίου (CaO) και το οξείδιο του πυριτίου (SiO_2). Σε μικρότερες ποσότητες βρίσκονται ενώσεις όπως τα οξείδια του αργιλίου (Al_2O_3) και του σιδήρου (Fe_2O_3). Τα παραπάνω οξείδια βρίσκονται στο τσιμέντο με την μορφή ενώσεων οι οποίες είναι οι εξής :

α) Το πυριτικό τριασβέστιο 3CaOSiO_2 σε ποσοστό 54 % περίπου κατά βάρος.

β) Το πυριτικό διασβέστιο 2CaOSiO_2 σε ποσοστό 17 % περίπου κατά βάρος.

γ) Το αργιλικό τριασβέστιο $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$ σε ποσοστό 19 % περίπου κατά βάρος.

δ) Το αργιλοσιδηρικό τετρασβέστιο $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$ σε ποσοστό περίπου 9 % κατά βάρος.

Η αναλογία των παραπάνω συστατικών επηρεάζει την ταχύτητα ανάπτυξης της αντοχής, θετικά οι δύο πυριτικές ενώσεις και αρνητικά οι αργλικές. Εκτός των τεσσάρων συστατικών υπάρχουν και δευτερεύοντα, όπως είναι το οξείδιο του μαγνησίου (MgO), η ποσότητα του οποίου δεν πρέπει να ξεπερνά το 5 % του τσιμέντου, η γύψος (CaSO_4) η οποία προστίθεται για τη ρύθμιση της ταχύτητας πήξεως και τα αλκάλια (K_2O και Na_2O) τα οποία αν και σε μικρές ποσότητες είναι αβλαβή, σε μεγαλύτερες προκαλούν ανωμαλίες στην ταχύτητα πήξεως.

1.1.1.3 ΤΥΠΟΙ ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ

Σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Τσιμέντων [2] τα τσιμέντα χωρίζονται σε κατηγορίες ανάλογα με:

- α) Τη σύνθεσή τους
- β) Την αντοχή τους

Η σύνθεση καθορίζεται από τον τύπο του τσιμέντου (I, II, III, IV), ενώ η αντοχή από την κατηγορία (35, 45, 55). Οι αριθμοί αυτοί παριστάνουν την αντοχή του τσιμέντου σε ΜΡα, όπως αυτή καθορίζεται από τον Κανονισμό σε ηλικία 28 ημερών. Ο κάθε τύπος μπορεί επίσης να παρασκευασθεί σε κάθε μια από τις 3 κατηγορίες αντοχών.

Τύποι τσιμέντων [1]

- Τύπος I : Τσιμέντο πόρτλαντ.
(κλίνκερ + γύψος (2—3 %) + φίλλερ (έως 3 %))
- Τύπος II : Τσιμέντο πόρτλαντ με ποζολάνες.
(κλίνκερ + γύψος (2—3 %) + φίλλερ (έως 3 %) + ποζολάνες (έως 20 %))

- Τύπος III: Ποζολανικά τσιμέντα πόρτλαντ.
(κλίνκερ + γύψος (2 — 3 %) + φίλλερ (έως 3 %) + ποζολάνες (έως 40 %))
- Τύπος IV: Τσιμέντα πόρτλαντ ανθεκτικά σε θειικά άλατα.
(κλίνκερ ειδικής χημικής σύστασης + γύψος)

Κατηγορίες τσιμέντων

Ανάλογα με την αντοχή σε θλίψη (N/mm^2) πρότυπων δοκιμών κονιάματος σε ηλικία 28 ημερών τα τσιμέντα χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες αντοχών (ονομαστικές): [1]

- Κατηγορία αντοχών 35 : Αντοχή τσιμέντου 25 — 35 N/mm^2
- Κατηγορία αντοχών 45 : Αντοχή τσιμέντου 35 — 55 N/mm^2
- Κατηγορία αντοχών 55 : Αντοχή τσιμέντου άνω των 45 N/mm^2

Τα όρια των παραπάνω αντοχών πρέπει να καλύπτονται με ασφάλεια 99 % για τις ελάχιστες τιμές και 90 % για τις μέγιστες τιμές.

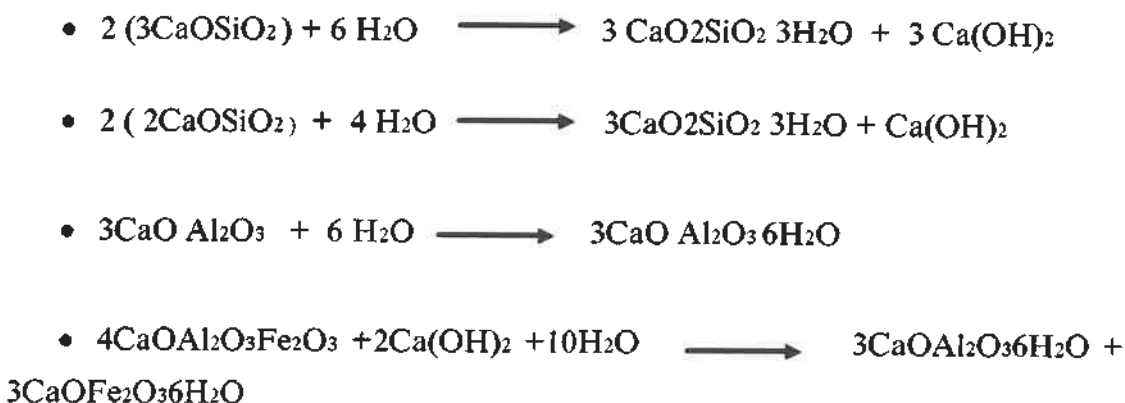
Στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται κυρίως ο τύπος II 35 το λεγόμενο "κοινό" τσιμέντο. Τα τσιμέντα II 35 και II 45 έχουν συνήθως βραδύτερη ανάπτυξη αντοχών, αλλά η τελική τιμή της αντοχής του σκυροδέματος είναι υψηλότερη, ενώ παρουσιάζουν και σχετική αντοχή στα θειικά. Σε ογκώδη έργα όπου υπάρχει ανάγκη για χαμηλή θερμότητα ενυδάτωσης χρησιμοποιείται ο τύπος II 35. Στις βιομηχανίες έτοιμου σκυροδέματος χρησιμοποιείται κυρίως ο τύπος I 45, ενώ το I 55 χρησιμοποιείται για την παρασκευή ανεπίχρηστου αρχιτεκτονικού σκυροδέματος, στην προκατασκευή και γενικά όπου απαιτείται υψηλή αντοχή. [1]

1.1.1.4 ΕΝΥΔΑΤΩΣΗ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

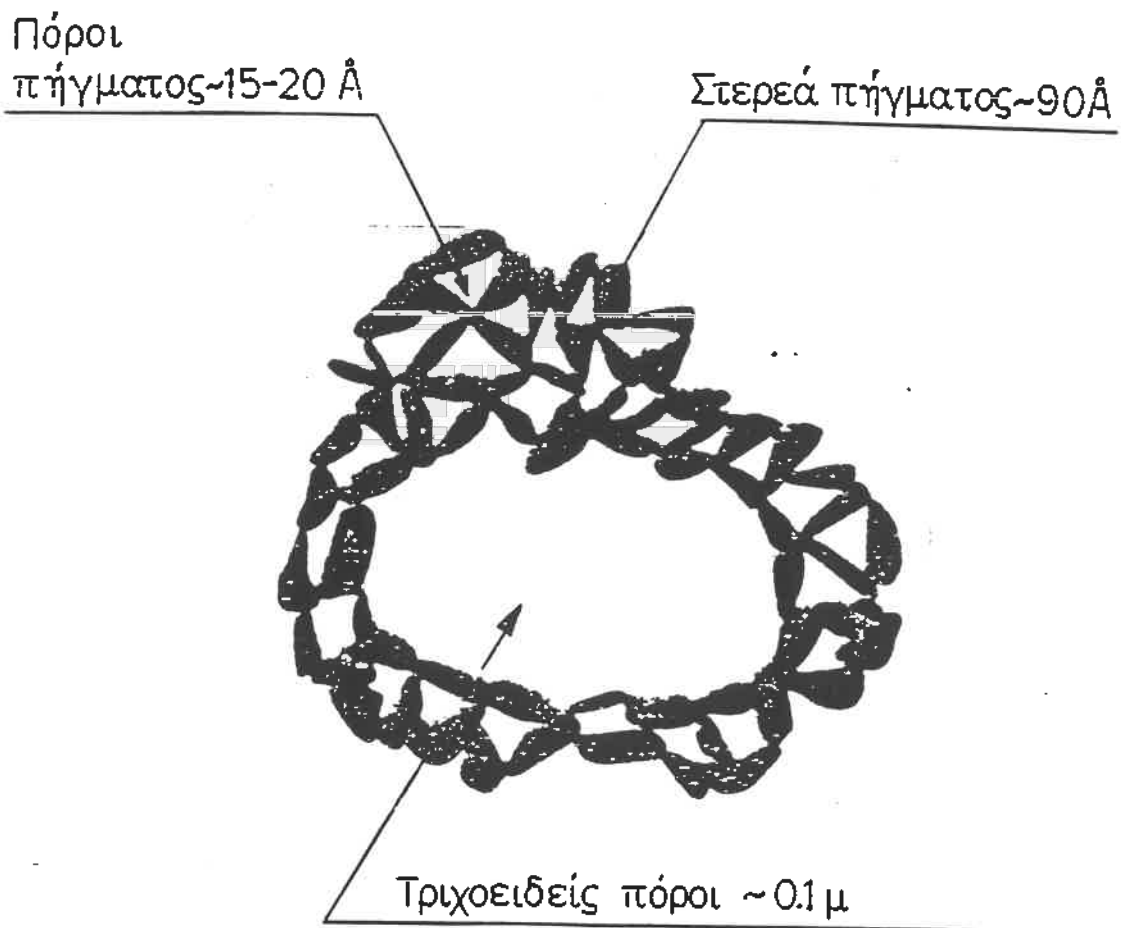
Κατά την ανάμιξη του νερού με το τσιμέντο, τα συστατικά του τσιμέντου ενώνονται με το νερό αρχίζοντας μια σειρά από περίπλοκες χημικές αντιδράσεις οι οποίες διαρκούν χρόνια. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται ενυδάτωση του τσιμέντου και έχει ως αποτέλεσμα την σταδιακή πήξη και σκλήρυνση του τσιμεντοπολτού. [1]

Η τσιμεντοκονία η οποία προκύπτει από την ανάμιξη του τσιμέντου με το νερό έχει γκριζοπράσινο χρώμα και η ρευστότητά της εξαρτάται από την αναλογία μίξης των δύο υλικών. Το μίγμα που προκύπτει πήζει προοδευτικά εωσότου στερεοποιηθεί πλήρως, και οι χαρακτηριστικές στιγμές αλλαγής της φυσικής κατάσταση του ονομάζονται αρχή και τέλος της πήξης [1]. Σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Τσιμέντων η αρχή και το τέλος της πήξης για τα κοινά τσιμέντα δεν πρέπει να αρχίζει νωρίτερα από 1 ώρα και να τελειώνει ενωρίτερα από 8 ώρες αντίστοιχα από την στιγμή της ανάμιξης των υλικών. [2]

Κατά την διάρκεια των χημικών αντιδράσεων τα 4 κύρια συστατικά του τσιμέντου ενώνονται με το νερό σχηματίζοντας ένυδρες ενώσεις. Η μορφή των αντιδράσεων αυτών δεν είναι πλήρως γνωστή ιδιαίτερα για το αργιλικό τριασβέστιο και το αργιλοσιδηρικό τετρασβέστιο. Η αρχική και η τελική μορφή των αντιδράσεων αυτών είναι η εξής :



Το πήγμα που σχηματίζεται αποτελείται από σωματίδια κολλοειδών διαστάσεων πλακοειδούς ή βελονοειδούς μορφής και κρυστάλλους $\text{Ca}(\text{OH})_2$ που σχηματίζουν ένα πυκνό πλέγμα με πολύ μικρά κενά της τάξης των $15 - 20 \text{ \AA}$. Το πλέγμα των σωματιδίων δεν είναι συνεχές. Υπάρχουν μεγάλα κενά μέσα σ' αυτό οι λεγόμενοι τριχοειδείς πόροι διαστάσεων $10000 - 15000 \text{ \AA}$. Τα στερεά του πήγματος έχουν μέγεθος περίπου $90 \text{ \AA}$ (Σχήμα 1.1)



ΣΧΗΜΑ 1.1 Σχηματική παράσταση πήγματος

Κατά την διάρκεια της ενυδάτωσης τα στερεά του πήγματος δεν μεγαλώνουν, απλά σχηματίζουν νέα από άνυδρους κόκκους. Στην αρχή της ενυδάτωσης οι πόροι του πήγματος και οι τριχοειδείς

πόροι είναι γεμάτοι νερό. Το νερό των πόρων του πήγματος δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόοδο της ενυδάτωσης γιατί μέσα σ' αυτούς χωρούν μόνο 4 μόρια νερού, τα οποία λόγω των μεγάλων μοριακών δυνάμεων που αναπτύσσονται σ' αυτά δεν μπορούν να κινηθούν προς τους τριχοειδείς πόρους. Έτσι μόνο το νερό των τριχοειδών πόρων μπορεί να χρησιμοποιηθεί και μάλιστα όχι όλο, λόγω της ασυνέχειάς τους. Προκύπτει λοιπόν η ανάγκη επιπλέον εξωτερικής τροφοδοσίας με νερό για να μην σταματήσει η ενυδάτωση (ανεξάρτητα του αρχικού λόγου N/T). [3]

Κατά την διάρκεια των χημικών αντιδράσεων παρατηρείται έκλυση θερμότητας και συστολή του αρχικού όγκου των προϊόντων ίση με το 25 % του αρχικού όγκου του νερού, η οποία οφείλεται αποκλειστικά στις χημικές μεταβολές μεταξύ νερού και τσιμέντου.

Έχει διαπιστωθεί επίσης ότι ποσότητα νερού ίση με το 25 % του βάρους του τσιμέντου ενώνεται χημικά μ' αυτό ενώ μια άλλη ποσότητα νερού ίση με το 15 % του βάρους του τσιμέντου είναι επιφανειακά δεσμευμένη μαζί του. Η ελάχιστη λοιπόν ποσότητα νερού που απαιτείται φτάνει το 40 % περίπου κατά βάρους του τσιμέντου. Πέρα απ' αυτό βέβαια μπορεί να υπάρχουν ποσότητες νερού οι οποίες μένουν ελεύθερες μέσα στους πόρους του πήγματος ή ποσότητες που χάνονται ή εξατμίζονται. [1]

Ο λόγος N/T παίζει σπουδαίο ρόλο στην διαδικασία της ενυδάτωσης, γιατί καθορίζει το ποσοστό των τριχοειδών πόρων, και άρα την τελική αντοχή του τσιμέντου. Πιο συγκεκριμένα για συνθήκες ανταλλαγής υγρασίας με το περιβάλλον έχουμε : [3]

α) Για λόγο $N/T = 0,38$ ο πολτός αποτελείται μόνο από πήγμα (πλήρης ενυδάτωση)

β) Για λόγο $N/T > 0,38$ πλήρης ενυδάτωση του τσιμέντου με ύπαρξη όμως τριχοειδών πόρων γεμάτων με νερό.

γ) Για λόγο $N/T < 0,38$ μερική ενυδάτωση του τσιμέντου χωρίς την ύπαρξη τριχοειδών πόρων. Η ύπαρξη ανυδάτωτου τσιμέντου δεν είναι επιζήμια για την αντοχή του.

Η αντοχή του πήγματος είναι αποτέλεσμα κυρίως της ανάπτυξης 2 ειδών δυνάμεων, οι οποίες είναι οι εξής

α) Ελκτικές δυνάμεις Van der Waals μεταξύ των επιφανειών επαφής.

β) Χημικοί δεσμοί μεταξύ ιόντων και ατόμων οι οποίοι είναι πιο ισχυροί των δυνάμεων Van der Waals .

1.1.1.5 ΠΡΟΣΜΙΚΤΑ ΥΛΙΚΑ ΤΟΥ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Σαν πρόσμικτα υλικά χαρακτηρίζονται συστατικά ή ενώσεις που η παρουσία τους μέσα στο τσιμέντο περιορίζεται από ειδικούς κανονισμούς ή από την πείρα της παραγωγικής διαδικασίας. Τέτοια υλικά είναι οι ποζολάνες, η ιπτάμενη τέφρα και το φίλλερ.[8]

Ποζολάνες

Οι ποζολάνες είναι πυριτικά ή αργιλοπυριτικά υλικά τα οποία έχουν την ιδιότητα να ενώνονται με την υδράσβεστο και να σχηματίζουν ένυδρες ασβεστοπυριτικές ενώσεις που με το χρόνο σκληρύνονται και αποκτούν μικρές ή μεγάλες αντοχές. Είναι κυρίως υλικά ηφαιστειακής προέλευσης και η παρουσία τους στο τσιμέντο βελτιώνει ορισμένες ιδιότητες του σκυροδέματος όπως είναι η υδατοστεγανότητα και η ανθεκτικότητα σε χημικές επιδράσεις. Η συμμετοχή των ποζολανών στη αντοχή είναι πιο αργή απ' αυτή του τσιμέντου, και έτσι ενώ η αντοχή σε μικρές ηλικίες εμφανίζεται μειωμένη επειδή αυξάνεται με το χρόνο, στο τέλος εμφανίζει συνήθως υψηλότερες τιμές. Στην Ελλάδα ποζολάνες βρίσκουμε στη Θήρα στη Μήλο στην Νίσυρο στον νομό Πέλλης και αλλού.[1]

Ιπτάμενη τέφρα

Η ιπτάμενη τέφρα είναι το κατάλοιπο της καύσης γαιανθράκων ή

λιγνιτών που συλλέγεται στην έξοδο των αερίων καύσης των θερμοηλεκτρικών σταθμών και βρίσκεται σε λεπτότατο κατακερματισμό.

Η δραστηριότητά της οφείλεται στην μεγάλη της περιεκτικότητα σε SiO_2 , Al_2O_3 και CaO . Οι δύο πρώτες ενώσεις προσδίδουν στην τέφρα ποζολανικές ιδιότητες ενώ η τρίτη υδραυλικές ιδιότητες. [1]

Φίλλερ

Τα φίλλερ είναι υλικά σε λεπτότατο κατακερματισμό. Η δράση τους είναι μηχανική, δρουν δηλαδή σαν λιπαντικό για το εργάσιμο ενώ αυξάνουν την υδατοστεγανότητα. Χρησιμοποιούνται σε μικρές ποσότητες και μπορεί να παρουσιάσουν ποζολανικές ή υδραυλικές ιδιότητες. [1]

1.1.2 ΑΔΡΑΝΗ ΥΛΙΚΑ

1.1.2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα αδρανή υλικά οφείλουν την ονομασία τους στο γεγονός ότι παραμένουν χημικώς αδρανή κατά την παρασκευή του σκυροδέματος, σε αντίθεση με το νερό και το τσιμέντο. Συνδέονται μεταξύ τους μέσω της τσιμεντοκονίας και συμβάλλουν μόνο μηχανικά στην αντοχή του τελικού προϊόντος. Αποτελούν το 60 — 75 % του όγκου του σκυροδέματος και κατά συνέπεια οι ιδιότητες τους επηρεάζουν τις ιδιότητες του σκυροδέματος. [1]

Κατά κανόνα τα αδρανή είναι συντρίμματα διαφόρων πετρωμάτων (κυρίως ασβεστολιθικών και πυριτικών), μιας και τα πετρώματα είναι το συγγενέστερο υλικό προς την τσιμεντοκονία. Ανάλογα με την προέλευση τους χωρίζονται σε συλλεκτά (συλλέγονται από ποτάμια και ορυχεία), και θραυστά (δημιουργούνται σε λατομεία από την θραύση των πετρωμάτων).

Η μορφή των κόκκων των αδρανών δεν είναι κανονική γεωμετρική μορφή αλλά τυχαία. Το σχήμα ή η μορφή των κόκκων επηρεάζει κατά

ποικίλους τρόπους τις ιδιότητες του σκυροδέματος. Χοντρικά μπορούμε να κατατάξουμε τους κόκκους στις ακόλουθες γενικές κατηγορίες: στρογγυλούς, κυβοειδείς, γωνιώδεις, πλακοειδείς, επιμήκεις. Η αύξηση της πολυγωνιότητας και της τραχύτητας των κόκκων βελτιώνει την μεταξύ τους στήριξη καθώς και την πρόσφυση της τσιμεντοκονίας, αλλά δημιουργεί πρόβλημα στην εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος. Έτσι οι κυβοειδής και σφαιρικής μορφής κόκκοι με ανώμαλη επιφάνεια αποτελούν την καλύτερη περίπτωση κόκκων για την παρασκευή του σκυροδέματος. Το ποσοστό των ακατάλληλης μορφής κόκκων (σχέση μεγάλης προς τη μικρή διάσταση μεγαλύτερη από 3:1) σύμφωνα με τον Κανονισμό ΕΛΟΤ 408 δεν πρέπει να υπερβαίνει το 50 % του βάρους της συνολικής ποσότητας των αδρανών. [1]

Τα συνηθισμένα αδρανή έχουν ειδικό βάρος μεταξύ 2,55 — 2,80 tn/m³ και φαινόμενο βάρος μεταξύ 2 — 3 tn/m³. Εκτός αυτών υπάρχουν και αδρανή βαριά με ειδικό βάρος μεταξύ 3,5 — 4,5 tn/m³ και φαινόμενο βάρος πάνω από 3 tn/m³. Αυτά χρησιμοποιούνται για την παρασκευή σκυροδέματος (βαρύ σκυρόδεμα), που μπορεί να απορροφήσει ακτινοβολία γ και γι' αυτό χρησιμοποιείται σε σταθμούς ατομικής ενέργειας. Το σκυρόδεμα που παρασκευάζεται από αυτά τα αδρανή ονομάζεται βαρύ σκυρόδεμα. Επίσης υπάρχουν και ελαφρά αδρανή με φαινόμενο ειδικό βάρος πολύ κάτω των 2 tn/m³ τα οποία χρησιμοποιούνται για την παρασκευή ελαφροσκυροδεμάτων με καλές θερμομονωτικές ιδιότητες αλλά μειωμένες αντοχές.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά των αδρανών τα οποία επηρεάζουν και την ποιότητα του σκυροδέματος είναι τα εξής :

α) Η κοκκομετρική διαβάθμιση η οποία έχει άμεση επίδραση στην ποσότητα νερού που χρειάζεται το νωπό μίγμα και συνεπώς επηρεάζει όλες τις ιδιότητες του σκυροδέματος.

β) Η καθαρότητα των αδρανών. Πρέπει τα αδρανή να είναι απαλλαγμένα από επιβλαβείς προσμίξεις όπως άργιλοι < 0,25 %, οργανικές ενώσεις < 1 %, εύθρυπτοι κόκκοι < 3 %, θειούχες ενώσεις < 1 %, και τέλος το διερχόμενο υλικό από το κόσκινο Νο 200 (παϊπάλη) < 16 %

της άμμου , λόγω του ότι εμποδίζουν την πρόσφυση των κόκκων με την κονία ή δημιουργούν άλλα προβλήματα .

γ) Η καλή πρόσφυση με την κονία η οποία επιτυγχάνεται με αδρανή τα οποία έχουν τραχείες επιφάνειες .

δ) Η χημική συμπεριφορά τους με τα άλλα συστατικά του σκυροδέματος

ε) Ο μέγιστος κόκκος

στ) Το σχήμα και το μέγεθος των κόκκων (όχι πλακοειδείς ή επιμήκεις κόκκοι)

ζ) Η υδατοαπορροφητικότητα των αδρανών (πρέπει να είναι μικρή)

η) Το ειδικό βάρος , το φαινόμενο ειδικό βάρος, το μέτρο ελαστικότητας και η ειδική επιφάνεια των αδρανών .

θ) Η μηχανική αντοχή (του μητρικού πετρώματος) . Σύμφωνα με την προδιαγραφή ΕΛΟΤ 408 $> 650 \text{ kgf/m}^3$.

ι) Η κατάλληλη υγρασία (πρέπει να είναι ελεγχόμενη)

Οι ιδιότητες των αδρανών εξαρτώνται όπως είναι φυσικό από τα χαρακτηριστικά του μητρικού πετρώματος . Ένα πέτρωμα που θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή αδρανών θα πρέπει να είναι υγιές (απαλλαγμένο από κομμούς και να μην αποσθρώνεται υπό την επίδραση καιρικών συνθηκών) και να διαθέτει αρκετή αντοχή σε επιφανειακή φθορά (τριβή και κρούσεις) . Ο έλεγχος γίνεται με τη συσκευή Los Angeles και η φθορά θα πρέπει να είναι μικρότερη του 40 % σύμφωνα με την προδιαγραφή ASTM C535 και C 131 . Επίσης η αντοχή σε θλίψη του πετρώματος πρέπει να υπερβαίνει τα 650 kgf/cm^2 σύμφωνα με την προδιαγραφή ΕΛΟΤ 408 .

Στον Πίνακα 1.1 φαίνονται οι σημαντικότερες ιδιότητες ορισμένων πετρωμάτων .

Από τον πίνακα φαίνεται ότι η αντοχή των πετρωμάτων που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή του κοινού σκυροδέματος είναι $400 - 500 \text{ kgf/cm}^2$ μεγαλύτερη από την αντοχή της τσιμεντοκονίας, ενώ στα πετρώματα τα οποία χρησιμοποιούνται για την παραγωγή ελαφροσκυροδεμάτων η αντοχή είναι χαμηλότερη από αυτή της τσιμεντοκονίας .

Είδος Πετρώματος	Φαινόμενο εfd. δάρος (DIN 52102) t/m^3	Απορρόφηση νερού (DIN 52103)		Αντοχή σέ θλίψη στεγανού πετρώματος (DIN 52105) Kg/cm^2	Αντοχή σέ εφελκυσμό κήμψως (DIN 52112) Kg/cm^2	Αντοχή σέ κρούση (DIN 52107) Αριθμός κρούσεων έως τη θραύση	Φθορά σέ τριβή (DIN 51108) Απώλεια (cm ³) σέ 50 cm ³
		κατά δάρος	κατά όγκο (φανόμενο πορώδες)				
1. Γρανίτης, Σηνήτης	2,60 - 2,80	0,2 - 0,5	0,4 - 1,4	1600 - 2400	100 - 200	10 - 12	5 - 8
2. Διοσίτης, Γάρος	2,80 - 3,00	0,2 - 0,4	0,5 - 1,2	1700 - 3000	100 - 220	10 - 15	
3. Χαλαζιακός ποφύρης, κεραιοφύρης, ποφρυίτης, Α. Άνδραίτης	2,55 - 2,80	0,2 - 0,7	0,4 - 1,8	1800 - 3000	150 - 200	11 - 13	5 - 8,5 12 - 15 5 - 8
4. Βασάλτης, Μελαφύρης	2,95 - 3,00	0,1 - 0,3	0,2 - 0,8	2500 - 4000	150 - 250	12 - 17	
5. Βασαλτική λάδα	2,20 - 2,35	4 - 10	9 - 24	800 - 1500	80 - 120	4 - 7	
6. Διαβάσης	2,80 - 2,90	0,1 - 0,4	0,3 - 0,1	1800 - 2500	150 - 250	11 - 16	5 - 8
7. Στρωμαγενή πετρώματα							
8. Πυριτιακά πετρώματα: Χαλαζίτης	2,60 - 2,65	0,2 - 0,5	0,4 - 1,3	1500 - 3000	130 - 250	10 - 15	7 - 8
9. Χαλαζιακός ψαμμίτης				1200 - 2000	120 - 200	8 - 10	
10. Άλλα είδη χαλαζιακού ψαμμίτη	2,00 - 2,65	0,2 - 9	0,5 - 24	300 - 1800	30 - 150	5 - 10	10 - 14
11. Αοδευόλιθος							
12. Συμπαγείς αοδευόλιθοι & δολομίτες (περιλ. μαρμάρων)	2,65 - 2,85	0,2 - 0,6	0,4 - 1,8	800 - 1800	60 - 150	8 - 10	15 - 40
13. Άλλοι αοδευόλιθοι & Αοδευόλιθικά συμφύσματα	1,70 - 2,60	0,2 - 10	0,5 - 25	200 - 900	50 - 80	—	
14. Τραβερίτης	2,40 - 2,50	2 - 5	4 - 10	200 - 600	40 - 100	—	—
15. Ήγαιστειακοί τόφοι	1,80 - 2,00	6 - 15	12 - 30	200 - 300	20 - 60	—	
16. Γ. Γνήσιος, Γρανούτης	2,65 - 3,00	0,1 - 0,6	0,3 - 1,8	1600 - 2800	—	6 - 12	4 - 10 6 - 12 8 - 18
17. Αμφίβολοι	2,70 - 3,10	0,1 - 0,4	0,3 - 1,2	1700 - 2800	—	10 - 16	
18. Σερπεντίνης	2,60 - 2,75	0,1 - 0,7	0,3 - 1,8	1400 - 2600	—	6 - 15	
19. Σχιστόλιθος	2,70 - 2,80	0,5 - 0,6	1,4 - 1,8	—	500 - 800	—	—

Πίνακας 1.1.1 Συνοπτικός πίνακας ιδιοτήτων διαφόρων πετρωμάτων

Στην πρώτη περίπτωση για την αντοχή του σκυροδέματος κρίσιμη είναι η αντοχή της τσιμεντοκονίας, ενώ στην δεύτερη περίπτωση το θέμα της αντοχής είναι συνθετότερο.

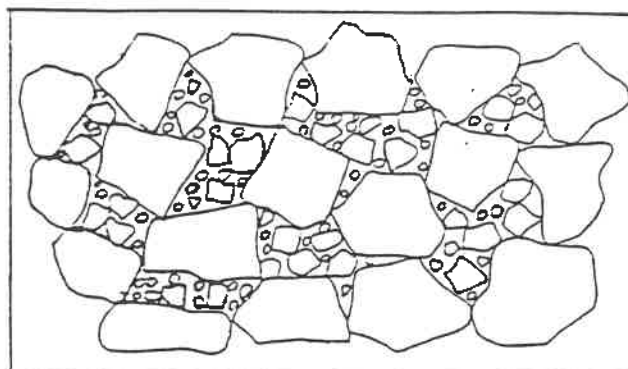
1.1.2.2 ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗ ΔΙΑΒΑΘΜΙΣΗ ΤΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ

Τα αδρανή στα εργοτάξια εμφανίζονται σε 3 κλάσματα συνήθως.

- Άμμος με διάμετρο 0,5 — 7 (mm)
- Γαρμπίλι με διάμετρο 5 ή 7 — 10 ή 15 (mm)
- Σκύρα με διάμετρο > 10 ή 15 (mm)

Πολλές φορές ωστόσο χρησιμοποιούνται περισσότερα κλάσματα για σκυροδέματα ειδικών απαιτήσεων.

Η κοκκομετρική σύνθεση ή διαβάθμιση των αδρανών δηλαδή ο διαχωρισμός τους, και η κατάταξη των κόκκων του αδρανούς ανάλογα με το μέγεθός τους, μας δίνει μια ακριβή εικόνα των αδρανών από την άποψη της γεωμετρικής ποιότητάς τους. Το μέγεθος των κόκκων προσδιορίζεται με πρότυπα κόσκινα τα οποία έχουν καθορισμένες διαμέτρους οπών. Τα ποσοστά κατ' όγκο τα οποία συγκρατούνται σε κάθε κόσκινο ή που διέρχονται από κάθε κόσκινο εκφράζουν την κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού. Θεωρούμε ότι το ποσοστό για κάθε ομάδα κόκκων εκφράζεται με την κατ' όγκο αναλογία γιατί στην μεταξύ των κόκκων διάταξη σημασία έχει ο όγκος τους και κατ' αναλογία τα κενά τα οποία αφήνουν μεταξύ τους. Σκοπός μας είναι οι κόκκοι να διατάσσονται κατά τέτοιο τρόπο έτσι ώστε κάθε ομάδα, από άποψη διαμέτρου, να εισχωρεί στην θέση των κενών τα οποία σχηματίζουν οι κόκκοι της αμέσως μεγαλύτερης ομάδας. Αποτέλεσμα της παραπάνω διάταξης είναι το τελικό μίγμα να έχει τα λιγότερα κενά και τη μεγαλύτερη δυνατή πυκνότητα (Σχήμα 1.2). Είναι προφανές ότι στην περίπτωση που οι κόκκοι έχουν το ίδιο ειδικό βάρος, τότε η αναλογία κατ' όγκο συμπίπτει με την κατά βάρος αναλογία. [1]



ΣΧΗΜΑ 1.2 Δομή του θεωρητικώς πυκνού σκυροδέματος

Όταν σ' ένα διάγραμμα αξόνων θεωρήσουμε ως τετμημένη το άνοιγμα της βροχίδας του κόσκινου (σε απλή ή λογαριθμική κλίμακα) και ως τεταγμένη το ποσοστό του υλικού το οποίο διέρχεται από κάθε κόσκινο, σχηματίζεται μια τεθλασμένη γραμμή η οποία ονομάζεται κοκκομετρική καμπύλη του υλικού.

Στην Ελλάδα τα κόσκινα τα οποία χρησιμοποιούνται σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ 408 είναι οι σειρές Ελληνικών, Γερμανικών (DIN 4187 και DIN 4188), και Αμερικανικών (ASTM. E11) κόσκινων. Τα κόσκινα αποτελούνται από συρμάτινα πλέγματα με τετραγωνικές οπές διαστάσεων 2 — 0,0059 ίντσες ή από λαμαρίνα με κυκλικές οπές διαστάσεων 70 — 1 mm. [2]

Για τον έλεγχο του ποσοστού της παϊπάλης έτσι ώστε η παρουσία της να μην είναι επιβλαβής για το σκυρόδεμα χρησιμοποιείται το πρότυπο κόσκινο Νο 200 από πλέγμα με διάσταση βροχίδας 0,0074 mm.

Ο προσδιορισμός της κοκκομετρικής καμπύλης του υλικού είναι σχετικά εύκολος, ενώ αντίθετα η αξιολόγηση της καμπύλης αυτής καθώς και η εκλογή της καταλληλότερης για κάθε περίπτωση, ανάλογα με τις ιδιότητες του σκυροδέματος, είναι δύσκολη υπόθεση. [1]

Όπως προαναφέρθηκε η θεμελιώδης άποψη είναι ότι οι κόκκοι πρέπει να διατάσσονται κατά τέτοιο τρόπο έτσι ώστε κάθε ομάδα

κόκκων από άποψη διαμέτρου να εισχωρεί στη θέση των κενών που σχηματίζουν οι κόκκοι της αμέσως μεγαλύτερης ομάδας. Από την άποψη αυτή ο Fuller έδωσε ως ιδεατή καμπύλη την παραβολή της μορφής : [5]

$$A = 100 * \left(\frac{d}{D} \right)^a$$

Όπου :

A = Το διερχόμενο ποσοστό των αδρανών.

d = Η διάμετρος των σπών του κόσκινου.

D = Η μέγιστη διάμετρος των κόκκων.

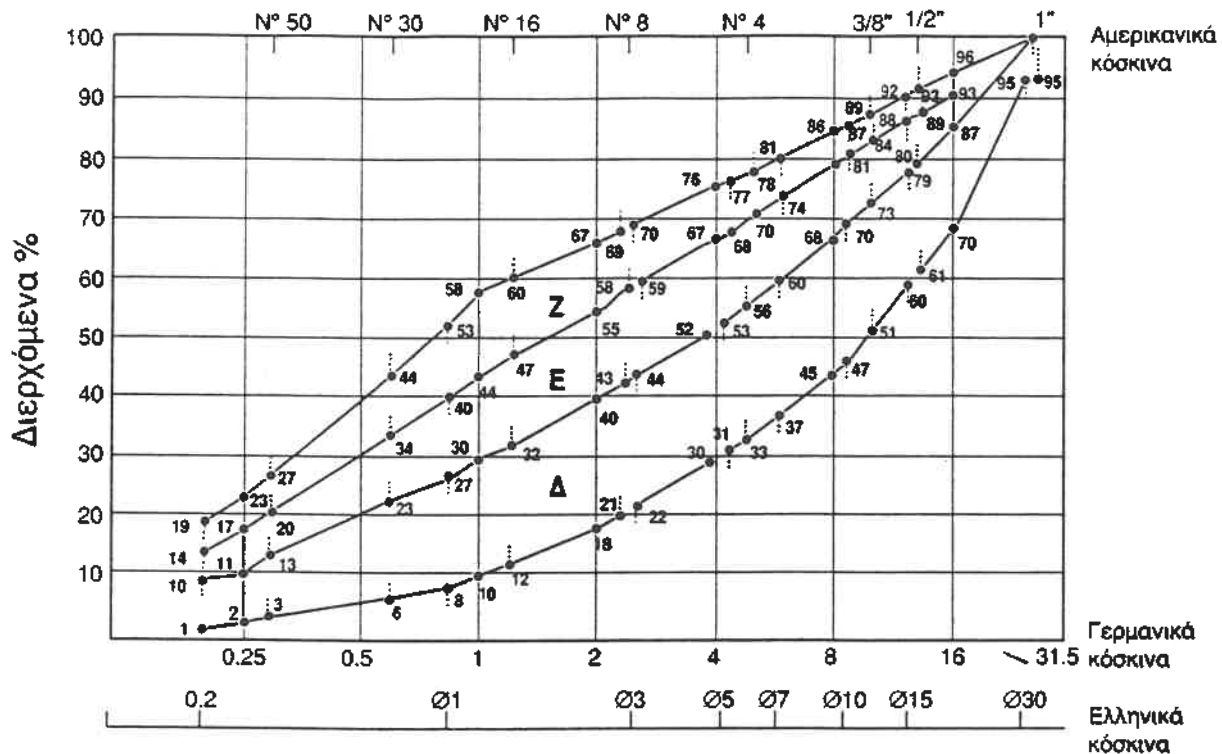
$\alpha = 0,1 - 0,8$, συνήθως 0,5 και εξαρτάται από της μορφή των κόκκων.

Από την κοκκομετρική καμπύλη των αδρανών του σκυροδέματος εξαρτάται η οικονομικότητά του, η εργασιμότητά του, οι μεταβολές όγκου (θερμική διαστολή, συστολή ξήρανσης, πλαστική συστολή) και εν μέρει το μέτρο ελαστικότητας. Από τα πειραματικά δεδομένα, την εμπειρία και τα υλικά που υπάρχουν σε κάθε χώρα οι Κανονισμοί καθορίζουν τις περιοχές μέσα στις οποίες πρέπει να βρίσκονται οι κοκκομετρικές καμπύλες ανάλογα με τις επιθυμητές ιδιότητες του σκυροδέματος.

Για την περίπτωση που ο μέγιστος κόκκος των αδρανών είναι $\Phi 30$ (Ελληνικά κόσκινα) ή $\square 31,5$ (Γερμανικά κόσκινα) το σχετικό διάγραμμα το οποίο καθορίζει τις περιοχές που πρέπει να βρίσκονται οι κοκκομετρικές καμπύλες ανάλογα με τον τύπο του σκυροδέματος είναι το παρακάτω (Σχήμα 1.3). [2]

Για τα οπλισμένα σκυροδέματα γενικά κατάλληλη ζώνη θεωρείται η υποζώνη Δ του διαγράμματος. Για τα σκυροδέματα κατώτερης κατηγορίας της C 40 μπορεί να χρησιμοποιηθεί και η υποζώνη Ε ενώ για το αντλήσιμο σκυρόδεμα μπορεί η κοκκομετρική καμπύλη να βρίσκεται ολόκληρη ή κατά ένα τμήμα στην υποζώνη Ε.

Στην περίπτωση που ο μέγιστος κόκκος αδρανών είναι διαφορετικός το άνω διάγραμμα τροποποιείται. Η εκλογή του μέγιστου κόκκου κάθε φορά καθορίζεται από το μέγεθος της διατομής και τις αποστάσεις των οπλισμών.



ΣΧΗΜΑ 1.3 Ορια κοκκομετρικής διαβάθμισης μίγματος αδρανών μεγίστου κόκκου Φ30 ή 31.5 ή 1

1.1.2.3 ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΜΕΓΕΘΗ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΓΡΑΜΜΗΣ

Πάνω στις κοκκομετρικές καμπύλες έγιναν ορισμένες χρήσιμες παρατηρήσεις τόσο γι' αυτές καθ' αυτές, όσο και για τα μίγματα των αδρανών. Η κλίση της καμπύλης σε κάθε περιοχή παριστάνει το κατ' όγκο ποσοστό του υλικού της περιοχής αυτής, ενώ σύμφωνα με τον Abrams κοκκομετρικές καμπύλες οι οποίες έχουν το ίδιο εμβαδό

προσδίδουν στο σκυρόδεμα την ίδια δυνατότητα αντοχής. Αυτό ισχύει για την σχεδίαση των διαμέτρων σε λογαριθμική κλίμακα και για σκυροδέματα τα οποία έχουν το ίδιο εργάσιμο. Στην χαρακτηριστική αυτή ιδιότητα στηρίζονται κάποιοι δείκτες, οι οποίοι εξαρτώνται από το εμβαδό της καμπύλης, και έχουν σαν σκοπό να την υποκαταστήσουν ενμέρη στην εκτίμηση των ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Ο πρώτος απ' αυτούς ονομάστηκε μέτρο λεπτότητας F_m από τον Abrams, ο δείκτης K από τον Dahl, ο αριθμός m από τον O.Stern, ο δείκτης F από τον Hummel. [1]

Άλλο χαρακτηριστικό μέγεθος του των αδρανών είναι η ειδική επιφάνεια δηλαδή ο λόγος της συνολικής εξωτερικής επιφάνειας των κόκκων προς το συνολικό βάρος αυτών (cm^2/gr) ή προς τον συνολικό όγκο αυτών (cm^2/cm^3). Η ειδική επιφάνεια ορίζει και την συνολική ποσότητα νερού που συγκρατούν τα αδρανή, και άρα την ολική ποσότητα νερού που απαιτείται. Αυτό συμβαίνει γιατί εφόσον τα αδρανή δεν είναι κορεσμένα κατά την ανάμιξη του σκυροδέματος ποσότητα νερού θα απορροφηθεί από τους κόκκους, και η ποσότητα αυτή εξαρτάται από την φύση του πετρώματος, από την υγρασία των κόκκων και φυσικά από την ολική επιφάνεια διαβροχής των κόκκων. Πορώδη αδρανή στεγνωμένα πριν από την χρήση δίνουν πολύ καλές αντοχές συνάφειας, μιας και η απορρόφηση νερού βελτιώνει την πρόσφυση μεταξύ τσιμεντοπολτού και αδρανών. [1]

1.1.3 NEPO

Το νερό μαζί με το τσιμέντο αποτελούν τα ενεργά συστατικά του σκυροδέματος. Κατά την ανάμιξη τους αρχίζει μια μεγάλη σειρά χημικών αντιδράσεων οι οποίες διαρκούν χρόνια. Αποτέλεσμα αυτών είναι η δημιουργία ένυδρων πυριτικών και αργιλικών ενώσεων που οδηγούν στην πήξη και την σκλήρυνση του σκυροδέματος.

Κατά την διάρκεια αυτών των αντιδράσεων μεταξύ του νερού και των 4 βασικών συστατικών του τσιμέντου παρατηρείται έκλυση θερ-

μότητας, και συστολή του όγκου των αρχικών προϊόντων ίση με το $1/4$ περίπου του αρχικού όγκου του νερού.

Η απαιτούμενη ποσότητα νερού εξαρτάται από την ποσότητα του τσιμέντου που θα χρησιμοποιηθεί καθώς και από την υδατοαπορροφητικότητα των αδρανών. Η βασική απαίτηση που θέτουμε για το νερό όπως και για τα αδρανή είναι να μην περιέχουν ουσίες οι οποίες παρεμποδίζουν τις αντιδράσεις της ενυδάτωσης. Τέτοιες ουσίες είναι η ζάχαρη, τα οξέα, τα λάδια, τα λίπη και οι οργανικές ουσίες τα όρια των οποίων στο νερό καθορίζονται από την προδιαγραφή ΕΛΟΤ 345.

Χαρακτηριστικό είναι ωστόσο ότι οι Κανονισμοί διαφέρουν πολύ μεταξύ τους στις απαιτήσεις που θέτουν και στην αξιολόγηση του νερού. Αυτό γίνεται διότι η δράση των διάφορων ουσιών μεταβάλλεται ανάλογα με την ποσότητα του τσιμέντου, την σύγχρονη παρουσία άλλων στοιχείων καθώς και ανάλογα με την μορφή, δηλαδή την χημική σύνθεση αυτών μέσα στο νερό. Η παρουσία π.χ οργανικών ουσιών δεσμεύει μέρος του ασβεστίου του τσιμέντου. Ωστόσο το μέγεθος της βλαπτικότητας εξαρτάται από την περιεκτικότητα του τσιμέντου σε ασβέστιο. [1]

Για το νερό αναμείξεως που χρησιμοποιείται στην παρασκευή του σκυροδέματος μπορούμε να είμαστε πιο ανεκτικοί απ' ότι τα νερά που δρουν μόνιμα και εξωτερικά. Αυτό γιατί η ποσότητα των επιβλαβών ουσιών στο νερό αναμείξεως είναι μικρή και η δράση τους τελειώνει κάποια στιγμή. Αντίθετα στα μόνιμα και εξωτερικά νερά η δράση των επιβλαβών ουσιών είναι μόνιμη όπως επίσης και η ποσότητα τους λόγω της συνεχούς ανανέωσης τους. [4]

Γενικά τώρα τα πόσιμα νερά θεωρούνται κατάλληλα για νερά αναμείξεως. Ωστόσο σε περίπτωση αμφιβολιών, το κριτήριο για την καταλληλότητα του νερού είναι η παρασκευή και ο έλεγχος δοκιμίων.

Η βλαπτικότητα τέλος των χημικών ουσιών που αναφέρθηκαν στο νερό συνίσταται στην δυσμενή επίδραση τους στην εξέλιξη της ενυδάτωσης που έχει ως αποτέλεσμα την καθυστέρηση της πήξης ή την μείωση της τελικής αντοχής του σκυροδέματος.

1.2 ΣΥΝΘΕΣΗ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

1.2.1 ΑΝΑΛΟΓΙΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΣΥΝΘΕΣΗΣ

Η ποσότητα του καθενός από τα συστατικά σκυροδέματος καθορίζεται από το ρόλο του στο τελικό προϊόν. Τα σκύρα (χονδρόκοκκα αδρανή) συνδέονται μεταξύ τους με το τσιμεντοκονίαμα (τσιμέντο + άμμος + νερό) που αποτελεί την συνδετική τους ύλη. Η ίδια εικόνα αλλά σε μικρότερη κλίμακα επαναλαμβάνεται και με τους κόκκους της άμμου (λεπτόκοκκο υλικό) και της τσιμεντοκονίας (τσιμέντο + νερό). Η ποσότητα λοιπόν για καθένα από τα παραπάνω τρία υλικά είναι τουλάχιστον ίση με τα κενά που σχηματίζουν οι κόκκοι του αμέσως μεγαλύτερου υλικού. [1]

Η ποσότητα του νερού όπως έχει προαναφερθεί εξαρτάται από την ποσότητα του τσιμέντου και από την υδατοαπορροφητικότητα των αδρανών. Πιο αναλυτικά οι απαιτούμενες ποσότητες νερού που απαιτούνται για την παρασκευή του σκυροδέματος είναι οι εξής :

N_{χ} = Ποσότητα νερού που ενώνεται χημικά με το τσιμέντο κατά την ενυδάτωση.

N_{κ} = Ποσότητα νερού που ενώνεται κρυσταλλικά με το νερό.

$N_{\alpha\delta.}$ = Ποσότητα νερού που απορροφούν οι κόκκοι του αδρανούς υλικού.

$N_{\alpha\pi.}$ = Ποσότητα νερού που εξατμίζεται ή γενικώς χάνεται (απώλειες).

$N_{\epsilon.}$ = Περίσσεια νερού που μένει ελεύθερο στους πόρους του σκυροδέματος.

Συνολικά λοιπόν η ποσότητα νερού είναι :

$$N = N_{\chi} + N_{\kappa} + N_{\alpha\delta.} + N_{\alpha\pi.} + N_{\epsilon.}$$

Όπως έχει αναφερθεί και στην παράγραφο 1.2.4 (ενυδάτωση τσιμέντου) η ποσότητα του χημικά ενωμένου νερού με το τσιμέντο είναι περίπου ίση με το 25% του τσιμέντου, ενώ το κρυσταλλικά ενωμέ-

νο νερό με το τσιμέντο είναι περίπου ίσο με το 15 % του βάρους του τσιμέντου. Συνολικά λοιπόν το με οποιοδήποτε τρόπο δεσμευμένο νερό φτάνει το 40 % κατά βάρος του τσιμέντου. [1]

Πέρα απ' αυτό εφόσον οι κόκκοι του αδρανούς δεν είναι κορεσμένοι, ποσότητα νερού θα απορροφηθεί απ' αυτούς, ανάλογα με την φύση του πετρώματος, την ολική επιφάνεια των κόκκων, και την αρχική υγρασία των αδρανών. Η ποσότητα αυτή αυξάνει, όσο περισσότερο λεπτόκοκκο είναι το υλικό. Στις παραπάνω ποσότητες πρέπει να προστεθούν και οι αναπόφευκτες απώλειες νερού. Οι βασικές αιτίες απωλειών είναι οι εξής:

α) Η εξάτμιση κατά την διάρκεια της παρασκευής, μεταφοράς, και διάστρωσης ιδιαίτερα την καλοκαιρινή περίοδο για το έτοιμο σκυρόδεμα.

β) Η απορρόφηση νερού από τους ξυλοτύπους η οποία μπορεί να περιοριστεί με προηγούμενη διαβροχή των ξυλοτύπων.

Τέλος απαιτούμενη είναι η ύπαρξη ελεύθερης ποσότητας νερού μέσα στο σκυρόδεμα παρ' όλο που έχει αρνητικές επιπτώσεις στην αντοχή του σκυροδέματος. Αυτό συμβαίνει γιατί κατά την διάρκεια της ανάμιξης των υλικών δεν είναι δυνατή η ομοιόμορφη κατανομή του νερού μέσα στο μίγμα, καθώς επίσης και γιατί λόγοι μεταφοράς και διάστρωσης μας επιβάλλουν μια ορισμένη ρευστότητα του σκυροδέματος.

Για την ποσότητα και την σύνθεση των αδρανών πρέπει να επιλεγεί η κατάλληλη κοκκομετρική καμπύλη ανάλογα με τις απαιτήσεις του σκυροδέματος που θα παρασκευάσουμε, και να γίνει έλεγχος ως προς την μορφή των κόκκων του αδρανούς. (βλέπε παράγραφο 1.3.2 και 1.3.3)

Ο βαθμός πυκνότητας των αδρανών δίνεται από την σχέση :

$$\alpha = \frac{\rho_{\phi}}{\rho_{\pi}}$$

όπου : ρ_{ϕ} = Το φαινόμενο ειδικό βάρος του σωρού των αδρανών

$\rho_p = \text{Το φαινόμενο ειδικό βάρος του πετρώματος.}$

Το ποσοστό των κενών μεταξύ των κόκκων είναι $1 - \alpha$ το οποίο θα γεμίσει με κονίαμα. [1]

1.2.2 ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η εργασία μιας μελέτης σύνθεσης έχει ως σκοπό τον καθορισμό των ποσοτήτων των υλικών που απαιτούνται για την παρασκευή ενός κυβικού μέτρου σκυροδέματος. Στην πράξη οι αναλογίες σύνθεσης εξαρτώνται από τις απαιτήσεις της κατασκευής, τα διαθέσιμα υλικά, τα εργοταξιακά μέσα καθώς επίσης από τις καιρικές συνθήκες. Το τελικό προϊόν απέχει αρκετά από αυτό που θεωρητικά υποθέτουμε κυρίως γιατί είναι αδύνατη η τακτοποίηση των μικρότερων κόκκων στα κενά των αμέσως μεγαλύτερων κόκκων και η εισροή ανάμεσα σ' αυτά του πολτού της τσιμεντοκονίας. Έτσι λοιπόν παρεκκλίνουμε από τις θεωρητικές αναλογίες, με σκοπό να πετύχουμε ένα σκυρόδεμα, που να ικανοποιεί σε όλη του τη μάζα τις βασικές μας απαιτήσεις όπως αυτές προκύπτουν από τα εξής στάδια ανάλυσης: [1]

α) Η στατική λειτουργία, οι ελάχιστες διαστάσεις και οι λειτουργικές ανάγκες του έργου καθορίζουν αντίστοιχα την απαιτούμενη ποσότητα του σκυροδέματος, τον μέγιστο κόκκο του αδρανούς και τις πρόσθετες τυχόν απαιτήσεις.

β) Ο εργοταξιακός εξοπλισμός, δηλαδή τα διαθέσιμα μέσα μεταφοράς, διάστρωσης και συμπύκνωσης του σκυροδέματος καθορίζουν τα όρια της επιτρεπτής εργασιμότητας.

γ) Τα διαθέσιμα αδρανή, που παρέχονται σε ξεχωριστές ομάδες, καθορίζουν τις αναλογίες ανάμιξής τους, ώστε το τελικό προϊόν να βρίσκεται μέσα στην επιθυμητή περιοχή η οποία καθορίζεται και από την απαιτούμενη αντοχή και από την επιθυμητή εργασιμότητα.

δ) Η εκλογή της ποσότητας του τσιμέντου γίνεται ανάλογα με την απαιτούμενη αντοχή τη συνεκτικότητα και την ανθεκτικότητα.

Για την τελευταία απαίτηση οι Κανονισμοί περιέχουν ελάχιστες τιμές ανάλογα με το είδος του διαβρωτικού περιβάλλοντος.

ε) Η αναγκαία ποσότητα νερού ανάμιξης προσδιορίζεται με βάση το μέγιστο κόκκο του αδρανούς, την κοκκομετρική διαβάθμιση και την ποσότητα του τσιμέντου.

στ) παρασκευάζουμε τρεις τουλάχιστον ομάδες δοκιμίων, κυβικών ή κυλινδρικών, για δύο τουλάχιστον ή περισσότερες παραλλαγές της σύνθεσης που προκύπτει από τα προηγούμενα και που ικανοποιούν τις απαιτήσεις του έργου. Από την θραύση των δοκιμίων μετά από 7 ημέρες προσδιορίζεται η αντοχή f_7 και μέσω αυτής η αντοχή f_{27} ανάλογα με την ποσότητα του τσιμέντου. Ο συντελεστής για τα Ελληνικά τσιμέντα είναι συνήθως 1,40. Αν η αντοχή δεν είναι η αναμενόμενη επαναλαμβάνεται η παρασκευή με άλλη σύνθεση.

ζ) Αφού επιλεγεί η τελική σύνθεση που ικανοποιεί τις απαιτήσεις σε αντοχή, παρασκευάζονται 3 κυβικά δοκίμια 20 cm ή 15 cm και προσδιορίζεται η αντοχή f_{28} . Η απαιτούμενη κατά την μελέτη σύνθεσης αντοχή f_a είναι :

α) Για τα μεγάλα έργα $f_a = f_{ck} + 1,91 * S$

β) Για τα μικρά έργα $f_a = f_{ck} + 2,05 * S$

γ) Για το έτοιμο σκυρόδεμα $f_m > f_{ck} + 1,64 * S$

Η ακριβής τιμή της f_a για τις βιομηχανίες έτοιμου σκυροδέματος καθορίζεται από τον "κίνδυνο απόρριψης", "διακίδευση απόρριψης" που επιθυμεί να αναλάβει η βιομηχανία ανάλογα με τα κριτήρια συμμορφώσεως που χρησιμοποιούνται για την παραλαβή του σκυροδέματος. Στις περισσότερες περιπτώσεις το "περιθώριο αντοχής" δηλαδή το γινόμενο $Z * f_{ck}$ δεν είναι μικρότερο από $2 * f_{ck}$.

Η τυπική απόκλιση S για τις περιπτώσεις α και β προκύπτει από 60 τουλάχιστον δοκίμια που παρασκευάστηκαν με τα ίδια υλικά στις ίδιες εγκαταστάσεις από διαφορετικά αναμίγματα. Αν η τυπική απόκλιση δεν είναι γνωστή λαμβάνεται στις περιπτώσεις α και β ίση με 5 MPa και 6 MPa για θραυστά και φυσικά αδρανή αντίστοιχα

ενώ για την περίπτωση γ ίση με 3 MPa.

Οι βασικές αρχές που μας καθοδηγούν για την επιλογή της κατάλληλης σύνθεσης είναι οι εξείς :

α) Η μικρότερη δυνατή ποσότητα τσιμέντου για οικονομία και μείωση της συστολής.

β) Η μεγαλύτερη δυνατή συνεκτικότητα για αύξηση της αντοχής.

γ) Ο μεγαλύτερος κόκκος αδρανούς για αύξηση της αντοχής και μείωση της ποσότητας του τσιμεντοπολτού.

1.2.3 ΟΙ ΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΕΣ ΠΟΣΟΤΗΤΕΣ ΥΛΙΚΩΝ ΓΙΑ 1 m³ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Ας ορίσουμε αρχικά :

T: η ποσότητα του τσιμέντου σε kgr / m³

N: η ποσότητα του νερού σε kgr ή lit / m³

A: η ποσότητα των αδρανών σε kgr / m³

Το άθροισμα των ποσοτήτων αυτών δίνει το συνολικό βάρος 1 m³ νωπού σκυροδέματος :

$$T + N + A = B$$

Το άθροισμα των απόλυτων (πραγματικών) όγκων των υλικών αυτών πρέπει να δίνει 1 m³ .

$$\frac{T}{\gamma_T} + \frac{N}{1} + \frac{A}{\gamma_A} = 1 m^3$$

Οπου γ_T το απόλυτο βάρος του τσιμέντου και γ_A το φαινόμενο ειδικό βάρος των κόκκων των αδρανών που είναι ίσο με 2,6 tn / m³

(ασβεστολιθικά)

Ανάλογα με τον τύπο του τσιμέντου δίνονται οι ενδεικτικές μέσες τιμές των ειδικών βαρών που είναι :

Τσιμέντο τύπου I : $\gamma_T = 3,15 \text{ tn/m}^3$

Τσιμέντο τύπου II : $\gamma_T = 2,93 \text{ tn/m}^3$

Αν δεχτούμε ποσοστό αέρα = 2 % , η παραπάνω σχέση για την περίπτωση ασβεστολιθικών αδρανών και κοινού τύπου τσιμέντο παίρνει την μορφή :

$$\frac{T}{3.1} + N + \frac{A}{2.6} + 0.02 = 1m^3$$

Από την παραπάνω σχέση, για δεδομένη ποσότητα τσιμέντου και ορισμένο λόγο νερού προς τσιμέντο ($\omega = N/T$) μπορούμε να προσδιορίσουμε την απαιτούμενη ποσότητα αδρανών σε $1m^3$ σκυροδέματος :

$$A = \left(1 - \frac{T}{\gamma_T} - \omega_T - \alpha \right) * \gamma_A \rightarrow A = \left(0.98 - \frac{T}{3.1} - \omega_T \right) * 26 \quad \frac{kg}{m^3}$$

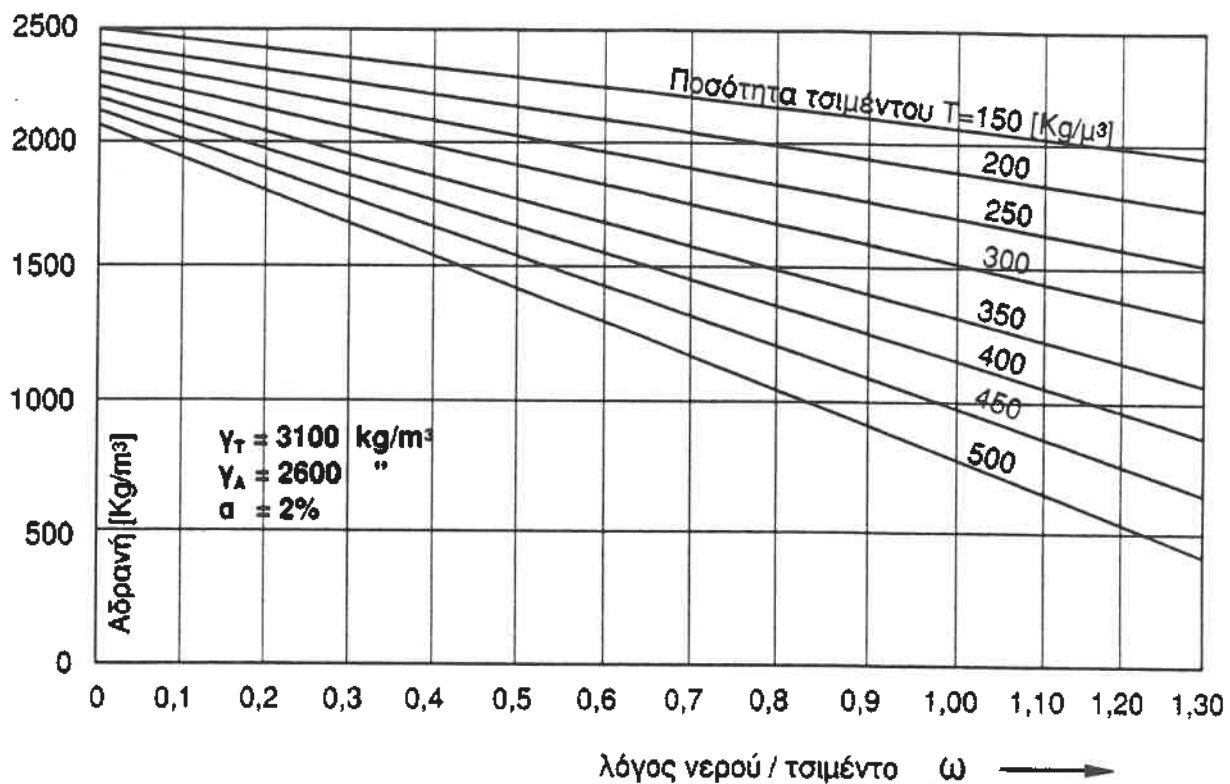
Το διάγραμμα του Σχήματος 2.1 δίνει την ποσότητα των αδρανών $A [kg/m^3]$ για διάφορες ποσότητες τσιμέντου $T [kg/m^3]$ και διάφορους λόγους $\omega = N/T$.

Με την εύρεση της συνολικής ποσότητας των αδρανών A , προσδιορίζεται η κατανομή της ποσότητας A για δεδομένη καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης.

Στην περίπτωση μεικτών αδρανών, με διαφορετικά ειδικά βάρη για κάθε ομάδα κόκκων η σχέση των απόλυτων (πραγματικών) όγκων δίνει:

$$\frac{T}{\gamma_T} + N + \left(\frac{A_1}{\gamma_{A_1}} + \frac{A_2}{\gamma_{A_2}} + \dots \right) = 1m^3$$

Όπου $A_1, A_2, \dots$ τα βάρη κάθε ομάδας αδρανών και γ_{A1}, γ_{A2} τα αντίστοιχα φαινόμενα ειδικά βάρη αυτών.



ΣΧΗΜΑ 1.4 Σχέση ανάμεσα στις ποσότητες νερού και αδρανών

1.3 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

1.3.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΝΩΠΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

1.3.1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Για να μπορέσει το νωπό σκυρόδεμα να γεμίσει τους τύπους, να περιβάλλει τις ράβδους του οπλισμού, να συμπυκνωθεί και να σκληρυνθεί, ώστε να αποκτήσει την επιθυμητή μορφή και τις επιθυμητές

ιδιότητες, πρέπει να παρουσιάζει ορισμένα χαρακτηριστικά.

Τα κυριότερα χαρακτηριστικά του νεπού σκυροδέματος είναι η ομοιογένεια, η εργασιμότητα, και η θερμοκρασία (δεν πρέπει να υπερβαίνει τους 35 °C σε συνθήκες υψηλών θερμοκρασιών περιβάλλοντος).

1.3.1.2 ΕΞΙΔΡΩΣΗ

Εξίδρωση ονομάζουμε το φαινόμενο του διαχωρισμού του νερού από τα στερεά συστατικά του σκυροδέματος, που παρουσιάζεται πριν από την πήξη.

Τα στερεά συστατικά λόγω της βαρύτητας καθιζάνουν, ενώ το νερό, λόγω των τριχοειδών δυνάμεων, έχει την τάση να κινηθεί προς τα επάνω. Έτσι εμφανίζεται στην επιφάνεια του σκυροδέματος λεπτό στρώμα νερού που μοιάζει με εξίδρωση. Το νερό αυτό τελικά εξατμίζεται.

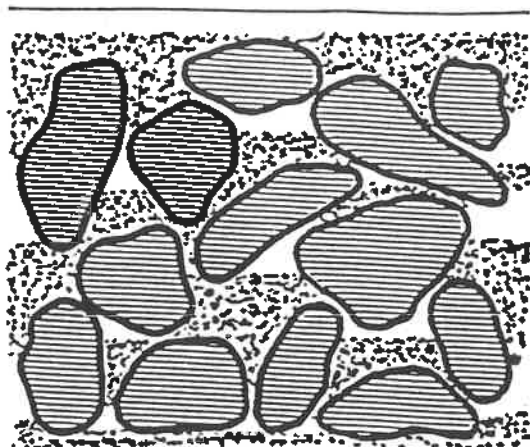
Η εξίδρωση εκτός από την απομάκρυνση μέρους του νερού έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του τελικού όγκου του μίγματος.

Η ελάττωση του νερού έχει ευνοϊκά αποτελέσματα στην αντοχή, αλλά το φαινόμενο του διαχωρισμού είναι επιβλαβές και ανεπιθύμητο γιατί δημιουργεί ανομοιογένεια μέσα στην μάζα του σκυροδέματος και άλλα δυσμενή φαινόμενα όπως : [1]

α) Το νερό που κινείται προς τα επάνω, συμπαρασύρει το λεπτόκοκκο τμήμα του τσιμέντου. Κατά τον τρόπο αυτό το μείγμα γίνεται φτωχότερο σε τσιμέντο, και στην επιφάνεια του δημιουργείται λεπτό στρώμα κονίας, που ρηγματώνεται και αποφλοιώνεται.

β) Κατά την δίοδο του νερού ανάμεσα στα στερεά συστατικά δημιουργούνται μέσα στον τσιμεντοπολτό λεπτοί σωληνίσκοι.

γ) Η συγκέντρωση του νερού δεν γίνεται μόνο στην επιφάνεια του σκυροδέματος, αλλά το ίδιο φαινόμενο εμφανίζεται τοπικά και στις κοιλότητες μεταξύ των σκύρων, όπου παρατηρείται τοπική συγκέντρωση νερού με αποτέλεσμα τη δημιουργία κοιλοτήτων. (Σχήμα 3.1)



ΣΧΗΜΑ 1.5 Σχηματική παράσταση της εξίδρωσης

δ) Το ίδιο φαινόμενο συγκέντρωσης νερού δημιουργείται και σε όλο το μήκος κάτω από τις ράβδους του οπλισμού, οπότε το κενό που σχηματίζεται μειώνει την επιφάνεια συνεργασίας μεταξύ σκυροδέματος και οπλισμού και άρα την πρόσφυση, ενώ αυξάνει τον κίνδυνο διάβρωσης των οπλισμών.

Αποτέλεσμα της εξίδρωσης είναι η "ανισοτροπία" σε σχέση με την οριζόντια διεύθυνση και την διεύθυνση της βαρύτητας που παρατηρείται στο σκυρόδεμα (η αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας κατά την κατακόρυφη διεύθυνση είναι μικρότερη εκείνων κατά την οριζόντια διεύθυνση).

Στην αύξηση της εξίδρωσης βοηθά η αύξηση της ποσότητας του νερού ανάμιξης, καθώς και έλλειψη των λεπτόκοκκων υλικών της άμμου και του τσιμέντου, γιατί μ' αυτό τον τρόπο διευκολύνεται η κίνηση του νερού προς τα επάνω.

Η ταχύτητα της ενυδάτωσης και ο χρόνος αρχής της πήξης είναι αποφασιστικής σημασίας, αφού η εξίδρωση παρουσιάζεται πριν την πήξη. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε αέρα περιορίζει την εξίδρωση διότι οι φυσαλίδες παρεμποδίζουν την κίνηση του νερού.

Οι δυσμενείς επιδράσεις της εξίδρωσης αίρονται τελείως αν στην αρχή της πήξης αποκατασταθεί η ομοιογένεια του υλικού με αναμόχλευση και αναδόνηση της μάζας. Ωστόσο απαιτείται ιδιαίτερη

προσοχή στην εκλογή της κατάλληλης χρονικής στιγμής για την αναμόχλευση, διότι πέρα από κάποιο χρονικό όριο μπορεί να καταστραφεί η δομή της τσιμεντοκονίας. [1]

1.3.1.3 ΑΠΟΜΕΙΞΗ

Τα στερεά συστατικά του σκυροδέματος διαχωρίζονται από το νερό, αλλά και μεταξύ τους χωρίζονται, κατά την κίνηση τους προς τα κάτω ανάλογα με το βάρος τους. Τα βαρύτερα συστατικά κινούνται προς τα χαμηλότερα στρώματα και έτσι ταχτοποιούνται σε στρώσεις ανάλογα με το βάρος τους. Το φαινόμενο αυτό είναι η απόμειξη του σκυροδέματος.

Όταν οι κόκκοι των αδρανών είναι από το ίδιο πέτρωμα και επομένως έχουν το ίδιο ειδικό βάρος, ο διαχωρισμός γίνεται ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων.

Το φαινόμενό της απόμειξης είναι από τα πιο καταστρεπτικά για την αντοχή και γενικά για την ποιότητα του σκυροδέματος, γιατί μεταβάλλει τον τρόπο και τις αναλογίες μίξης κατά απρόβλεπτο και ανομοιόμορφο τρόπο. Έτσι δημιουργούνται περιοχές με μειωμένη αντοχή και μειωμένη πρόσφυση μεταξύ του οπλισμού και του σκυροδέματος από την έλλειψη κονιάματος. Στην πράξη σοβαρές μορφές απόμειξης στο σκυρόδεμα μπορεί να λάβει χώρα κατά την μεταφορά, διάσθρωση και συμπίκνωση, εφόσον δεν τηρούνται οι σωστές διαδικασίες και η σύνθεση του σκυροδέματος παρέχει τέτοια δυνατότητα.

1.3.1.4 ΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑ

Με τον όρο "εργάσιμο" ή "εργασιμότητα" ορίζουμε το έργο που απαιτείται για την υπερνίκηση των εσωτερικών τριβών μέχρι να πετύχουμε πλήρη συμπίκνωση του σκυροδέματος. [1]

Στην πράξη το εργάσιμο είναι μια πολύ χρήσιμη έννοια για το

χρόνο της σκυροδέτησης, αλλά ταυτόχρονα και σύνθετη γιατί εξαρτάται από τις ακόλουθες ρεολογικές ιδιότητες :

α) Τη ρευστότητα, δηλαδή την ευκολία με την οποία ρέει ένα υλικό, η οποία εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα του νερού ανάμιξης.

β) Την πλαστικότητα, που δείχνει την ικανότητα του υλικού να παραμορφώνεται χωρίς να διακόπτεται η συνέχεια του.

γ) Τη συνοχή, που αποτελεί το σύνολο των δυνάμεων που έλκουν τα μόρια του υλικού μεταξύ τους και επομένως είναι μια από τις ιδιότητες που συντελούν στην πλαστικότητα.

δ) Τη συμπυκνωσιμότητα, δηλαδή τη δυνατότητα του υλικού να συμπυκνωθεί, η οποία εξαρτάται από τον αρχικό βαθμό συμπύκνωσης.

ε) Τη συνεκτικότητα, που εκφράζει άλλοτε το εργάσιμο και άλλοτε τη ρευστότητα. Όσο πιο συνεκτικό είναι ένα σκυρόδεμα, τόσο μεγαλύτερη είναι η συνοχή του και τόσο μικρότερη είναι η εργασιμότητα του και η ικανότητα του για έγχυση και συμπύκνωση.

Το εργάσιμο αυξάνεται όσο αυξάνεται το νερό ανάμιξης, δηλαδή η ρευστότητα του μίγματος. Η ρευστότητα εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα του νερού ανάμιξης και πολύ λιγότερο από το λόγο N/T .

Η μέτρηση της εργασιμότητας δεν μπορεί να γίνει άμεσα. Γι' αυτό έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι με τις οποίες μετρούμε μία ή περισσότερες από τις ιδιότητες που προαναφέρθηκαν. Οι κυριότερες απ' αυτές τις μεθόδους αυτές, που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα είναι: [1]

α) Κάθιση

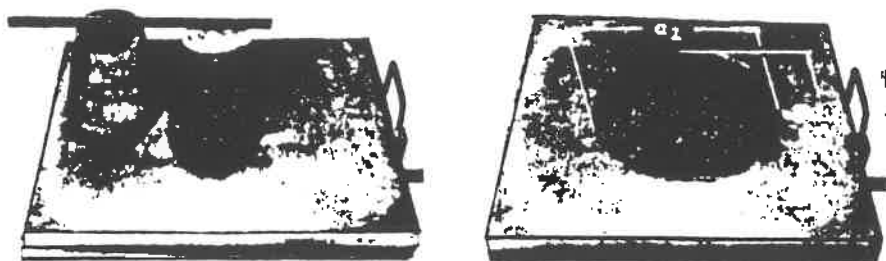
Ανοικτός μεταλλικός κόλουρος κώνος με διάμετρο κάτω βάσης 8 ίντσες, άνω βάσης 4 ίντσες και ύψος 12 ίντσες, γεμίζεται με σκυρόδεμα σε 3 στρώσεις και συμπυκνώνεται η κάθε στρώση με 25 ραβδισμό με $\Phi 16$. Μετά την πλήρωση αφαιρείται ο κώνος κατακόρυφα, οπότε το σκυρόδεμα παραμορφώνεται και κάθετα. Μετρίεται η διαφορά του μέσου ύψος του υλικού μετά την πτώση από το αρχικό ύψος του κώνου (A.S.T.M C143). Η κάθιση πρέπει να γίνει χωρίς την διατμητι-

κή θραύση του υλικού. Σκυροδέματα με κάθιση μικρότερη των 25 mm πρέπει να εξετάζονται με άλλη διαδικασία η οποία είναι προτιμότερο να περιλαμβάνει δόνηση (π.χ VEBE). Γενικά σκυροδέματα με ίδια κάθιση μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τον ίδιο τρόπο. Η κάθιση είναι μια δοκιμή χρήσιμη για τον έλεγχο ποιότητας του σκυροδέματος.

β) Μέτρο εξάπλωσης

Μεταλλικός τύπος που έχει τη μορφή της παράπλευρης επιφάνειας κώλου (μικρότερο ύψος από αυτό της κάθισης), γεμίζεται με σκυρόδεμα και συμπυκνώνεται με καθορισμένο τρόπο. Ο τύπος με το σκυρόδεμα είναι τοποθετημένος επάνω σε βάση (τράπεζα εξάπλωσης), που έχει την δυνατότητα να ανυψώνεται και να πέφτει ελεύθερα με τρόπο που να μεταδίδει τις κρούσεις στην μάζα του σκυροδέματος. Μετά την αφαίρεση του κώνου η βάση αναγκάζεται να πραγματοποιήσει ορισμένο αριθμό κρούσεων έτσι ώστε το σκυρόδεμα να απλωθεί πέρα από την αρχική του κάθιση.

Η μέση διάμετρος της μάζας του σκυροδέματος όπως έχει διαμορφωθεί ονομάζεται μέτρο εξάπλωσης. (Σχήμα 1.6)



ΣΧΗΜΑ 1.6 Τράπεζα εξαπλώσεως

γ) Μέτρο συμύκνωσης

Ένα μεταλλικό δοχείο διαστάσεων $20 \times 20 \times 40$ cm γεμίζεται με σκυρόδεμα και στην συνέχεια δονείται μέχρι το σκυρόδεμα να συμυκνωθεί τελείως. Ο λόγος του αρχικού ύψους (40 cm) προς το τελικό (h) χαρακτηρίζεται ως μέτρο συμύκνωσης ($40/h$).

δ) Δοκιμή VEBE

Η συσκευή VEBE αποτελείται από κώνο τοποθετημένο σε άλλο κυλινδρικό δοχείο μεγαλύτερης διαμέτρου, και μια τράπεζα δόνησης. Μετά την αφαίρεση του κώνου το σκυρόδεμα κάθεται αλλά συγχρόνως υποβάλλεται σε δόνηση και συμυκνώνεται παίρνοντας τη μορφή του εξωτερικού κυλινδρικού δοχείου.

Ο χρόνος από την στιγμή της απομάκρυνσης του κώνου και της σύγχρονης έναρξης της δόνησης, έως την πλήρη επιπεδότητα της άνω επιφάνειας ονομάζεται χρόνος VEBE.

Η επιπεδότητα της άνω επιφάνειας έχει πραγματοποιηθεί όταν το σκυρόδεμα καλύψει όλο το διαφανή κυκλικό δίσκο που παρακολουθεί την παραμόρφωση του σκυροδέματος.

Σύμφωνα με τις παραπάνω μεθόδους το σκυρόδεμα διακρίνεται από άποψη εργασιμότητας σε ύφυγρο, πλαστικό και ρευστό (Γερμανικοί κανονισμοί), (Πίνακας 1.2). [1]

Συνεκτικότητα κατά DIN 1045	Κάθιση S cm	Μέτρο Εξάπλωσης α (cm)	Μέτρο Συμπ/σης V	Χρόνος VEBE (Sec)
K ₁ ύφυγρο	0 – 2		1.45 – 1.26	40 – 8
K ₂ πλαστικό	2 – 8	28 – 40	1.25 – 1.11	10 – 3
K ₃ ρευστό	8 – 14	39 – 50	1.10 – 1.04	3 – 1

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.2

Ο Ελληνικός Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος προδιαγράφει για την μέτρηση του εργάσιμου την κάθιση (Προδιαγραφή ΣΚ-309), την εξάπλωση (ΣΚ-318) και για τα ύφυγρα μίγματα την μέθοδο VEBE (ΣΚ-310).

1.3.2 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΣΤΕΡΕΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

1.3.2.1 Η ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Αντοχή ονομάζεται γενικά η μέγιστη τιμή της δύναμης που μπορεί να παραληφθεί και να μεταβιβαστεί από ένα στοιχειώδες τμήμα του υλικού στο γειτονικό, χωρίς καταστροφή ή επικίνδυνη παραμόρφωσή του .

Η αντοχή εξαρτάται τόσο από τη φύση και την ποιότητα του υλικού, όσο και από την μορφή της εντατικής κατάστασης στην οποία υποβάλλεται. Έτσι το σωστό είναι, να αναφερόμαστε στη αντοχή συγκεκριμένου υλικού σώματος σε συγκεκριμένη εξωτερική καταπόνηση .

Κατά την παρασκευή του σκυροδέματος επιδρούν ορισμένοι πρακτικοί, τεχνολογικοί παράγοντες . Οι παράγοντες αυτοί είναι οι ακόλουθοι :
[1]

1. Οι αναλογίες σύνθεσης, δηλαδή οι ποσότητες του τσιμέντου, του νερού και των αδρανών σε κάθε κυβικό μέτρο .

2. Η ποιότητα των υλικών, στην οποία περιλαμβάνονται όχι μόνο η ποιότητα των τριών συστατικών, αλλά και ο βαθμός αλέσεως του τσιμέντου, το σχήμα και η μορφή των αδρανών, η κοκκομετρική διαβάθμιση και η ποιότητα του πετρώματος των αδρανών .

3. Τα παρασιτικά υλικά, δηλαδή ορισμένες επιβλαβείς ουσίες που αθέλητα εισχωρούν μαζί με τους κόκκους των αδρανών ή με το νερό .

4. Η συμπύκνωση του νωπού σκυροδέματος.

5. Η ηλικία του σκυροδέματος

6. Ο τρόπος συντήρησης, δηλαδή οι θερμοκρασίες και υγρομετρικές συνθήκες του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο γίνεται η πήξη και η

σκληρύνση του σκυροδέματος.

7. Η μορφή του δοκιμίου, στην οποία περιλαμβάνεται το σχήμα, το μέγεθος, η εξωτερική υφή, η επιπεδότητα, η καμπυλότητα των παρειών και η ακρίβεια των γωνιών.

8. Τέλος η μορφή της καταπόνησης, δηλαδή ο τρόπος και η ταχύτητα φόρτισης.

Όλοι αυτοί οι παράγοντες δημιουργούν ένα μεγάλο πλήθος μικροδιαφορών μέσα στην μάζα του σκυροδέματος που προκαλούν διασπορά, δηλαδή διακύμανση, των τιμών της αντοχής.

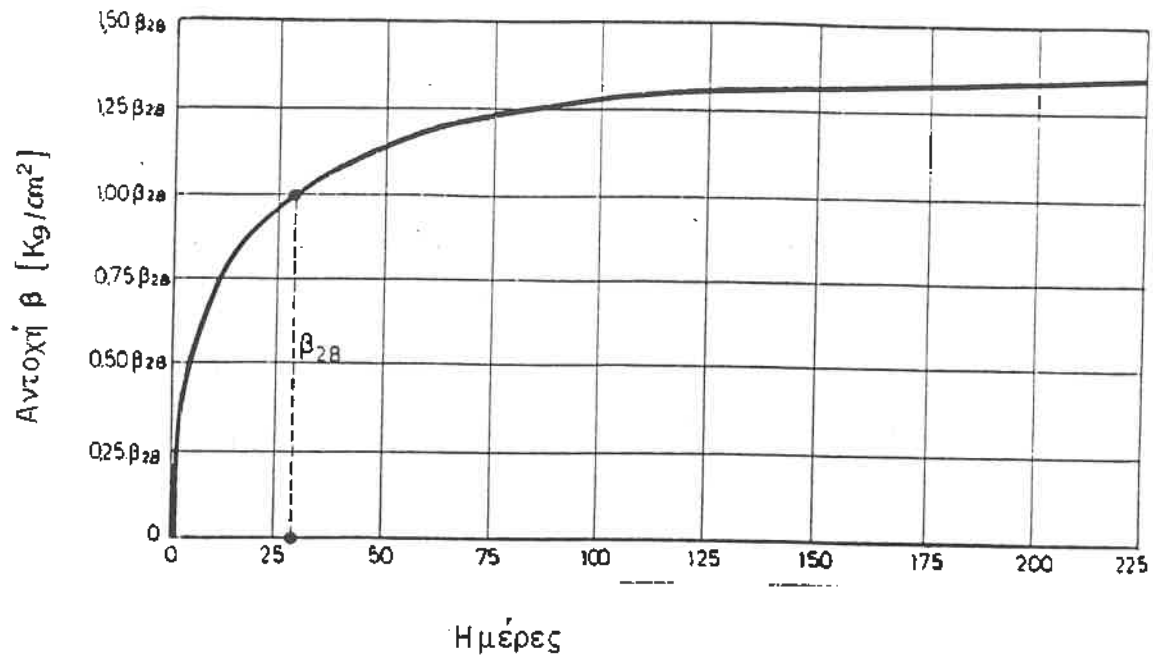
1.3.2.2 Η ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ

Επειδή η αντοχή είναι αποτέλεσμα της ενυδάτωσης του τσιμέντου, η εξέλιξη της ακολουθεί τον ίδιο εκθετικό νόμο με την χημική αντίδραση (Σχήμα 1.7)

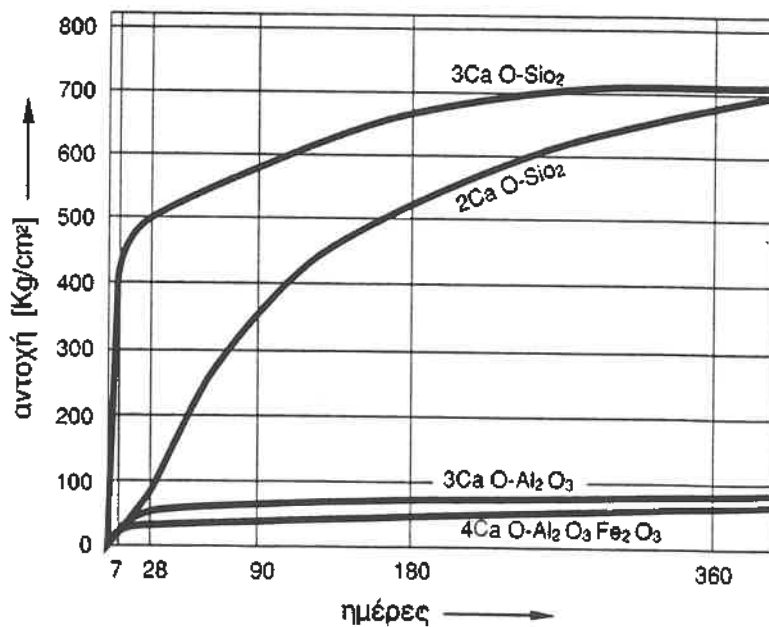
Η ανάπτυξη της αντοχής είναι όμως διαφορετική για κάθε ένα από τα 4 βασικά συστατικά του τσιμέντου (Σχήμα 1.8)

Έτσι η χρονική εξέλιξη της αντοχής ιδιαίτερα στις μικρές ηλικίες εξαρτάται από την σύνθεση του τσιμέντου. Άλλοι παράγοντες είναι ο βαθμός αλέσεως του τσιμέντου, δηλαδή το μέγεθος των κόκκων του και οι θερμοκρασιακές και υγρομετρικές συνθήκες του περιβάλλοντος. [1]

Γι' αυτούς τους λόγους 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.



ΣΧΗΜΑ 1.7 Ανάπτυξη της αντοχής με το χρόνο

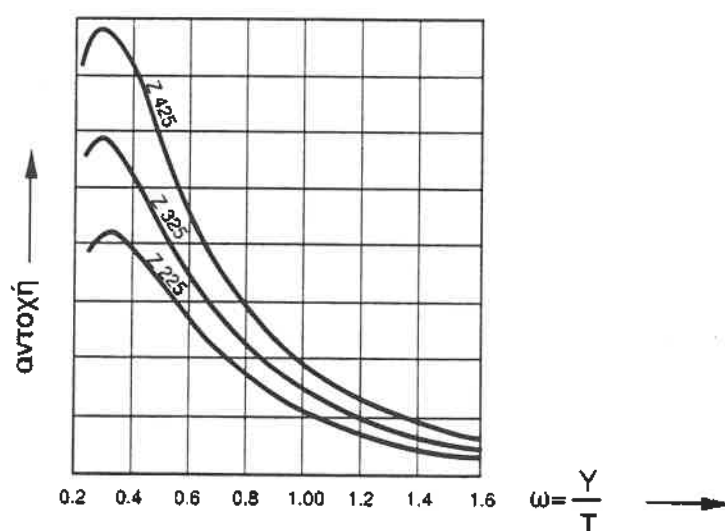


ΣΧΗΜΑ 1.8 Εξέλιξη της αντοχής που παρουσιάζουν τα διάφορα συστατικά του τσιμέντου, όταν εξετάζεται το καθένα χωριστά. Η σύγχρονη παρουσία και των άλλων συστατικών είναι δυνατό να τροποποιεί την εξέλιξη αυτή.

1.3.2.3 Η ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΤΙΣ ΑΝΑΛΟΓΙΕΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ

Η περίσσεια του νερού ανάμιξης περά από εκείνο που δεσμεύεται με το τσιμέντο, έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής εξαιτίας της δημιουργίας πορώδους στο σκυρόδεμα.

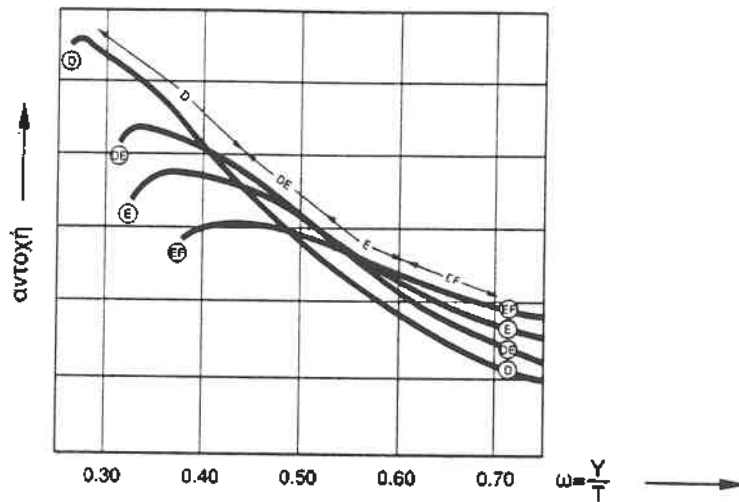
Η εξέλιξη της τιμής της αντοχής σε σχέση με το λόγο νερού προς τσιμέντο (N/T), για διάφορους τύπους τσιμέντου, διατυπώθηκε αρχικά από τον Abrams και παρουσιάζεται στο διάγραμμα του (Σχήματος 1.9). [1]



ΣΧΗΜΑ 1.9 Άμεση εξάρτηση της αντοχής από το λόγο N/T

Η μορφή και η θέση της καμπύλης εξαρτάται ακόμη και από τις αναλογίες και των άλλων υλικών, καθώς και από τον βαθμό συμπύκνωσης. Για τις διάφορες κοκκομετρικές καμπύλες υπάρχει μια διαφορετική τιμή του λόγου N/T που δίνει την μέγιστη αντοχή. Αντίστροφα για κάθε τιμή του λόγου N/T μια διαφορετική κοκκομετρική καμπύλη οδηγεί στην μέγιστη αντοχή. Επιπλέον όταν η τιμή του λόγου N/T ελατ-

τωθεί περὰ από κάποια οριακή τιμή, όπως φαίνεται στο (Σχήμα 1.10), η αντοχή αρχίζει πάλι να μειώνεται διότι η ικανότητα συμπύκνωσης μειώνεται.



ΣΧΗΜΑ 1.10 Εξάρτηση της αντοχής από το λόγο N/T , για διάφορες κοκκομετρικές διαβαθμίσεις αδρανών.

1.3.2.4 Η ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

Για να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα μέτρησης της αντοχής, καθορίζουμε ένα συμβατικό τρόπο μέτρησής της. Στους Κανονισμούς καθορίζονται το σχήμα και οι διαστάσεις του δοκιμίου και περιγράφεται με κάθε λεπτομέρεια ο τρόπος παρασκευής, συντήρησης και μέτρησης της αντοχής του δοκιμίου.

Τα φαινόμενα που εξαρτώνται από το μέγεθος και τη μορφή του δοκιμίου και τα οποία επιδρούν στην αντοχή είναι τα ακόλουθα.

α) Η εξάτμιση του νερού από την επιφάνεια και η πρόοδος της ενυδάτωσης.

β) Η επιφανειακή μικρορηγμάτωση που οφείλεται στις διαφορετικές συστολές του δοκιμίου κατά την ξήρανση και την ενυδάτωση.

γ) Η τριβή των πλακών θλίψης κατά την δοκιμή θραύσης παρεμποδίζει την εγκάρσια διαστολή του δοκιμίου και επομένως επηρεάζει περισσότερο τα μικρά δοκίμια.

δ) Στατιστικοί λόγοι, όπως στην περίπτωση μεγάλων δοκιμίων όπου υπάρχει η πιθανότητα να βρεθούν περιοχές μειωμένης αντοχής στις οποίες παρατηρείται η έναρξη της θραύσης.

ε) Η δομή του δοκιμίου δηλαδή η σχέση των κόκκων των αδρανών προς τις διαστάσεις τους.

Στην περίπτωση που η αντοχή μετريέται σε δοκίμια διαφορετικού σχήματος ή μεγέθους ή με διαφορετική μέθοδο απ' ότι ο κανονισμός καθορίζει, είναι απαραίτητη η αναγωγή στην "συμβατική αντοχή". Για την αναγωγή αυτή έχουν υιοθετηθεί από τους κανονισμούς διάφορες σχέσεις.

1.4 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΠΟΡΩΔΟΥΣ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ

Ο βασικός συντελεστής που επηρεάζει την αντοχή των ψαθυρών υλικών είναι το πορώδες. Έχει προταθεί ένας μεγάλος αριθμός μοντέλων για να περιγραφεί η σχέση μεταξύ της αντοχής και του πορώδους. Η πιο γνωστή σχέση η οποία φαίνεται να απεικονίζει τα πειραματικά δεδομένα, πολύ καλά για μια μεγάλη κλίμακα τιμών του πορώδους είναι η εκθετική σχέση : [11]

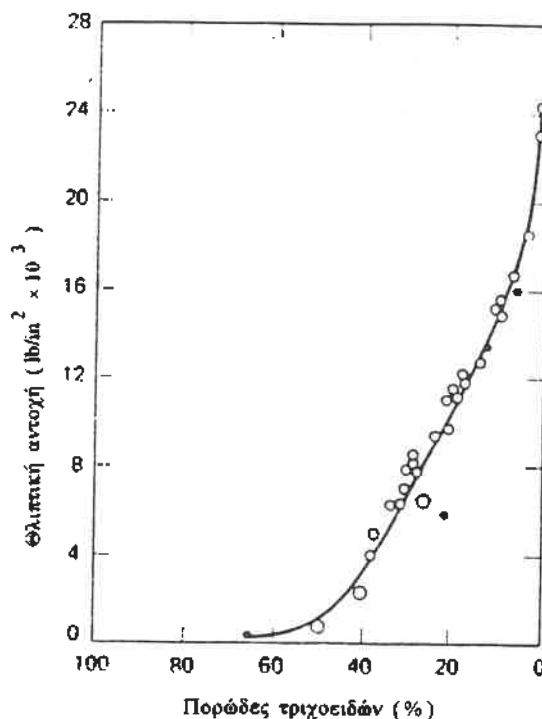
$$S = S_0 * e^{-k * p}$$

όπου S είναι η αντοχή, S_0 η αντοχή για μηδενικό πορώδες "πραγματική αντοχή", P το κλασματικό πορώδες και k μια σταθερά η οποία εξαρτάται από το σύστημα που μελετάται. Επίσης έχει προταθεί μια λογαριθμική σχέση η οποία βασίστηκε στην μελέτη της τσιμεντοκονίας.

$$S = q * \log \frac{P_r}{P}$$

όπου. P_r είναι το πορώδες για $S=0$ και q μια σταθερά.

Οι εξισώσεις αυτές αλλά και κάποιες άλλες που έχουν αναπτυχθεί, παριστάνουν το πρόβλημα έχοντας γίνει σημαντικές απλοποιήσεις. Η φύση του υλικού, το μέγεθος και το σχήμα των πόρων, αλλά και το εάν οι πόροι είναι άδαιοι ή γεμάτοι από κάποιο υγρό έχουν μεγάλη επιρροή. Για παράδειγμα φαίνεται ότι το συνεχόμενο πορώδες έχει μεγαλύτερη επίδραση στην αντοχή απ' ό,τι οι μεμονωμένοι πόροι. Επίσης υπάρχει η ένδειξη ότι οι μεγάλοι πόροι επιδρούν σε μεγαλύτερο βαθμό από τους μικρότερους, σε ό,τι αφορά την ανακούφιση από την συγκέντρωση τάσεων στα άκρα των ρωγμών. Ωστόσο οποιαδήποτε σχέση και αν λαμβάνεται για να περιγραφεί η σχέση αντοχής — πορώδους γίνεται φανερό ότι η αντοχή εξαρτάται κατά κύριο λόγο από το πορώδες. Πράγματι είναι γεγονός ότι σε πολλά υλικά, η σχέση του λόγου S/S_0 και του πορώδους ακολουθεί την ίδια καμπύλη. Το Σχήμα 1.11 παριστάνει μια τέτοια καμπύλη για διάφορους τύπους τσιμέντου, με διαφορετικά κάθε φορά αδρανή. [11]



ΣΧΗΜΑ 1.11 Γενική σχέση ανάμεσα στο πορώδες των τριχοειδών και τη μέση αντοχή των διαφόρων υλικών.

1.4.1 Ο ΛΟΓΟΣ ΠΟΛΤΟΥ/ΧΩΡΟΥ

Στην κλασική τους μελέτη που δημοσιεύτηκε το 1946 — 1947, οι Powers και Brownjowd έδειξαν ότι η αύξηση της αντοχής των τσιμεντοπολτών με τσιμέντο Πόρτλαντ, είναι ανάλογη της αύξησης του λόγου πολτού / χώρου ανεξάρτητα από την ηλικία, το λόγο νερού προς τσιμέντο και την ποιότητα του τσιμέντου. Ο λόγος $X = \text{πολτού} / \text{χώρου}$, είναι ο λόγος των στερεών προϊόντων της ενυδάτωσης προς τον χώρο που διατίθεται για τα προϊόντα αυτά της ενυδάτωσης. Με άλλα λόγια ο λόγος πολτού / χώρο είναι μια απεικόνιση του πορώδους, των τριχοειδών του πολτού σε σχέση με τις παραμέτρους που δύναται να μετρηθούν. Η σχέση του λόγου πολτός / χώρο είναι : [11]

$$X = \frac{0.68 * \alpha}{0.32 * \alpha + \left(\frac{\omega}{c} \right)}$$

Πριν την έναρξη της ενυδάτωσης, ο χώρος που διατίθεται είναι εκείνος που καταλαμβάνεται από το νερό ανάμιξης. Όταν η ενυδάτωση έχει προχωρήσει σε μεγάλο βαθμό ο διατιθέμενος χώρος είναι το άθροισμα των όγκων του ενυδατωμένου τσιμέντου και των τριχοειδών πόρων που παραμένουν. Να θυμηθούμε ότι 1cm^3 τσιμέντου κατέχει περίπου $2,1\text{cm}^3$ χώρου, όταν ενυδατωθεί πλήρως. [11]

Έχει βρεθεί ότι η σχέση μεταξύ της αντοχής σε θλίψη (σ_c) και του λόγου πολτού / χώρου είναι η εξής :

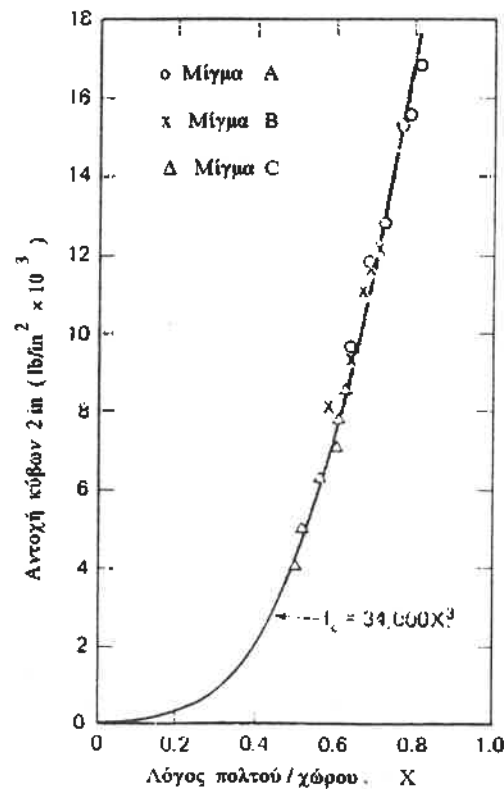
$$\sigma_c = A * X^n$$

όπου, A είναι μια σταθερά που απεικονίζει την πραγματική αντοχή του τσιμεντοπολτού (δηλαδή την αντοχή όταν ο λόγος πολτού / χώρου είναι ίσος με 1) και n είναι μια σταθερά που παίρνει τιμές μεταξύ 2,6 και 3,0 και εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του τσιμέντου. Η σχέση που βρέθηκε από τους Powers και Brownyard και απεικονίζεται στο

(Σχήμα 1.12) μπορεί να γραφεί ως εξής :

$$\sigma_c = 235 * X^3 \quad \text{MPa}$$

Αυτή η έκφραση είναι ανεξάρτητη του μίγματος σχεδιασμού και της ηλικίας. Πάντως θα πρέπει να τονιστεί, ότι τα δεδομένα των τιμών αυτών βασίζονται σε ανοχές που λαμβάνονται από κυβικά δοκίμια ακμής 2 in . Οι έλεγχοι σε σκέτο τσιμεντοπολτό ή σε δοκίμια με διαφορετικές γεωμετρίες, θα οδηγήσουν ενδεχομένως σε διαφορετικές τιμές των σταθερών αν και η γενική τάση θα είναι η ίδια. Πράγματι οι Powers και Brownyard βρήκαν ότι ο λόγος πολτού / χώρου, δεν ήταν εξολοκλήρου ανεξάρτητος της σύνθεσης του τσιμέντου. Τσιμέντο με υψηλή περιεκτικότητα σε C₃A , οδηγούσε σε χαμηλότερες αντοχές για δεδομένο λόγο πολτού / χώρο .



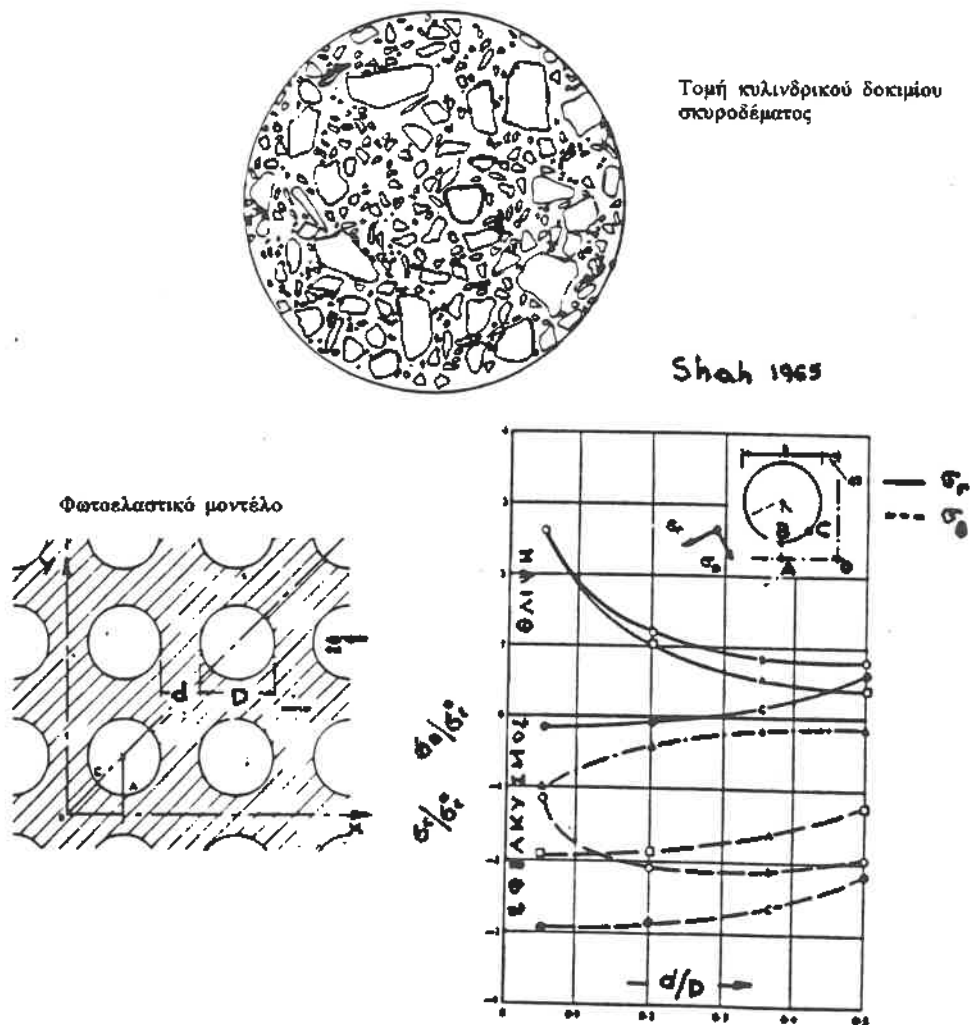
ΣΧΗΜΑ 1.12 Σχέση μεταξύ της θλιπτικής αντοχής και του λόγου πολτού/χώρο για τσιμεντοπολτούς με άμμο.

1.5 Η ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΩΝ ΔΕΣΜΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ-ΑΔΡΑΝΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η αντοχή του σκυροδέματος εξαρτάται από την αντοχή του πολτού, την αντοχή των χονδρόκοκκων αδρανών και την αντοχή της διεπιφάνειας μεταξύ του πολτού και των αδρανών. Αυτή η διεπιφάνεια είναι η ασθενέστερη περιοχή του σκυροδέματος. Γενικά οι δεσμοί μεταξύ τσιμέντου και αδρανών σπάνε πριν την αστοχία τόσο του τσιμέντου όσο και των αδρανών. Οι δυνάμεις συνοχής οφείλονται κατά ένα μέρος στις δυνάμεις Van der Waals. Πάντως το σχήμα και η μορφή της επιφάνειας των χονδρόκοκκων αδρανών είναι σημαντικά γιατί αυτά αποτελούν ένα σημαντικό μέρος των μηχανικών δεσμών μεταξύ του πολτού και των χονδρόκοκκων αδρανών. Να σημειωθεί ότι οι καμπτικές και εφελκυστικές αντοχές των σκυροδεμάτων που παράγονται από τραχεία αδρανή, είναι κατά 30% μεγαλύτερες από τις αντίστοιχες των σκυροδεμάτων που παράγονται από λεία αδρανή. Επίσης ενώ θεωρούμε ότι τα αδρανή είναι χημικώς ανενεργά, ίσως να πραγματοποιούνται ορισμένες χημικές αντιδράσεις μεταξύ του τσιμέντου και των αδρανών, οι οποίες συνεισφέρουν στην αντοχή. [11]

Η περιοχή των δεσμών είναι ασθενής διότι οι ρωγμές, υπάρχουν μόλις στην διεπιφάνεια μεταξύ του πολτού και των χονδρόκοκκων αδρανών, ακόμα και στην περίπτωση συνεχόμενης υγρής ωρίμανσης του σκυροδέματος, και πριν την επιβολή οποιασδήποτε εξωτερικής φόρτισης. Αυτές οι ρωγμές οφείλονται στην εξίδρωση, στην απόμιξη, και στις μεταβολές του όγκου του τσιμεντοπολτού κατά την σκυροδέτηση και την ενυδάτωση. Το φαινόμενο αυτό μελέτησαν οι Θεοχάρης, Κουφόπουλος το 1969 με την βοήθεια του φωτοελαστικού μοντέλου. Αντίστοιχα με το σκυρόδεμα, σ' ένα φωτοελαστικό υλικό (ομογενές υλικό) παρεμβάλλονται μόρια διαμέτρου D άλλου υλικού με διαφορετικό μέτρο ελαστικότητας. Παρατηρήθηκε ότι το σκυρόδεμα βρίσκεται πριν από κάθε φόρτιση σε εσωτερική ένταση η οποία μεταβάλλεται με τις υγρομετρικές συνθήκες και την διάρκειά τους (Σχήμα 1.13) [9]. Έτσι όταν γίνεται η συνηθισμένη ωρίμανση η οποία συνοδεύεται με σκλήρυνση του υλικού, τα μό-

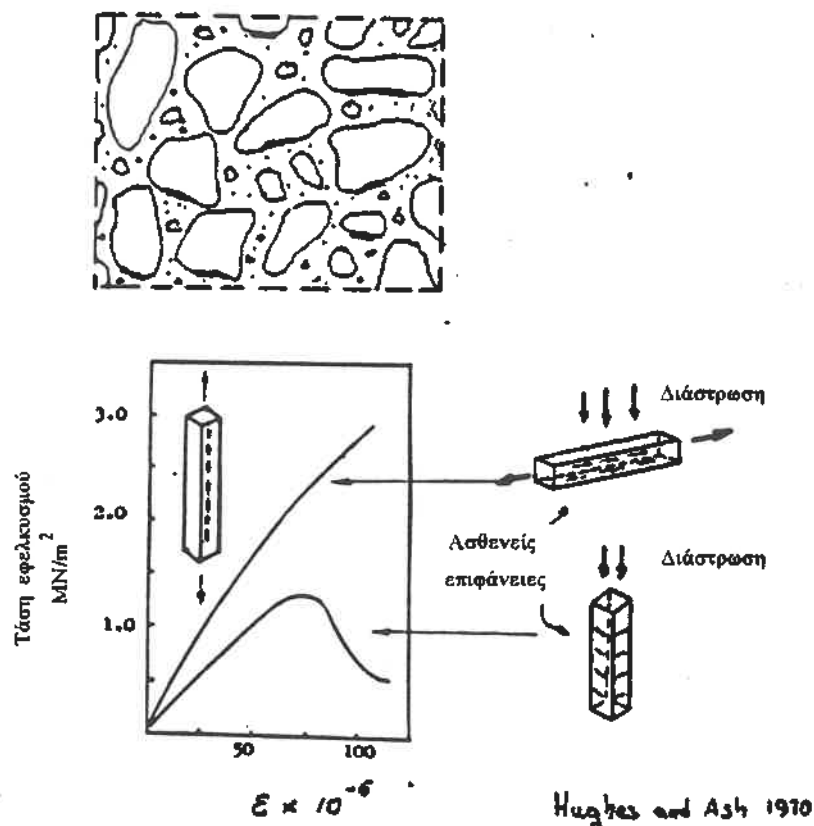
ρια των αδρανών τείνουν να συγκρατήσουν τη συστολή του τσιμεντοπολτού εξαιτίας του διαφορετικού τους μέτρου ελαστικότητας. Το φαινόμενο αυτό οδηγεί στη δημιουργία διατμητικών και εφελκυστικών δυνάμεων στη διεπιφάνεια, οι οποίες μειώνονται όσο μειώνεται το μέγεθος των μορίων. Έτσι οι δυνάμεις αυτές είναι σε θέση να προκαλέσουν πρόσθετη ρηγμάτωση εάν υπερβούν την αντοχή των δεσμών.



ΣΧΗΜΑ 1.13 Συστολή του τσιμεντοπολτού

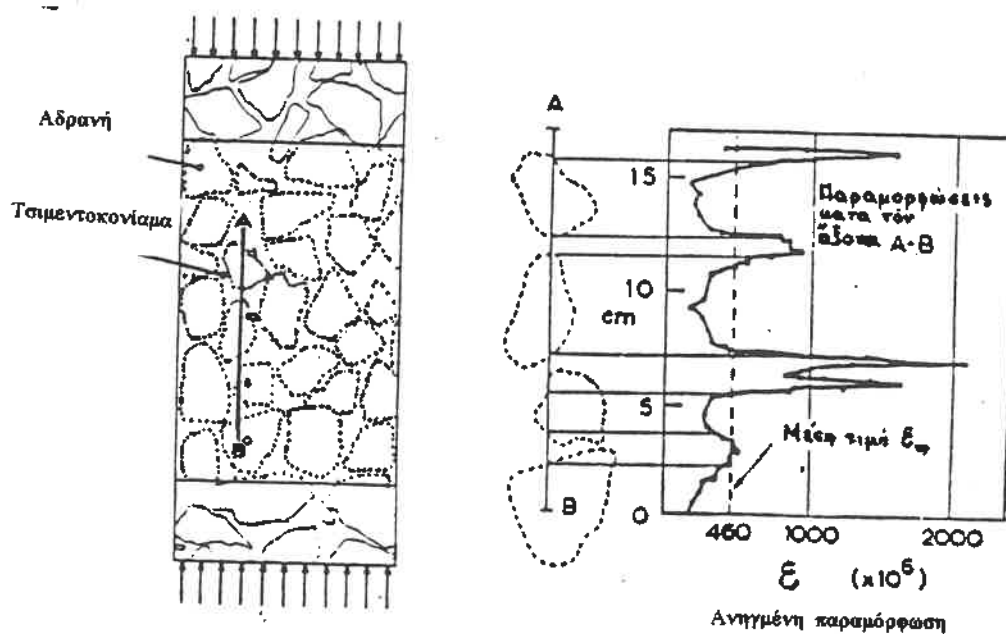
Επίσης επειδή τα σκυρόδεμα είναι ανισότροπο υλικό, δημιουργούνται ασυνέχειες κατά την ενυδάτωσή του. Οι ασυνέχειες αυτές είναι συνήθως

κενά τα οποία οφείλονται στον εγκλωβισμό του νερού κάτω από τα αδρανή. Κατά την σκυροδέτηση ορισμένες ποσότητες νερού δεσμεύονται κάτω από τα αδρανή και δεν μπορούν, λόγω του βάρους των αδρανών, να κινηθούν προς την επιφάνεια μέσω των τριχοειδών αγγείων. Το νερό αυτό καθώς συνεχίζεται η ωρίμανση του σκυροδέματος, απορροφάται από το τσιμέντο με αποτέλεσμα να δημιουργούνται μεγάλα κενά που επηρεάζουν τη συμπεριφορά του υλικού και τις μηχανικές του ιδιότητες. Στο (Σχήμα 1.14) φαίνεται ότι ανάλογα με την διεύθυνση της φόρτισης σε σχέση με τη διάστρωση του υλικού, παρατηρούνται διαφορετικές καμπύλες τάσεων- παραμορφώσεων και κατ' επέκταση διαφορετικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας. [9]



ΣΧΗΜΑ 1.14 Επιρροή της ανισοτροπίας του σκυροδέματος στο μέτρο ελαστικότητας.

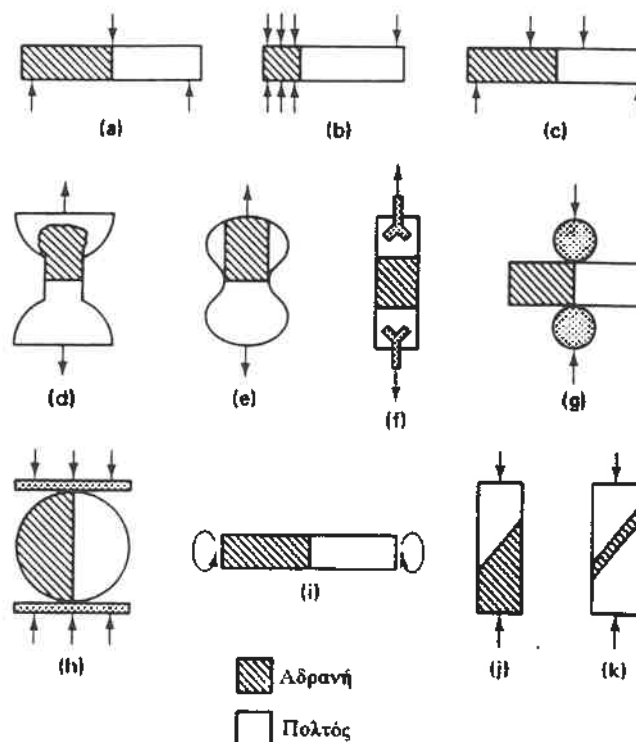
Υπό την επιβολή του φορτίου, η διαφορά στα μέτρα ελαστικότητας των αδρανών και του τσιμεντοπολτού, οδηγεί σε ακόμα μεγαλύτερη ρηγμάτωση. Ο Dantu (1959) καθώς και οι Swanoy (1969) και Keeton (1961) έδειξαν ότι η κατανομή των τάσεων και των παραμορφώσεων στο εσωτερικό του σκυροδέματος είναι ανομοιόμορφη. Με την χρήση φωτοελαστικού υλικού μετρήθηκε η μεταβολή των παραμορφώσεων καθ' ύψος ενός δοκιμίου σκυροδέματος. Όπως φαίνεται στο (Σχήμα 1.15) η συγκέντρωση των τάσεων μεταβάλεται λόγω των διαφορετικών μηχανικών χαρακτηριστικών μεταξύ των αδρανών και του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού. [9]



ΣΧΗΜΑ 1.15 Η κατανομή των τάσεων και των παραμορφώσεων στο εσωτερικό του σκυροδέματος.

1.5.1 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΤΩΝ ΔΕΣΜΩΝ

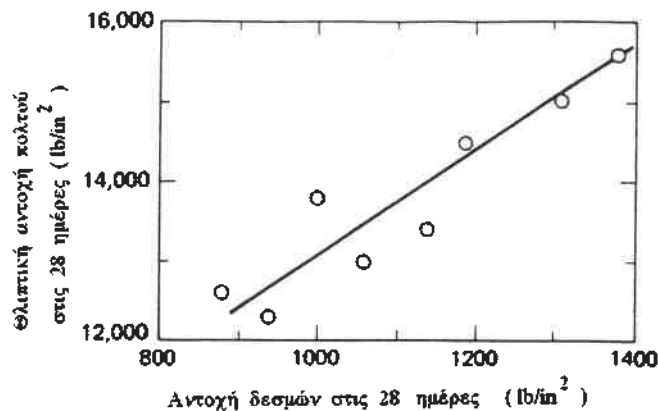
Δυστυχώς παρόλη την σημασία που έχουν οι δεσμοί στον καθορισμό της συμπεριφοράς του σκυροδέματος, η μέτρηση της αντοχής των δεσμών είναι πολύ δύσκολη. Δεν υπάρχουν πρότυπες δοκιμές για την αντοχή των δεσμών, αλλά υπάρχει ένας μεγάλος αριθμός ελέγχων που έχουν χρησιμοποιηθεί και οι οποίοι φαίνονται στο (Σχήμα 1.16). Ωστόσο είναι ιδιαίτερα κατανοητοί οι παράγοντες που επηρεάζουν την αντοχή των δεσμών. Η αντοχή των δεσμών φαίνεται να εξαρτάται από πολλούς παράγοντες οι οποίοι είναι εκείνοι που ελέγχουν και τους άλλους τύπους αντοχή. Για παράδειγμα η αντοχή αυξάνεται από τη μείωση του λόγου N/T .



ΣΧΗΜΑ 1.16 Τεχνικές που χρησιμοποιούνται στη μέτρηση της αντοχής μεταξύ των αδρανών και του τσιμεντοπολτού.

Η αντοχή επίσης εξαρτάται από τον τύπο του τσιμέντου ενώ μετ-

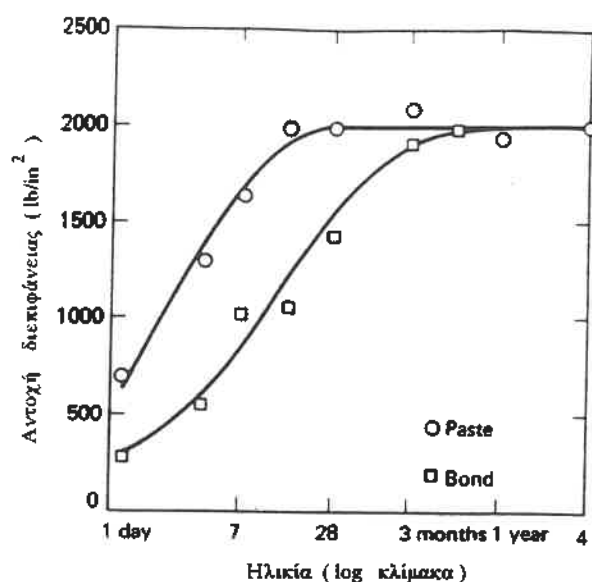
βάλλεται όπως μεταβάλλεται η θλιπτική αντοχή του τσιμέντου, όπως φαίνεται στο (Σχήμα 1.17). Η θερμοκρασία ωρίμανσης φαίνεται να μην επηρεάζει την αντοχή των δεσμών. [11]



ΣΧΗΜΑ 1.17 Σχέση μεταξύ της αντοχής των δεσμών και της αντοχής του πολτού για 8 διαφορετικούς τύπους τσιμέντου πορτλαντ με λόγο $N/T=0.35$.

Η επιρροή της ηλικίας του τσιμεντοπολτού στην αντοχή των δεσμών σε δοκιμή κάμψης φαίνεται στο(Σχήμα 1.18).Αφού αυτές οι αντοχές είναι ισοδύναμες, ο τρόπος αστοχίας αλλάζει από αστοχία των δεσμών σε αστοχία του πολτού.

Για να επιτευχθούν ισχυροί δεσμοί, το σκυρόδεμα θα πρέπει να δονηθεί καλά. Αφού τα κενά τείνουν να μειώσουν την επιφάνεια επαφής μεταξύ του πολτού και των θραυστών αδρανών, η περιεκτικότητα του αέρα στο μίγμα τείνει να μειώσει την αντοχή των δεσμών. Η ικανότητα απορρόφησης νερού των αδρανών είναι ιδιαίτερα σημαντική αφού τα πορώδη αδρανή, δηλαδή αυτά που στεγνώνονται πριν την ανάμιξη, δίνουν πολύ καλούς δεσμούς αφού η διαδικασία απορρόφησης βελτιώνει την επαφή μεταξύ πολτού και αδρανών. Η αστοχία των δεσμών συνήθως δεν πραγματοποιείται μεταξύ του πολτού και των λεπτόκοκκων αδρανών. Μάλλον οι αστοχίες των δεσμών πραγματοποιούνται γύρω από τα μόρια των χονδρόκοκκων αδρανών. Καθώς το μέγεθος των αδρανών αυξάνεται, οι τάσεις στην διεπιφάνεια του πολτού και των αδρανών αυξάνονται απότομα, οδηγώντας σε μια εμφανή μείωση της αντοχής των δεσμών.



ΣΧΗΜΑ 1.18 Μακροπρόθεσμα αποτελέσματα ελέγχου της ηλικίας του σκυροδέματος στην αντοχή των δεσμών και του πολτού.

Όπως ήδη αναφέρθηκε πολλά αδρανή είναι ανενεργά και γι' αυτό οι δεσμοί εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από τον τύπο του αδρανούς. Γενικά η σχέση μεταξύ της αντοχής των δεσμών και της περιεκτικότητας σε πυρίτιο φαίνεται στο (Σχήμα 1.19). Παρατηρείται ότι πραγματοποιούνται κάποιες ποζολανικές αντιδράσεις με το πυρίτιο, οι οποίες οδηγούν στην δημιουργία μιας ζώνης, η οποία επεκτείνεται 25 έως 200 μm μέσα στην μάζα του πολτού και 0 έως 100 μm μέσα στην μάζα του αδρανούς όπως φαίνεται από τις μικροσκοπικές μετρήσεις στο (Σχήμα 1.20). Επίσης έχουν παρατηρηθεί κάποιες αντιδράσεις μεταξύ του τσιμέντου και των ασβεστολιθικών αδρανών. [11]

Η υφή της επιφάνειας των αδρανών είναι επίσης πολύ σημαντικός παράγοντας στον καθορισμό της συμπεριφοράς των δεσμών και συγκεκριμένα η υφή των χονδρόκοκκων μορίων των αδρανών. Μία όλο και περισσότερο λεία υφή οδηγεί σε μείωση :

- α) Της αντοχής τόσο σε θλίψη όσο και σε εφελκυσμό.
- β) Της τάσης στην οποία επέρχεται η ρηγμάτωση, δηλαδή γίνεται αρχικά αισθητή.

- γ) Της ολικής παραμόρφωσης την στιγμή της αστοχίας
- δ) Της μέγιστης ογκομετρικής παραμόρφωσης
- ε) Τού μέτρου ελαστικότητας (αυτή η επίδραση μειώνεται όσο αυξάνεται η ηλικία του σκυροδέματος)

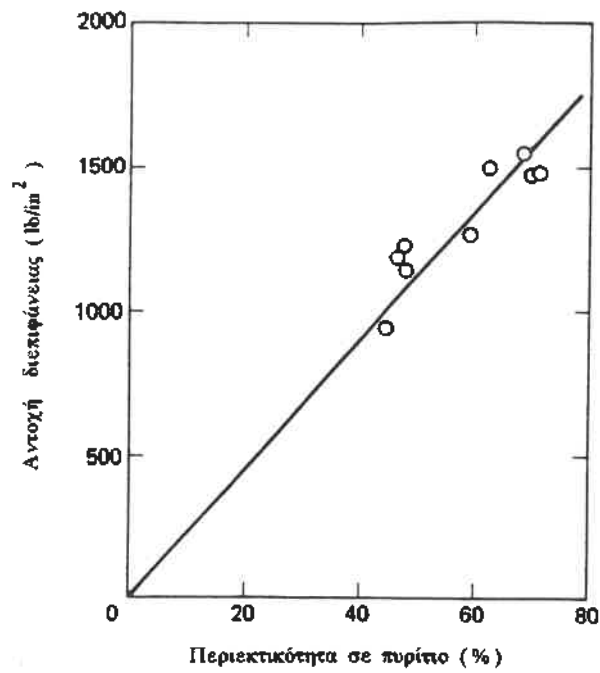
Αν και δεν υπάρχουν αρκετές πληροφορίες, φαίνεται ότι μία θραυστή ή τραχεία υφή επιφάνειας καθυστερεί την εκδήλωση των ρωγμών των δεσμών. Επίσης οι παραμορφώσεις που είναι συνάρτηση του χρόνου όπως ο ερπυσμός και η ξήρανση, φαίνεται να επηρεάζονται πολύ λίγο από την υφή της επιφάνειας των αδρανών.

Οι συνθήκες της δοκιμής έχουν μεγάλη επιρροή στην μετρούμενη αντοχή των δεσμών. Συγκεκριμένα η υπερβολική ξήρανση του υλικού μειώνει την αντοχή των δεσμών γεγονός που οφείλεται στην ανάπτυξη ρωγμών εξαιτίας της συστολής στην διεπιφάνεια μεταξύ του πολτού και των αδρανών. Η αστοχία των δεσμών μπορεί να γίνει τόσο σε εφελκυσμό όσο και σε θλίψη που προκαλεί διάτμηση. Κατά τον εφελκυσμό η αντοχή των δεσμών κυμαίνεται μεταξύ 30 έως 90% της αντοχής σε εφελκυσμό του τσιμεντοπολτού αν και περιστασιακά η αντοχή των δεσμών φτάνει την αντοχή σε εφελκυσμό (Σχήμα 1.18).

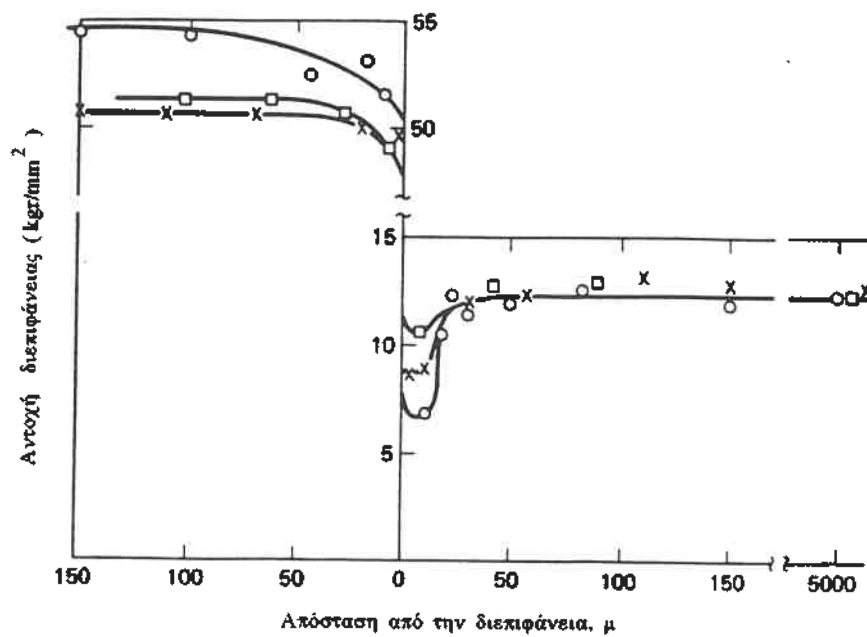
Η πραγματική διατμητική αντοχή των δεσμών είναι η ίδια σε μέγεθος με την εφελκυστική αντοχή. Η αντοχή αυτή περιγράφεται από το νόμο του Coulomb.

$$\tau_b = \tau_o + \mu \cdot \sigma = \tau_o + \sigma \cdot \tan \varphi$$

όπου, τ_b είναι η διατμητική αντοχή των δεσμών, τ_o είναι η πραγματική διατμητική αντοχή, σ είναι η ορθή τάση και φ είναι η γωνία εσωτερικής τριβής. Έχει βρεθεί ότι η τιμή της φ είναι μεταξύ 30° και 40° και εξαρτάται από τον τύπο του αδρανούς, το λόγο N/T και την αντοχή του πολτού.



ΣΧΗΜΑ 1.19 Εξάρτηση της αντοχής των δεσμών από την περιεκτικότητα σε πυρίτιο.



ΣΧΗΜΑ 1.20 Μεταβολή της αντοχής στη διεπιφάνεια μεταξύ του τσιμέντου και των αδρανών.

1.6 Η ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ ΣΤΗΝ ΑΝΤΟΧΗ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Οι δεσμοί των μορίων μέσα στην μάζα των αδρανών μεταβάλλονται ανάλογα με την ορυκτολογική φύση των αδρανών. Πάντως τα φυσιολογικού βάρους αδρανή είναι σημαντικά σκληρότερα και ανθεκτικότερα από το σκληρυμένο τσιμεντοπολτό ή το ίδιο το σκυρόδεμα. Έτσι για να κατανοήσουμε την αντοχή του σκυροδέματος θα πρέπει να εξεταστούν οι δεσμοί μέσα στην μάζα του τσιμεντοπολτού ή οι δεσμοί μεταξύ του τσιμεντοπολτού και των αδρανών. Γενικά η επιρροή των αδρανών θα πρέπει να θεωρηθεί απλώς σαν μια ανομοιομορφία του τσιμεντοπολτού. Γι' αυτό η αντοχή καθώς και ο τρόπος παραμόρφωσης του σκυροδέματος κυριαρχούνται βασικά από τον τσιμεντοπολτό, αν και μπορούν να τροποποιηθούν με τον συνυπολογισμό των αδρανών. Όπως έχουμε δει, οι δεσμοί μεταξύ του τσιμέντου και των αδρανών μπορεί να είναι μηχανικοί και χημικοί. Σε κάθε περίπτωση η αντοχή των δεσμών του τσιμέντου με τα αδρανή είναι μικρότερη από εκείνη των δεσμών του ίδιου του τσιμέντου, και εκείνης των δεσμών των αδρανών. Είναι γνωστό ότι όταν δεν υπάρχουν δεσμοί μεταξύ του τσιμέντου και των αδρανών, τα αδρανή έχουν μια αρνητική επίδραση στις ιδιότητες του σύνθετου υλικού. Συνήθως αναπτύσσονται μερικοί δεσμοί ώστε η συνεισφορά των αδρανών να μεταβάλλεται από μια αρνητική σε μια θετική συνεισφορά.

1.7 ΤΑ ΠΡΟΣΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ

1.7.1 ΓΕΝΙΚΑ

Πρόσθετα ή βελτιωτικά υλικά του σκυροδέματος ονομάζονται τα υλικά που προσθέτονται μέσα στο σκυρόδεμα κατά την παρασκευή του και τροποποιούν κατά ορισμένο τρόπο μερικές από τις ιδιότητες του. Ανάλογα με τον τρόπο που δρουν τα πρόσθετα υλικά χωρίζο-

νται σε δύο βασικές κατηγορίες : [1]

1. Στην πρώτη, ανήκουν εκείνα τα οποία δρουν κατά τρόπο χημικό ή φυσικοχημικό, ενώ η ποσότητα τους είναι τόσο μικρή, ώστε να μην επηρεάζει την σύνθεση του σκυροδέματος (χημικά πρόσθετα, ή απλώς πρόσθετα) .

2. Στην δεύτερη κατηγορία, ανήκουν τα υλικά που εκτός από την τυχόν χημική ή φυσικοχημική τους δράση, η ποσότητα τους είναι τέτοια, ώστε να πρέπει να λαμβάνεται υπόψη και η τροποποίηση της σύνθεσης του σκυροδέματος που τα υλικά αυτά προκαλούν (πρόσμικτα) .

Ανάλογα με το αποτέλεσμα που προκαλούν τα πρόσθετα υλικά κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες :

1. Ρευστοποιητικά
2. Αερακτικά
3. Επιβραδυντικά
4. Επιταχυντικά
5. Στεγανοποιητικά
6. Αντιπαγετικά
7. Αεραπαγωγά
8. Αντιδιαβρωτικά
9. Δραστικά κατά των μικροβίων και των μυκήτων
10. Χρώματα

Η χρήση των πρόσθετων υλικών απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή διότι επιδρούν σε περισσότερες από μια ιδιότητες του σκυροδέματος, και πολλές φορές επιδρούν αρνητικά σε ιδιότητες όπως π.χ η αντοχή και η συστολή. Επίσης η σύνθεση των περισσοτέρων από τα υλικά που κυκλοφορούν στο εμπόριο τηρείται μυστική και έτσι συνήθως δεν γνωρίζουμε ακριβώς την σύνθεση του υλικού. Επιπλέον απαιτείται προσοχή στην καλή ανάμιξη των πρόσθετων, ιδιαίτερα όταν αυτά είναι σε σκόνη, η οποία θα πρέπει να ξεπερνά τα 5 λεπτά. Γι' αυτό ο έλεγχος των πρόσθετων με τα ίδια υλικά που θα χρησιμοποιηθούν πρέπει γενικά να θεωρείται απαραίτητος.

1.7.2 ΡΕΥΣΤΟΠΟΙΗΤΙΚΑ

Με τον όρο "ρευστοποιητικά" ονομάζονται τα υλικά εκείνα που προκαλούν αύξηση της ρευστότητας του μίγματος. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να ελαττωθεί το νερό αναμίξεως για τον ίδιο βαθμό εργασιμότητας, με αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής.

Η δράση των ρευστοποιητικών στηρίζεται στην μείωση της επιφανειακής τάσης του νερού και των δυνάμεων συνοχής που αναπτύσσονται ανάμεσα στους κόκκους του τσιμέντου, με αποτέλεσμα την ελάττωση της εσωτερικής τριβής.

Τα ρευστοποιητικά είναι δυνατόν να συντελούν στην καθυστέρηση της πήξης, καθώς επίσης προκαλούν αύξηση της χρόνιας συστολής του σκυροδέματος. Έτσι σκοπός των Κανονισμών είναι να θέσουν όρια στα ανεπιθύμητα αυτά φαινόμενα, ενώ παράλληλα καθορίζουν και την ελάχιστη ελάττωση του νερού που πρέπει να πετυχαίνεται για να ονομάζονται τα υλικά αυτά ρευστοποιητικά.

1.7.3 ΑΕΡΑΚΤΙΚΑ

Η χρήση των αερακτικών οδηγεί στην ανάπτυξη μικρών φυσαλίδων μέσα στην μάζα του κονιάματος. Σκοπός της δημιουργίας των φυσαλίδων είναι η αύξηση του εργάσιμου και της αντοχής στον παγετό, χωρίς να μειώνεται αισθητά η αντοχή σε θλίψη.

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 % κατ' όγκο. Επιπλέον συντελούν στην μείωση της εσωτερικής τριβής του υλικού, ενώ συμβάλλουν αποφασιστικά στην προστασία κατά του παγετού αφού χρησιμεύουν σαν χώροι διαστολής του νερού κατά την πήξη του.

Τα αερακτικά έχουν παρόμοιες συνέπειες με τα ρευστοποιητικά γι' αυτό και στους κανονισμούς περιγράφονται περιορισμοί σχετικά με την συστολή, την πήξη κ.τ.λ.

1.7.4 ΕΠΙΒΡΑΔΥΝΤΙΚΑ

Ως επιβραδυντικά πρόσθετα χαρακτηρίζονται τα υλικά που επιβραδύνουν την εξέλιξη της ενυδάτωσης.

Η δράση των υλικών αυτών στηρίζεται στην απομόνωση των αργιλικών αλάτων και κυρίως από του αργιλικού τριασβεστίου του τσιμέντου και επομένως στην καθυστέρηση της επαφής των με το νερό.

Τα επιβραδυντικά δεν έχουν σημαντική επιρροή στην συστολή. Αντίθετα επηρεάζουν τη ρευστότητα επειδή αυξάνουν την περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε αέρα.

Κατά κανόνα τα υλικά αυτά χρησιμοποιούνται, όταν η διαδικασία μεταφοράς και διάστρωσης προβλέπεται ότι θα απαιτήσει περισσότερο χρόνο από τον συνηθισμένο, όταν επιθυμούμαι να αποφύγουμε τους αρμούς εργασίας, στην περίπτωση του έτοιμου σκυροδέματος, και όταν επιδιώκεται απάλυνση των αιχμών της θερμοκρασίας που δημιουργείται από την θερμότητα ενυδάτωσης.

1.7.5 ΕΠΙΤΑΧΥΝΤΙΚΑ

Επιταχυντικά υλικά χαρακτηρίζονται εκείνα τα υλικά που επιταχύνουν την διαδικασία της ενυδάτωσης του τσιμέντου. Η επιτάχυνση εκδηλώνεται είτε με συντόμευση του χρόνου ως την αρχή της πήξης είτε με επιτάχυνση της σκλήρυνσης, και την ανάπτυξη της αντοχής. Έτσι τα πρώτα χαρακτηρίζονται με τον όρο επιταχυντικά πήξεως, ενώ τα δεύτερα ως επιταχυντικά της σκλήρυνσης.

Τα επιταχυντικά σε αντίθεση με τα επιβραδυντικά έχουν δυσμενή επίδραση στην τελική αντοχή του σκυροδέματος. Γι' αυτό η χρήση τους πρέπει να γίνεται μόνο όταν είναι αναγκαία.

Η χρήση των υλικών αυτών ενδείκνυται, όταν είναι αναγκαία η σύντομη αποπεράτωση της κατασκευής, στην περίπτωση προκατασκευασμένων στοιχείων όπου επιδιώκεται γρήγορη απομάκρυνση των ξυλοτύπων ή όταν το στοιχείο πρόκειται να αναλάβει σύντομα εξωτερικά φορτία.

Τέλος τα επιταχυντικά χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με άλλα υλικά, όπως τα αερακτικά για την παρασκευή των λεγόμενων αντιπαγετικών, δηλαδή υλικών που μειώνουν τις δυσάρεστες συνέπειες του παγετού.

1.7.6 ΣΤΕΓΑΝΟΠΟΙΗΤΙΚΑ

Η διέλευση του νερού μέσα στο σκυρόδεμα γίνεται είτε μέσα από τους τριχοειδείς πόρους του κονιάματος, είτε από τις επιφάνειες επαφής του κονιάματος και των αδρανών, αλλά και από τις μικροσκοπικές κοιλότητες που οφείλονται στην κακή συμπίκνωση και τις ρηγματώσεις που δημιουργούνται από τις μεταγενέστερες συστολοδιαστολές του υλικού. Έτσι διακρίνονται δύο τρόποι διέλευσης του νερού :

α) Η απορρόφηση του νερού που βρίσκεται σε απλή επαφή, με τις μοριακές έλξεις του υλικού, όταν αυτό δεν είναι κορεσμένο με νερό.

β) Η διείσδυση του νερού με πίεση.

Η δράση των στεγανοποιητικών έχει ως σκοπό :

α) Την αποφυγή δημιουργίας μακροσκοπικών κοιλιοτήτων και ρηγματώσεων.

β) Τη μείωση του πορώδους του υλικού.

γ) Τη μείωση της συνάφειας ή την ανάπτυξη υδροαπωθητικών δυνάμεων μεταξύ τσιμεντοκονιάματος και νερού.

Έτσι λοιπόν η αποτελεσματικότητα των υλικών αυτών εξαρτάται τόσο από τη σωστή εφαρμογή όσο και από τη σύγχρονη βελτίωση της ποιότητας του σκυροδέματος, και φυσικά όλης της εργοταξιακής τεχνικής.

Τα στεγανοποιητικά κατατάσσονται στις ακόλουθες γενικές κατηγορίες :

α) Αδρανή υλικά, σε μορφή σκόνης όπως ο χαλαζίας, ο μπετονίτης κ.α.

β) Υλικά ανόργανης προέλευσης όπως η θηραϊκή γη και ορισμένα ορυκτά πυριτικά άλατα.

γ) Αδιάλυτοι σάπωνες σε μορφή λεπτής σκόνης ή στη μορφή γαλακτώματος με έντονες υδροαπωθητικές ιδιότητες.

δ) Ρητινικά ή στεατικά άλατα του αμμωνίου σε μορφή πολτού ή γα-

λακτώματος.

ε) Υγροί υδρογονάνθρακες ή ελαιώδη προϊόντα του πετρελαίου στη μορφή γαλακτώματος .

Τα στεγανοποιητικά υλικά στη μορφή σκόνης ή υγρού προσθέτονται στο μίγμα σε αναλογίες 0,5 — 3 % του βάρους του τσιμέντου. Τις απαιτήσεις για τη σωστή χρήση των υλικών αυτών καθορίζουν οι Κανονισμοί.

1.7.7 ΑΝΤΙΠΑΓΕΤΙΚΑ

Ως αντιπαγετικά πρόσθετα χαρακτηρίζονται τα υλικά των οποίων η χρήση έχει ως σκοπό την μείωση ή την άρση των δυσάρεστων επιπτώσεων του παγετού κατά την περίοδο της πήξης . Επιπλέον τα υλικά αυτά επιτρέπουν τη σκυροδέτηση σε χαμηλές θερμοκρασίες. Να σημειωθεί ότι κατά κανόνα η χρήση τους δεν έχει ως αποτέλεσμα την ταπείνωση του σημείου πήξεως 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 (CaCl_2) Έτσι δημιουργούνται μέσα στο σκυρόδεμα άπειρες μικρές κοιλότητες, οι οποίες συμβάλλουν στη διαφυγή του νερού, όταν αυτό διαστέλλεται και στην ελαστικότητα του ιστού του σκυροδέματος .Επίσης με την παρουσία ρευστοποιητικού μειώνεται η απαιτούμενη ποσότητα νερού ανάμιξης .

Οι Κανονισμοί (Γερμανικοί) επιτρέπουν τα αντιπαγετικά μόνο στο άοπλο σκυρόδεμα , ενώ τα απαγορεύουν στο οπλισμένο και στο προεντεταμένο για τον κίνδυνο της διάβρωσης του οπλισμού .

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2ο

ΕΛΑΦΡΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΑ

2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Το κεφάλαιο αυτό αναφέρεται στο άοπλο κατασκευαστικό σκυρόδεμα, του οποίου η πυκνότητα είναι αισθητά μικρότερη από αυτή του συνηθισμένου σκυροδέματος, που κυμαίνεται από 2200 έως 2600 Kgf/m³. [10]

Στις κατασκευές από σκυρόδεμα, το ίδιο βάρος αποτελεί ένα μεγάλο μέρος από το μόνιμο φορτίο που δρα πάνω στην κατασκευή, με αποτέλεσμα η μείωση της πυκνότητας του σκυροδέματος να οδηγεί σε σημαντικά πλεονεκτήματα, όπως είναι η χρήση μικρότερων διατομών και η αντίστοιχη μείωση του μεγέθους των θεμελίων.

Επιπλέον με την χρήση ελαφροσκυροδέματος κατά την φάση του καλουπάματος, απαιτείται μικρότερη πίεση αντιστήριξης απ' ότι απαιτείται στην περίπτωση του συνηθισμένου σκυροδέματος.

Σε γενικές γραμμές το ελαφροσκυρόδεμα είναι ωστόσο πιο ακριβό από το κοινό σκυρόδεμα. Επίσης η ανάμιξη, η μεταφορά και η διάστρωση του, απαιτούν περισσότερη φροντίδα από το συνηθισμένο σκυρόδεμα.

Παρ' όλα αυτά, σε πολλές περιπτώσεις κατασκευών, τα πλεονεκτήματα από την χρήση του ελαφροσκυροδέματος υπερτερούν των μειονεκτημάτων του. Έτσι παρατηρείται μια συνεχιζόμενη παγκόσμια τάση προς την χρήση περισσότερο ελαφροσκυροδέματος, καθώς επίσης και προς την κατεύθυνση της χρήσης αυτού στις νέες εφαρμογές όπως το προεντεταμένο σκυρόδεμα, τα υψηλά κτίρια, ακόμη και οι κελυφατές στέγες.

Η διάκριση των διαφόρων τύπων ελαφροσκυροδεμάτων γίνεται συχνά με βάση την πυκνότητάς τους. Το πιο συνηθισμένο εύρος πυκνοτήτων του ελα-

φροσκυροδέματος είναι μεταξύ 300 έως 1850 Kgr/m³. Είναι επίσης δυνατόν να γίνει κατάταξη του ελαφροσκυροδέματος με βάση ένα κατώτερο όριο αντοχής σε θλίψη. Στις Ηνωμένες Πολιτείες για παράδειγμα, λαμβάνεται υπόψη ότι το ελαφροσκυρόδεμα θα πρέπει να έχει αντοχή σε θλίψη, μετρούμενη σε ένα καθορισμένο πρότυπο κυλινδρικό δοκίμιο σε ηλικία 28 ημερών η οποία δεν μπορεί να είναι μικρότερη από 17 MPa. Η πυκνότητα για ένα τέτοιο τύπο σκυροδέματος δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 1840 Kgr/m³ και συνήθως κυμαίνεται μεταξύ 1400 έως 1800 Kgr/m³. [10]

2.2 ΚΑΤΑΤΑΞΗ ΤΩΝ ΕΛΑΦΡΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΩΝ

Τα ελαφροσκυροδέματα διακρίνονται σε τρεις κύριες κατηγορίες ανάλογα με την μέθοδο παραγωγής τους. [10]

Στην πρώτη κατηγορία χρησιμοποιείται ελαφρύ πορώδες αδρανές με μικρό φαινόμενο ειδικό βάρος αντί κάποιου συνηθισμένου αδρανούς του οποίου το ειδικό βάρος είναι περίπου ίσο με 2.6 – 2.8 tn/m³. Το παραγόμενο σκυρόδεμα είναι γενικά γνωστό από το όνομα του ελαφρού αδρανούς το οποίο χρησιμοποιείται. Τέτοια σκυροδέματα είναι για παράδειγμα το Περλιτομπετόν, το Ξυλομπετόν κ.α.

Η δεύτερη κατηγορία παραγωγής ελαφροσκυροδέματος βασίζεται στην δημιουργία μεγάλων κενών μέσα στην μάζα του σκυροδέματος ή του ασβεστοκονιάματος. Τα κενά αυτά πρέπει να διακρίνονται εμφανώς από τα πολύ μικρά κενά που παράγονται από την εισαγωγή του αέρα κατά την σκυροδέτηση. Τα σκυροδέματα που παράγονται με τον τρόπο αυτό, είναι γνωστά ως αεριούχα, κυτταρώδη, κυψελωτά, αφρώδη. Τέτοια σκυροδέματα είναι αντίστοιχα τα αεριομπετόν, αερομπετόν, κυψελομπετόν κ.α.

Ο τρίτος τρόπος παραγωγής ελαφροσκυροδέματος είναι με την απλή παράλειψη των λεπτών αδρανών από το μείγμα έτσι ώστε να εμφανισθεί ένας μεγάλος αριθμός κενών μέσα στην μάζα του υλικού.

Στην ουσία λοιπόν η μείωση της πυκνότητας εξασφαλίζεται σε κάθε περίπτωση με την παρουσία των κενών μέσα στα αδρανή (πορώδες) ή μέσα στην τσιμεντοκονία είτε σε κενά μεταξύ των χονδρόκοκκων αδρανών.

Είναι φανερό ότι η παρουσία τέτοιων κενών μειώνει την αντοχή του ελαφροσκυροδέματος, σε σχέση με το συνηθισμένο σκυρόδεμα, αλλά σε πολλές εφαρμογές η υψηλή αντοχή δεν είναι απαραίτητη προϋπόθεση.

2.3 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΑ ΜΕ ΕΛΑΦΡΑ ΑΔΡΑΝΗ

Το αναγκαίο χαρακτηριστικό των ελαφρών αδρανών είναι το υψηλό πορώδες τους το οποίο έχει ως αποτέλεσμα ένα χαμηλό φαινόμενο βάρος για το υλικό. Τα αδρανή αυτά μπορεί να είναι είτε φυσικά είτε τεχνητά. Μπορεί επίσης να είναι οργανικά ή ανόργανα. [10]

Η προδιαγραφή R.I.L.E.M L.C - 1, 1975 "Ορολογία ελαφρών σκυροδεμάτων" κατατάσσει τα ελαφρά αδρανή στις ακόλουθες κατηγορίες. [1]

I. Υλικά φυσικής προέλευσης χωρίς καμία επεξεργασία, όπως η κίσηρη, τα ηφαιστειακά προϊόντα κ.α.

II. Υλικά φυσικής προέλευσης ύστερα από κάποια κατεργασία, όπως ο σπογγοκέραμος, ο διογκωμένος περλίτης, ο βερμικουλίτης κ.α.

III. Βιομηχανικά υποπροϊόντα χωρίς καμία κατεργασία, όπως είναι τα οξειδία του σιδήρου των υφικαμίνων κ.α.

IV. Βιομηχανικά υποπροϊόντα ύστερα από κατεργασία, όπως είναι τα διογκωμένα οξειδία του σιδήρου το διογκωμένο γυαλί κ.α.

V. Οργανικά υλικά, όπως είναι τα πλαστικά, το ξύλο, οι φυτικές ίνες κ.α.

2.3.1 ΚΙΣΗΡΟΜΠΕΤΟΝ

Η κίσηρη είναι ένα πέτρωμα το οποίο παράγεται από την απότομη ψύξη λάβας με σύγχρονη αποβολή αερίων που περιέχονται μέσα σ' αυτή. Αποτελεί το κυριότερο και ίσως το φθηνότερο αδρανές για την παρασκευή ελαφροσκυροδέματος. Στην Ελλάδα βρίσκεται στην Θήρα (όπου λέγεται αλίση-ρας), στην Μήλο, και σε μερικά νησιά της Δωδεκάνησου (Νίσυρος, Γυαλί). [1]. Η μέγιστη πυκνότητά της κυμαίνεται μεταξύ 500 και 900 Kg/m³.

Το κισσηρομπετόν παρασκευάζεται από την κίσηρη ως αδρανές και από

τσιμεντοκονίαμα ως συνδετική ύλη. Το τσιμεντοκονίαμα μπορεί να περιέχει άμμο ασβεστολιθική ή λεπτόκοκκο υλικό από το ίδιο πέτρωμα της κίσηρης. Οι αναλογίες σύνθεσης εξαρτώνται από το σκοπό για τον οποίο προορίζεται το κισηρομπετόν, δηλαδή από το βαθμό στεγανότητας, το βάρος ή την αντοχή που επιθυμούμαι. Έτσι λοιπόν ορισμένα είδη κίσηρης που παρουσιάζουν σημαντική αντοχή φτιάχνουν ικανοποιητικό σκυρόδεμα με πυκνότητα η οποία κυμαίνεται μεταξύ 700 έως 1400 Kgr/m³ και με καλά μονωτικά χαρακτηριστικά αλλά με υψηλή απορροφητικότητα και συστολή.

Η χρόνια συστολή του κισηρομπετόν είναι γενικά μεγαλύτερη από αυτή του κοινού σκυροδέματος και κυμαίνεται μεταξύ 0.3 έως 0.8 mm/m. Η θερμοαγωγιμότητα λ είναι περίπου 0.25 – 0.40 Kcal/m.h.°C και η θερμοδιαστολή είναι περίπου $\alpha = (10 - 13) \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

Ο Πίνακας 2.1 δίνει τον συντελεστή θερμικής διαστολής σκυροδεμάτων με χονδρόκοκκα αδρανή από διάφορες προελεύσεις. [1]

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1 Γραμμικός συντελεστής θερμικής διαστολής σκυροδεμάτων με αδρανή από διάφορες προελεύσεις.

Αδρανή τύπου (σπίλικα ή χαλίκια)	Γραμμικός συντελεστής θερμικής διαστολής	
	Συντήρηση στον αέρα	Συντήρηση στον αέρα
Χαλίκια Ρήνοι	118	118
Ψαμμίτης	115	114
Οξείδια σιδήρου (σκουριά) υψικαμένων	113	119
Διαβάσης	116	99
Βασάλτης	98	95
Γρανίτης	96	96
Ασβεστόλιθος	82	86
Κίσηρη	126	108

2.3.2 ΠΕΡΛΙΤΟΜΠΕΤΟΝ

Ο περλίτης είναι ένα φυσικό ηφαιστειακό υλικό που προέρχεται από την απότομη ψύξη λάβας. Χημικά αποτελείται από οξείδια του πυριτίου και αλουμινίου σαν ένα είδος φυσικού γυαλιού. Όταν οι υαλώδεις κόκκοι θερμανθούν στους 900 έως 1200 °C λιώνουν σε μια "πυροπλαστική" κατάσταση και διογκώνονται χάρη στους υδρατμούς που παράγονται από το νερό που είναι χημικά ενωμένο με τον περλίτη. Αποτέλεσμα αυτής της διόγκωσης είναι η δημιουργία ενός κυτταρώδους υλικού με ειδικό βάρος πολύ χαμηλό που κυμαίνεται μεταξύ 30 και 240 Kgr/m³. [1], [10]

Στην Ελλάδα βρίσκεται σε μεγάλα αποθέματα στην Μήλο. Το σκυρόδεμα που παρασκευάζεται από κόκκους διογκωμένου περλίτη ονομάζεται περλιτομπετόν και έχει πολύ χαμηλή αντοχή η οποία κυμαίνεται μεταξύ 10 και 30 Kgr/cm². Παρουσιάζει υψηλή συστολή και χρησιμοποιείται κυρίως για μονωτικούς σκοπούς.

2.3.3 ΣΚΩΡΙΟΚΙΣΗΡΟΜΠΕΤΟΝ

Τα υποπροϊόντα των ψυκαμίνων που περιέχουν αργιλικά, ασβεστολιθικά, και πυριτικά υλικά όταν ψυχθούν παρουσιάζουν υαλώδη μορφή. Όταν αυτά λιώσουν στους 1600 °C μετατρέπονται με την διείδυση υδρατμών σε αφρώδη μάζα. Αυτό το στερεό πορώδες υλικό αφού περάσει μέσα από σπαστήρες αποκτά το επιθυμητό μέγεθος κόκκων. Το προϊόν αυτό ονομάζεται σκωριοκίσηρη επειδή είναι ένα είδος τεχνητής κίσηρης που παρασκευάζεται από την σκωρία των ψυκαμίνων.

Το φαινόμενο ειδικό βάρος του σωρού των κόκκων είναι μεταξύ 0,60 και 1,10 tn/m³. Οι ιδιότητες του σκωριοκίσηρομπετόν το οποίο παρασκευάζεται από την σκωριοκίσηρη είναι ανάλογες των ιδιοτήτων του κίσηρομπετόν.

2.3.4 ΣΠΟΓΓΟΚΕΡΑΜΟΜΠΕΤΟΝ

Ορισμένοι άργιλοι οι οποίοι περιέχουν οξειδία του σιδήρου όταν θερμανθούν απότομα σε θερμοκρασίες έως 1200 °C διογκώνονται μέχρι το πενταπλάσιο του αρχικού τους όγκου και αποκτούν πορώδη υφή. Η διογκωση οφείλεται στην αποσύνθεση των οξειδίων του σιδήρου και στην παραγωγή αερίων. Η άργιλος πρέπει επίσης να έχει αρκετά ιξώδη συνεκτικότητα ώστε τα αέρια αυτά να μην διασπάσουν την μάζα και διαφύγουν, αλλά να εγκλωβιστούν δημιουργώντας τον πορώδη ιστό. Το φαινόμενο βάρος του σωρού είναι μεταξύ 0,3 και 0,7 tn/m³. Το προϊόν αυτό ονομάζεται σπογγοκέραμος ή διογκωμένη άργιλος και χρησιμοποιείται σε ξένες χώρες για την παρασκευή ελαφρού σκυροδέματος. [1]

2.3.5 ΞΥΛΟΜΠΕΤΟΝ

Το ξυλομπετόν είναι αντιπροσωπευτικός τύπος σκυροδέματος με οργανικά αδρανή στο οποίο το ρόλο των αδρανών παίζουν ίνες ξύλου. Δυσκολία παρουσιάζει η πρόσφυση του ξύλου με το κονίαμα. Τα συστατικά του ξυλομπετόν είναι χονδρά τεμάχια ξύλου, τσιμέντο πόρτλαντ, άμμος, λεπτό πριονίδι και ποσότητα νερού έτσι ώστε να επιτυγχάνεται κάθιση μεταξύ 25 και 50 mm. Εάν χρησιμοποιηθεί κονίαμα με μαγνησιακό τσιμέντο η πρόσφυση είναι ικανοποιητική. Εάν χρησιμοποιηθεί κονίαμα με κοινό τσιμέντο χρειάζεται προηγουμένως επεξεργασία του ξύλου. Η επεξεργασία αυτή γίνεται με διαποτισμό των ινών του ξύλου με γαλάκτωμα από ασβέστη, υδρύαλο, χλωριούχο ασβέστιο ή και απλή τσιμεντοκονία.

Το πριονίδι που χρησιμοποιείται στην παρασκευή του ξυλομπετόν θα πρέπει να είναι καθαρό δίχως μεγάλες ποσότητες από φλούδες ξύλου διότι έτσι εμποδίζονται οι αντιδράσεις της ενυδάτωσης. Τα καλύτερα αποτελέσματα προκύπτουν με πριονίδι μεγέθους μεταξύ 6,3 και 1,18 mm. Το ξυλομπετόν παρουσιάζει πυκνότητα μεταξύ 650 και 1600 Kgr/m³. Για υλικά που θα χρησιμοποιηθούν μόνο ως μονωτικά αρκούν 150 ως 300 Kgr τσιμέντο ανά m³. [10]

Εξαιτίας της μεγάλης μετακίνησης υγρασίας, το ξυλομπετόν δεν θα

πρέπει να χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που αυτό εκτίθεται σε υγρασία.

Η ιδιοτυπία του ξυλομπετόν είναι ότι παρουσιάζει τις ίδιες περίπου αντοχές σε θλίψη και εφελκυσμό τουλάχιστον στην περιοχή των μικρών αντοχών.

Χρησιμοποιείται κυρίως σε περιπτώσεις όπου το υλικό είναι απαραίτητο να διατηρηθεί από καρφιά. Στον Πίνακα 2.2 παρουσιάζονται οι κυριότερες ιδιότητες του ξυλομπετόν. [1]

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.1 Ιδιότητες του ξυλομπετόν

Τοιμέτο kg/m^3	150 – 300	300 – 500
Φαινόμενο ειδ. βάρος t/m^3	0,6 – 0,8	0,8 – 1,2
αντοχή σε θλίψη kg/cm^2	10 – 30	30 – 120
αντοχή σε εφελκυσμό	10 – 30	30 – 70
χρόνια συστολή mm/m	" 1-3(8)	
συντελεστής θερμοαγωγιμότητας $\text{kcal/m.h}^\circ\text{C}$	0.15 – 0.30	0.30 – 0.45

2.3.6 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΑΠΟ ΔΙΟΓΚΩΜΕΝΗ ΠΟΛΥΣΤΕΡΙΝΗ

Για την παρασκευή του ελαφροσκυροδέματος είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν διάφορα συνθετικά υλικά όπως είναι η διογκωμένη πολυστερίνη. Η διογκωμένη πολυστερίνη λαμβάνεται από τον πολυμερισμό της στερίνης. Κατά την διάρκεια της διαδικασίας αυτής ενσωματώνεται ένας υδροκαρβονικός παράγοντας που βοηθά στην διόγκωση. Το προϊόν που παράγεται είναι σε μορφή μικρών σβώλων, οι οποίοι μαλακώνουν και διογκώνονται όταν θερμανθούν με ατμό μέσα σε ειδικούς θαλάμους. Οι διογκωμένοι σβώλοι είναι γενικά σφαιρικοί στο σχήμα και έχουν ειδικό βάρος όταν βρίσκονται σε χύδην ξηρά κατάσταση που κυμαίνεται μεταξύ 10 έως 40 Kgr/m^3 . Οι διογκωμένοι σβώλοι έχουν μια λεπτή, κυψελωτή, κλειστή κατασκευή. Η διαβάθμιση των διογκωμένων σβώλων οι οποίοι προέρχονται από απλή διαδικασία διόγκωσης είναι στενά περιορισμένη. Μέχρι τώρα δεν υπάρχουν ιδιαίτερες

απαιτήσεις για την διαβάθμιση ή την πυκνότητα γι' αυτό το υλικό όταν χρησιμοποιείται ως αδρανές σκυροδέματος. Είτε σε διογκωμένη είτε σε μη διογκωμένη μορφή αυτό το αδρανές θα πρέπει να εξετάζεται ως προς το ότι είναι εύλεκτο, και θα πρέπει να λαμβάνονται προφυλάξεις υπέρ της ασφάλειας πριν την εισαγωγή του στο μίγμα.

Το σκυρόδεμα που προκύπτει από διογκωμένη πολυστερίνη έχει πολύ καλές μονωτικές ιδιότητες. Επίσης ένα μίγμα με 410 kgf τσιμέντο ανά κυβικό μέτρο έχει μια πυκνότητα περίπου 550 kgf/m³ και μια αντοχή περίπου 2 MPa. [10]

Εξαιτίας της πλατιάς ανομοιομορφίας στη πυκνότητα των συστατικών του μίγματος η ανάμιξη είναι δύσκολη και ίσως απαιτείται η εισαγωγή μεγάλου όγκου αέρα. Τέλος δεν έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα επαρκείς τεχνικές σκυροδετήσης.

2.4 ΚΥΨΕΛΩΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΑ

Τα κυψελωτά σκυροδέματα δεν έχουν κατά κανόνα χονδρόκοκκα αδρανή γι' αυτό θα ήταν ακριβέστερο να ονομάζονται κυψελοκονιάματα.

Βασική ιδέα των σκυροδεμάτων αυτών είναι η δημιουργία ενός πορώδους ιστού με τον εγκλεισμό φυσαλίδων από αέρα ή αέρια μέσα στην μάζα του κονιάματος. Τα κυψελομπέτον χωρίζονται σε αεριομπετόν και αφρομπετόν ανάλογα με τον τρόπο που αναπτύσσονται οι φυσαλίδες μέσα στην μάζα του μίγματος. [1]

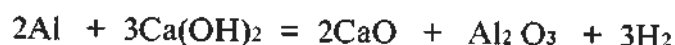
2.4.1 ΑΕΡΙΟΜΠΕΤΟΝ

Το αεριομπετόν λαμβάνεται μέσω μιας χημικής αντίδρασης που παράγει αέριο μέσα στην νωπή μάζα έτσι ώστε όταν το αέριο εγκαθίσταται μέσα σ' αυτή το υλικό που προκύπτει να περιέχει πολλές φυσαλίδες αερίου. Η τσιμεντοκονία θα πρέπει να έχει την σωστή συνοχή έτσι ώστε το αέριο να μπορεί να την διογκώνει χωρίς να διαφύγει από αυτή. Έτσι λοιπόν η ταχύ-

τητα με την οποία ελευθερώνεται το αέριο, η σύσταση της τσιμεντοκονίας και η διάρκεια της σκυροδετήσης θα πρέπει να ταιριάζουν. Ως χημικά πρόσθετα για την παραγωγή αερίου μέσα στην μάζα του σκυροδέματος χρησιμοποιούνται :

- α) Σκόνη από αλουμίνιο (Al)
- β) Σκόνη από σίδηρο (Fe)
- γ) Υπεροξείδιο του υδρογόνου μαζί με υποχλωριώδες ασβέστιο ($H_2O_2 + CaCl_2 \cdot O_2$)
- δ) Ανθρακικό ασβέστιο ($CaCO_3$)

Το πιο διαδεδομένο από τα παραπάνω πρόσθετα είναι το αλουμίνιο που μαζί με το υπεροξείδιο του ασβεστίου παράγει υδρογόνο με την ακόλουθη αντίδραση:



Οι κυριότερες ιδιότητες του αεριομετόν είναι οι ακόλουθες

- α) Αντοχή σε θλίψη 10 – 100 kgf/cm²
- β) Αντοχή σε εφελκυσμό από κάμψη 5 – 20 kgf/cm²
- γ) Χρόνια συστολή 1 – 2,5 (4,0) mm/m
- δ) Συντελεστής θερμοαγωγιμότητας $\lambda = 0,10 - 0,80$ kcal/m.h°C

2.4.2 ΑΦΡΟΜΠΕΤΟΝ

Το αφρομπέτον παράγεται με την προσθήκη μέσα στο κονίαμα ενός αφροποιήτικου παράγοντα και ενός σταθεροποιητή.

Ως αφροποιητικά χρησιμοποιούνται υλικά όπως το ρετσίνι πεύκου σαπονοποιημένο με καυστικό νάτριο και κόλλα, παραφίνη, αίμα ζώων κ.α.

Ως σταθεροποιητικά χρησιμοποιούνται υδρύαλοι, κόλλα, σκόνη από άνθρακα, στάχτη κ.α. [1]

Τα αφροποιητικά έχουν σκοπό τη δημιουργία φυσαλίδων από αέρα που πετυχαίνεται με τη μείωση της επιφανειακής τάσης της ρευστής μάζας και οι σταθεροποιητές την αύξηση της συνεκτικότητας, δηλαδή την αύξηση της αντοχής του περιβλήματος των φυσαλίδων, για την συγκράτηση του αέρα μέσα στην μάζα. Σε μερικές περιπτώσεις γίνεται εγκατάσταση προ-

σχηματισμένου αφρού που προστίθεται στη μάζα του τσιμεντοκονιάματος σε ένα συνηθισμένο αναμκτήρα.

Γενικά τα κυψελομετόν είναι κατάλληλα μόνο για πρόχυτες βιομηχανικές εγκαταστάσεις, γιατί η ακρίβεια που απαιτείται στις αναλογίες και στην μέθοδο παρασκευής είναι τέτοια που δεν επιτρέπει την εργοταξιακή παραγωγή τους.

2.5 ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΑ ΧΩΡΙΣ ΛΕΠΤΟΚΟΚΚΟ ΥΛΙΚΟ

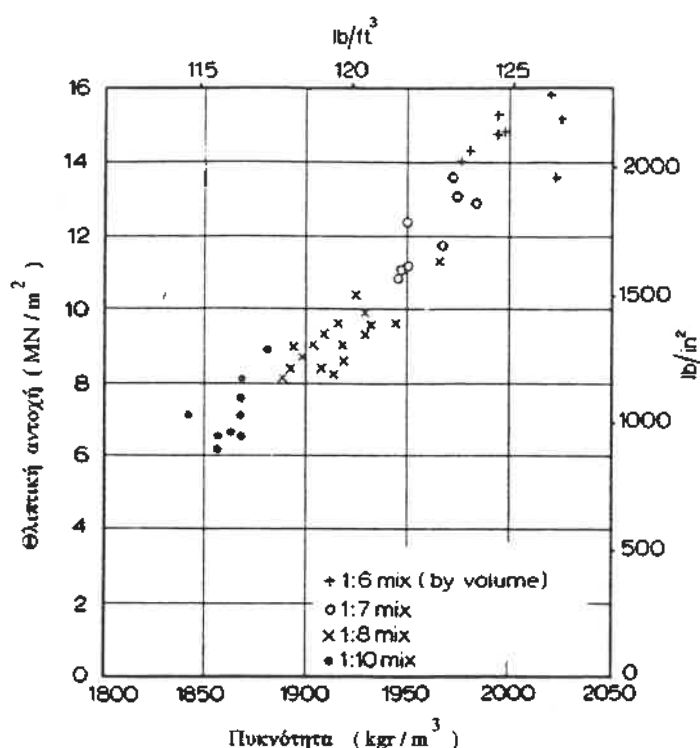
Ο τύπος αυτός του σκυροδέματος λαμβάνεται όταν παραλείπεται το λεπτόκοκκο αδρανές, δηλαδή πρόκειται για ελαφροσκυρόδεμα που περιέχει μόνο ποσότητα τσιμέντου, νερού και χονδρόκοκκου αδρανούς. Έτσι το σκυρόδεμα χωρίς λεπτόκοκκο υλικό είναι ένα προϊόν από μέρη χονδρόκοκκου αδρανούς που το καθένα περικλείεται από ένα λεπτό στρώμα τσιμεντοπολτού πάχους περίπου 1,3 mm.

Για το λόγο αυτό υπάρχουν μεγάλοι πόροι μέσα στην μάζα του σκυροδέματος που ευθύνονται για την χαμηλή αντοχή του υλικού ενώ το μεγάλο τους μέγεθος εμποδίζει την κίνηση του νερού μέσω των τριχοειδών. Αν και η αντοχή αυτού του σκυροδέματος είναι σημαντικά χαμηλότερη από την αντοχή του συνηθισμένου σκυροδέματος, αυτή η αντοχή συγκρινόμενη με το ίδιο βάρος της κατασκευής είναι επαρκής για κατασκευές μεγάλων κτιρίων.

Η πυκνότητα αυτού του τύπου σκυροδέματος εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την ογκομετρική διαβάθμιση του αδρανούς. Αφού ένα καλά διαβαθμισμένο αδρανές οδηγεί σε μια υψηλή πυκνότητα, στην περίπτωση που όλα τα τεμάχια είναι του ίδιου μεγέθους η πυκνότητα μειώνεται γεγονός που οφείλεται στο μονομέγεθος αδρανές. Το συνηθισμένο μέγεθος αδρανών που χρησιμοποιούνται είναι 9,5 — 15 mm αλλά έχουν χρησιμοποιηθεί και αδρανή διαμέτρου πάνω από 50 mm. Με φυσιολογικά αδρανή η πυκνότητα αυτού του σκυροδέματος κυμαίνεται μεταξύ 1600 και 2000 kgf/m³, αλλά κάνοντας χρήση ελαφρών αδρανών το σκυρόδεμα αυτό αποκτά βάρος το οποίο είναι περίπου στα 640 kgf/m³. Η χρήση πολύ γωνιώδους

θραυστού αδρανούς δεν συνίσταται γιατί μπορεί να δημιουργηθεί τοπική θραύση υπό την παρουσία φορτίου.

Η αντοχή του σκυροδέματος χωρίς λεπτόκοκκο υλικό κυμαίνεται μεταξύ $14 - 140 \text{ kgf/cm}^2$, και εξαρτάται κυρίως από την πυκνότητά του η οποία επηρεάζεται από την περιεκτικότητα του μίγματος σε τσιμέντο. (Σχήμα 2.1)



ΣΧΗΜΑ 2.1 Θλιπτική αντοχή σκυροδέματος χωρίς λεπτόκοκκο υλικό στις 28 ημέρες σε συνάρτηση με την πυκνότητα του κατά τη στιγμή της δοκιμής

Για κάθε δοσμένο αδρανές υπάρχει ένας βέλτιστος λόγος N/T . Ένας λόγος N/T μεγαλύτερος από το βέλτιστο θα έκανε τον τσιμεντοπολτό να ρέει μακριά από το αδρανές, ενώ με ένα χαμηλό λόγο N/T ο πολτός δεν θα ήταν αρκετά κολλώδης και δεν θα επιτυγχανόταν η κατάλληλη συμπίκνωση. Ο προσδιορισμός του βέλτιστου λόγου N/T είναι ιδιαίτερα δύ-

σκόλος αφού το μέγεθος αυτό επηρεάζεται από την απορροφητικότητα των αδρανών, αλλά σαν γενικός οδηγός θα πρέπει να λαμβάνεται σαν περιεκτικότητα νερού στο μίγμα τα 180 kgr ανά m^3 σκυροδέματος. Τότε ο λόγος N/T θα εξαρτάται μόνο από την περιεκτικότητα σε τσιμέντο για μια επαρκή κάλυψη των αδρανών, (Πίνακας 2.3). Λίγα είναι γνωστά για τις χαρακτηριστικές ιδιότητες του σκυροδέματος χωρίς λεπτόκοκκο υλικό. Τυπικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας για σκυροδέματα που παρουσιάζουν διαφορετικές αντοχές δίνονται στον Πίνακα 2.4 .

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.3 Χαρακτηριστικά στοιχεία σκυροδέματος χωρίς λεπτόκοκκο υλικό με αδρανή διαμέτρου 9.5 – 15 mm .

Λόγος αδρανή/τσιμέντο κατ' όγκο	Λόγος νερό/τσιμέντο κατά βάρος	Πυκνότητα kgr/ m^3	Θλιπτική αντοχή στις 28 ημέρες MN/ m^2
6	0.38	2020	14
7	0.40	1970	12
8	0.41	1940	10
10	0.45	1870	7

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.4 Τυπικές τιμές του μέτρου ελαστικότητας για χαρακτηριστικές τιμές θλιπτικής αντοχής .

Θλιπτική αντοχή MN/ m^2 lb/in 2		Μέτρο Ελαστικότητας GN/ m^2 10^6 lb/in 2	
4.8	700	10.3	1.5
3.4	500	9.0	1.3
2.4	350	6.9	1.0

Η συστολή αυτού του σκυροδέματος είναι σημαντικά μικρότερη από αυτή του κοινού σκυροδέματος. Μια τυπική τιμή είναι $120 \cdot 10^6$. Αυτό συμβαίνει γιατί ο τσιμεντοπολτός συμπεριφέρεται σαν ένα λεπτό στρώμα και η συστολή ξηράνσεως σε μεγάλο βαθμό συγκρατείται από τα αδρανή.

Η μετάδοση θερμότητας σε ένα σκυρόδεμα χωρίς λεπτόκοκκο αδρανές είναι ίση με το 0,6 – 0,8 εκείνης του κοινού σκυροδέματος, αλλά η πραγματική τιμή του συντελεστή θερμικής διαστολής εξαρτάται από τον τύπο του αδρανούς που χρησιμοποιείται. [10]

Λόγω της έντονης παρουσίας τριχοειδών αυτό το σκυρόδεμα έχει υψηλή αντίσταση στον παγετό. Εξαιτίας της μεγάλης απορρόφησης νερού, όταν χρησιμοποιείται για εξωτερικούς τοίχους θα πρέπει αυτοί οι τοίχοι να επενδύονται και στις δύο πλευρές. Η επένδυση αυτή έχει ως επιπλέον αποτέλεσμα τη μείωση της διαπερατότητας από τον αέρα καθώς επίσης και την μείωση της ηχοαπορρόφησης.

Ιδιαίτερη σημασία αποκτά το σκυρόδεμα αυτού του τύπου στην οδοποιία στην κατασκευή στρώσεων στραγγίσεως και στην ανάπτυξη οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα του οποίου η επιφάνεια θα είναι πορώδης.

2.6 ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΕΛΑΦΡΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Οι γενικές αρχές για το λόγο νερού προς τσιμέντο (N/T) στο σκυρόδεμα το οποίο παρασκευάζεται από ελαφρά αδρανή ισχύουν με τον ίδιο τρόπο όπως και στο κοινό σκυρόδεμα. Έτσι είναι πιθανό να ακολουθείται η συνηθισμένη διαδικασία για την εργασία μίξης όταν χρησιμοποιούνται ελαφρά αδρανή.

Ωστόσο είναι πολύ δύσκολο να προσδιοριστεί πόση ποσότητα από το ολικό νερό μέσα στο μίγμα απορροφάται από τα αδρανή, και πόση ποσότητα πραγματικά καταλαμβάνει χώρο μέσα στη μάζα του σκυροδέματος, δηλαδή αποτελεί μέρος της τσιμεντοκονίας. Η δυσκολία αυτή δεν οφείλεται μόνο στην υψηλή απορροφητικότητα νερού από τα ελαφρά αδρανή, που σε μερικές περιπτώσεις ξεπερνά το 20%, αλλά και στο γεγονός ότι η απορροφητικότητα μεταβάλλεται ευρύτατα, και σε μερικά αδρανή ίσως συνεχίζεται σε ένα μεγάλο βαθμό για πολλές ημέρες. Ο προσδιορισμός του βαθμού κορεσμού και του στεγνού χύδην φαινομένου ειδικού βάρους είναι ιδιαίτερα δύσκολος. [10]

Έτσι ο καθαρός λόγος νερού προς τσιμέντο εξαρτάται από το βαθμό

της απορρόφησης του νερού κατά την χρονική στιγμή της ανάμιξης και όχι μόνο από το βαθμό της περιεκτικότητας σε υγρασία των αδρανών. Προκύπτει λοιπόν ότι η χρήση του λόγου N/T στους υπολογισμούς του μίγματος της μελέτης σύνθεσης είναι ιδιαίτερα δύσκολη. Για το λόγο αυτό η σύγκριση είναι προτιμότερο να γίνεται σε σχέση με την περιεκτικότητα σε τσιμέντο. Ωστόσο στην περίπτωση στρογγυλών ελαφρών με καλυμμένη επιφάνεια και με σχετικά χαμηλή απορροφητικότητα η καθορισμένη μεθοδολογία για το σχεδιασμό ανάμιξης είναι κατ' ευθείαν εφαρμόσιμη.

Τα ελαφρά αδρανή που παράγονται με τεχνητά μέσα είναι συνήθως πλήρως στεγνά και ιδιαίτερα επιρρεπή στην απόμιξη. Εάν τα αδρανή είναι κορεσμένα πριν την ανάμιξη, η αντοχή του σκυροδέματος που προκύπτει είναι 5—10 % χαμηλότερη από την αντοχή του σκυροδέματος με τα ίδια αδρανή όταν αυτά είναι στεγνά, για τον ίδιο τύπο τσιμέντου και για την ίδια εργασιμότητα κατά την ώρα της σκυροδέτησης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα στεγνά αδρανή απορροφούν ένα μέρος του αρχικού νερού αναμίξεως, με αποτέλεσμα ο ενεργός (τελικός) λόγος N/T να γίνεται μικρότερος. Επιπλέον η πυκνότητα του σκυροδέματος που παράγεται από ελαφρά αδρανή είναι υψηλότερη, αλλά η ανθεκτικότητα ενός τέτοιου σκυροδέματος, ειδικά η αντοχή του στον παγετό είναι πολύ μικρή. Επίσης όταν χρησιμοποιούνται αδρανή με υψηλή απορροφητικότητα είναι δύσκολο να ληφθεί ένα επαρκώς κατεργάσιμο και ταυτόχρονα συνεκτικό μίγμα. Γενικά αδρανή με απορροφητικότητα πάνω από 10 % είναι προδιαποτισμένα.

Είναι ενδιαφέρον να σημειωθεί ότι ορισμένα ελαφρά αδρανή τα οποία είναι αρχικά ελαφρώς υγρά, συνήθως περιέχουν περισσότερο ολικό απορροφούμενο νερό μετά από μια μικρή βύθιση στο νερό, απ' ότι στεγνά αδρανή τα οποία βυθίζονται στο νερό για το ίδιο χρονικό διάστημα. Ο λόγος που συμβαίνει αυτό, πιθανό να είναι το ότι, μια μικρή ποσότητα νερού μόλις καλύψει το μόριο του αδρανούς, δεν παραμένει πάνω στους επιφανειακούς πόρους, αλλά διηθείται εσωτερικά και γεμίζει τους μικρότερους πόρους μέσα στο υλικό. Το φαινόμενο αυτό συμβάλλει στο να παραμείνουν τελικά οι επιφανειακοί πόροι ελεύθεροι από νερό και κατά την διαβροχή αυτοί οι πόροι είναι ανοιχτοί ώστε να δεχτούν ποσότητα νερού

περίπου τόσο μεγάλη, όσο και όταν το αδρανές δεν περιέχει αρχικά απορροφούμενο νερό.

2.6.1 ΑΜΕΡΙΚΑΝΙΚΟΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ

Η μέθοδος τεχνολογίας μιγμάτων σκυροδέματος του Αμερικάνικου Ινστιτούτου Σκυροδέματος A.C.I μπορεί να χρησιμοποιηθεί για αδρανή τα οποία περιέχουν οποιοδήποτε ποσοστό υγρασίας. Η μέθοδος δεν απαιτεί τον καθορισμό της απορροφητικότητας ή του ειδικού βάρους του ελαφρού αδρανούς, αλλά ούτε δοκιμαστικά μίγματα. Η πραγματική υγρασία των αδρανών θα πρέπει ωστόσο να είναι γνωστή, και να παραμένει ομοιόμορφη για όλα τα μίγματα.

Σε πολλά ελαφρά αδρανή το φαινόμενο ειδικό βάρος μεταβάλλεται με το μέγεθος. Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι δυνατόν τα λεπτότερα τεμάχια να είναι βαρύτερα από τα μεγαλύτερα. Έτσι κατά τον σχεδιασμό μιγμάτων με βάση το βάρος, το ποσοστό του λεπτότερου υλικού πρέπει να είναι υψηλότερο απ' ότι στην περίπτωση συνηθισμένου αδρανούς. Για τον προσδιορισμό της σωστής αναλογίας, ο όγκος είναι το μέγεθος που λαμβάνεται υπόψιν από κάθε τιμή κλάσματος και όχι το βάρος του, ο οποίος καθορίζει τον τελικό όγκο των κενών, και άρα τον περιεχόμενο πολτό και την εργασιμότητα του μίγματος. Ένα καλά διαβαθμισμένο αδρανές με μικρότερο όγκο κενών απαιτεί προφανώς μικρότερη ποσότητα τσιμεντοπολτού και έτσι είναι δυνατό να παραχθεί σκυρόδεμα με συγκριτικά μικρή συστολή ξηράνσεως και μικρή θερμική αγωγιμότητα. [10]

Όταν η μέγιστη διάσταση του κόκκου του αδρανούς είναι 19 mm, το λεπτόκοκκο αδρανές καταλαμβάνει το 40 έως 60 % του ολικού όγκου του αδρανούς μετρούμενο σε στεγνή χαλαρή κατάσταση. Συνήθως είναι χρήσιμο να αρχίζουμε τις δοκιμές ανάμιξης με ίσους όγκους λεπτόκοκκου και χονδρόκοκκου αδρανούς και να κάνουμε προσαρμογές στο βαθμό που χρειάζονται.

Στην περίπτωση μίγματος με υψηλό λόγο N/T (κάθιση 75 mm) δεν παρατηρείται συνοχή μεταξύ των μερών του μίγματος, και μπορεί να εμ-

φανιστεί απόμειξη είτε με διαχωρισμό του πολτού, είτε με το να επιπλουν στην επιφάνεια μεγάλα αδρανή. Με βάση την εμπειρία σε ότι αναφορά την περιεκτικότητα σε υγρασία των αδρανών και την πυκνότητα του σκυροδέματος, οι αναλογίες ανάμιξης μπορούν να βελτιωθούν. Συνήθως γίνονται τρεις δοκιμές ανάμιξης, μια για κάθε διαφορετική περιεκτικότητα σε τσιμέντο, αλλά όλες με την απαιτούμενη εργασιμότητα. Με τον τρόπο αυτό είναι δυνατόν να ληφθεί μια σχέση μεταξύ της περιεκτικότητας σε τσιμέντο και της αντοχής για δεδομένη συνοχή. Στον Πίνακα 2.5 φαίνεται μια σχέση μεταξύ της αντοχής του σκυροδέματος από ελαφρό αδρανές και της περιεκτικότητας σε τσιμέντο, αλλά οι πραγματικές τιμές για διαφορετικού τύπου αδρανή μεταβάλλονται σε μεγάλο βαθμό.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.5 Σχέση μεταξύ της θλιπτικής αντοχής ελαφροσκυροδέματος και της περιεκτικότητας σε τσιμέντο.

Θλιπτική αντοχή κυλινδρικών δοκιμίων MPa	Περιεκτικότητα σε τσιμέντο kg/m ³
14	230 – 390
21	280 – 450
28	330 – 510
34	390 – 560

Οι αναλογίες από τα διάφορα δοκιμαστικά μίγματα μπορούν να συγκριθούν με το πρώτο μίγμα που παρουσιάζει ικανοποιητική εργασιμότητα χρησιμοποιώντας ένα δείκτη ειδικού βάρους όπως ονομάζεται, που είναι ο λόγος του βάρους των στεγνών αδρανών προς το χώρο που αυτά καταλαμβάνουν. Ο χώρος αυτός είναι ο όγκος του σκυροδέματος μείων τον απόλυτο όγκο του τσιμέντου και μείων τον όγκο του νερού, συμπεριλαμβανόμενου και του απορροφούμενου νερού κατά την ανάμιξη. Δεν λαμβάνεται υπόψη η απορρόφηση του νερού που προκύπτει από την διαφορά μεταξύ του δείκτη ειδικού βάρους και του πραγματικού ειδικού βάρους. Ωστόσο για ένα δεδομένο αδρανές και για δεδομένη την περιεκτικότητα σε υγρασία

αυτού, ο όγκος του απορροφούμενου νερού κατά την διάρκεια της ανάμιξης είναι κατά προσέγγιση σταθερός. Έτσι το κλάσμα ειδικού βάρους μπορεί να χρησιμοποιηθεί σαν να επρόκειτο για πραγματικό ειδικό βάρος.

Η παραπάνω μέθοδος σχεδιασμού τροποποιήθηκε και στην νέα έκδοση ο δείκτης καθορίζεται για κάθε αδρανές, λεπτόκοκκο ή χονδρόκοκκο, με μια απευθείας μέθοδο πυκνομέτρησης. Ο καθορισμός προχωρά σε όλες τις περιπτώσεις περιεχόμενης υγρασίας που αναμένεται να συναντηθούν. Στην συνέχεια οι σχέσεις αναλογίας του μίγματος ή οι ρυθμίσεις αυτών υπολογίζονται με βάση τα αδρανή, όταν αυτά βρίσκονται στην πραγματική τους κατάσταση υγρασίας, χρησιμοποιώντας τον κατάλληλο δείκτη ειδικού βάρους και για την ποσότητα νερού που προστίθεται. Επειδή οι αριθμητικές τιμές του παλαιού και του νέου δείκτη ειδικού βάρους διαφέρουν είναι απαραίτητο να καταφεύγουμε στην πρόσφατη μέθοδο υπολογισμού.

Αυτός ο δείκτης είναι ο λόγος του βάρους του αδρανούς όπως αυτό συνίσταται μέσα στον αναμκτήρα, προς τον ενεργό όγκο που καταλαμβάνει αυτό το αδρανές. Έτσι το βάρος του αδρανούς περιλαμβάνει κάθε υγρασία απορροφούμενη ή ελεύθερη κατά την στιγμή της σκυροδέτησης.

Οι μετρήσεις πυκνομέτρησης δίνουν το δείκτη ειδικού βάρους από την σχέση:

$$S = \frac{C}{B - A + C}$$

όπου: A = Το βάρος του πυκνόμετρου με το δείγμα και γεμάτο με νερό (συνήθως μετά από 10 λεπτά βύθισης).

B = Το βάρος του πυκνόμετρου γεμάτο με νερό.

C = Το βάρος του αδρανούς στη δοσμένη φάση, βρεγμένο ή στεγνό.

Κάνοντας χρήση των δεικτών ειδικού βάρους λαμβάνουμε υπόψη το γεγονός ότι η απαίτηση στην ολική ποσότητα νερού αλλάζει ανάλογα με τις μεταβολές της περιεχόμενης υγρασίας των αδρανών κατά την στιγμή της ανάμιξης.

2.6.2 ΒΡΕΤΑΝΙΚΟΙ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΙ

Στην Βρετανική πρακτική οι διαδικασίες που χρησιμοποιούνται στο σχεδιασμό μιγμάτων ελαφροσκυροδέματος είναι όμοιες μ' αυτές για το κοινό σκυρόδεμα. Οι κανονισμοί τροποποιήθηκαν για να καλύψουν τις απαιτήσεις σ' ότι αφορά τις κοκκομετρικές διαβαθμίσεις. Το Βρετανικό Πρότυπο καθορίζει απαιτήσεις για χονδρόκοκκα αδρανή τόσο σε περίπτωση που αυτά έχουν διαφορετικά μεγέθη (διαβαθμισμένα), όσο και σε περίπτωση που αυτά αποτελούνται από κόκκους του ίδιου μεγέθους (Πίνακας 2.6). Το πρότυπο αναγνωρίζει ότι διαφορετικοί τύποι ελαφροσκυροδέματος, απαιτούν διαφορετικές διαβαθμίσεις αδρανών, και για μια συγκεκριμένη διαβάθμιση η οποία είναι κατάλληλη για την χρήση ενός τύπου ελαφρού αδρανούς, ίσως δεν είναι κατάλληλη για την χρήση κάποιου άλλου τύπου αδρανούς.

Ο λόγος του λεπτόκοκκου υλικού προς το χονδρόκοκκο για ένα ελαφρό αδρανές θα πρέπει να είναι γενικά χαμηλότερος για αδρανή τα οποία βρίσκονται στη ζώνη L.2 απ' ότι στη ζώνη L.1 (Πίνακας 2.6). Το ίδιο θα πρέπει να ισχύει επίσης και για μίγματα με υψηλότερες περιεκτικότητες σε τσιμέντο. Ο προσδιορισμός του σωστού λόγου είναι ιδιαίτερα σημαντικός, καθώς η κοκκομετρική διαβάθμιση του λεπτόκοκκου υλικού πλησιάζει το κάτω όριο της ζώνης L.1 ή το άνω όριο της ζώνης L.2.

Να σημειωθεί ότι το υλικό που διέρχεται από το κόσκινο Νο 100 αποτελεί το όριο των δύο ζωνών. Αυτό το υλικό μπορεί να είναι ωφέλιμο στην μείωση της απόμιξης, κυρίως στην περίπτωση λεπτών μιγμάτων.

Οι τιμές των Πινάκων 2.6, 2.7, 2.8 βασίζονται στο βάρος. Εξαιτίας της αύξησης του ειδικού βάρους κάθε ελαφρού αδρανούς με τη μείωση του μεγέθους του μορίου του, τα ποσοστά του λεπτόκοκκου υλικού δεν είναι τόσο υψηλά όσο είχαν αρχικά εμφανιστεί. [10]

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.6 Ζώνες διαβάθμισης λεπτόκοκκων αδρανών

Βρετανικά κόσκινα	Ποσοστό κατά βάρος διερχόμενου υλικού	
	Ζώνη διαβάθμισης L1	Ζώνη διαβάθμισης L2
9.52 mm	100	100
4.76 mm	90 – 100	90 – 100
2.40 mm	55 – 95	60 – 100
1.20 mm	35 – 70	40 – 80
600 μm	20 – 50	30 – 60
300 μm	10 – 30	25 – 40
150 μm	5 – 19	20 – 35

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.7 Όρια διαβάθμισης χονδρόκοκκου ελαφρού αδρανούς.

Βρετανικά κόσκινα	Ποσοστό κ.β διερχόμενου υλικού Ονομαστική διάμετρος διαβαθμισμένου αδρανούς			Ονομαστική διάμετρος συνήθους αδρανούς		
	19–5 mm	13–5 mm	10–3 mm	19 mm	13 mm	10 mm
38.10 mm	100	—	—	100	—	—
19.05 mm	95–100	100	—	85–100	100	—
12.70 mm	—	90–100	100	—	85–100	100
9.52 mm	25–55	40–85	80–100	0–20	0–30	85–100
4.76 mm	0–10	0–10	5–40	0–5	0–10	0–20
2.40 mm	—	—	0–15	—	—	0–5

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.8 Απαιτήσεις διαβάθμισης ελαφρών αδρανών του Αμερικάνικου Κανονισμού.

Κόσκινα ASTM	Ποσοστό κ.β διερχόμενου υλικού Ονομαστική διάμετρος διαβαθμισμένου χονδρόκοκκου υλικού.					Λεπτόκοκκο αδρανές	Ονομαστικό μέγεθος υλικού με χονδ/κο και λεπτ/κο αδρανές	
	25-13	25-5	19-5	13-5	10-2		13mm	10mm
	(mm)							
25.40mm	95-100	95-100	100	—	—	—	—	—
19.05mm	—	—	90-100	100	—	—	100	—
12.70mm	0-10	25-60	—	90-100	100	—	95-100	100
9.52mm	—	—	20-60	40-80	80-100	100	—	90-100
4.76mm	—	0-10	0-10	0-20	5-40	85-100	50-80	65-90
2.38mm	—	—	—	0-10	0-20	—	—	35-65
1.19mm	—	—	—	—	—	40-80	—	—
297μm	—	—	—	—	—	10-35	5-20	10-25
149μm	—	—	—	—	—	5-25	2-15	5-15

2.7 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΕΛΑΦΡΑ ΑΔΡΑΝΗ

2.7.1 ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ

Το σκυρόδεμα που παράγεται από ελαφρά αδρανή καλύπτει ένα σημαντικά μεγάλο πεδίο στο χώρο των κατασκευών. Χρησιμοποιώντας κατάλληλα υλικά και μεθόδους η πυκνότητα του σκυροδέματος μπορεί να κυμανθεί μεταξύ 300 και 1850 kgf/m³ ενώ η αντίστοιχη αντοχή κυμαίνεται μεταξύ 3 και 400 kgf/cm². Αντοχές πάνω από 600 kgf/cm² μπορούν να επιτευχθούν με μεγάλη περιεκτικότητα σε τσιμέντο (560 kgf/m³). Για κάθε τύπο αδρανούς, η αντοχή του σκυροδέματος αυξάνεται με την πυκνότητα, αλλά εξαρτάται από τον τύπο των αδρανών που υπάρχουν στο σκυρόδεμα, και ίσως απαιτείται ποσότητα τσιμέντου μεταξύ 240 και 400 kgf ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος. Επίσης για αντοχή περίπου ίση με 300 kgf/cm² η διακύμανση

της πυκνότητας του σκυροδέματος είναι μεταξύ 330 και 500 kg/m³. [10]

2.7.2 ΣΤΕΓΝΟ ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ

Το στεγνό ειδικό βάρος χρησιμοποιείται κυρίως με σκοπό να συσχετίσει τις φυσικές ιδιότητες των διαφόρων τύπων σκυροδέματος χαμηλής πυκνότητας. Το ειδικό βάρος είναι δυνατό να καθοριστεί με το πρότυπο ASTM C495 ή C513.

2.7.3 ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΣΤΗ ΦΑΣΗ ΤΟΥ ΚΑΛΟΥΠΩΜΑΤΟΣ

Οι προσδιορισμοί του ειδικού βάρους του υλικού μέσα στις μήτρες γίνονται κατά την διάρκεια της σκυροδέτησης σύμφωνα με την παράγραφο 7.7 του ASTM C796. Κατά την πραγματοποίηση αυτού του προσδιορισμού, το σκυρόδεμα θα πρέπει να σταθεροποιείται χτυπώντας ελαφρά τις πλευρές της μήτρας και όχι με αναμόχλευση με ράβδο. Ο λόγος του ειδικού βάρους στη φάση του καλουπώματος προς το απόλυτο στεγνό ειδικό βάρος μεταβάλλεται για διαφορετικούς τύπους ελαφροσκυροδέματος εξαιτίας των διαφορετικών απαιτήσεων σε περιεκτικότητα νερού. Το ειδικό βάρος στη φάση του καλουπώματος, για ένα συγκεκριμένο σκυρόδεμα, είναι ένα σημαντικό εργαλείο διασφάλισης ποιότητας στο εργοτάξιο για τον έλεγχο της ομοιομορφίας και της πυκνότητας.

Η παρακάτω πρακτική σχέση η οποία υιοθετείται από τον ASTM είναι μια χρήσιμη μέθοδος για τον κατά προσέγγιση υπολογισμό του στεγνού ειδικού βάρους, όταν η ποσότητα παρτίδας μίγματος, η περιεχόμενη υγρασία των αδρανών, και ο όγκος της παρτίδας του μίγματος του σκυροδέματος είναι γνωστά.

$$O_c = \frac{W_d + 1,2 \cdot W_t}{S}$$

όπου: O_c : Το κατά προσέγγιση στεγνό ειδικό βάρος (kg/m³)

Wda: Το βάρος του στεγνού αδρανούς στο μίγμα (kgr)

Wct: Το βάρος του τσιμέντου στο μίγμα (kgr)

S : Ο όγκος του σκυροδέματος που προκύπτει για το συγκεκριμένο μίγμα (m³)

1,2*Wct: Το βάρος του τσιμέντου συν το βάρος του νερού ενυδάτωσης

2.7.4 ANTOXH SE THΛIΨH

Δεν υπάρχει απλή συσχέτιση μεταξύ της αντοχής των αδρανών και της αντοχής του σκυροδέματος το οποίο παράγεται με τα δοσμένα αδρανή. Ωστόσο υπάρχει ένα ανώτατο όριο αντοχής πάνω απ' το οποίο μια αύξηση της περιεκτικότητας σε τσιμέντο προκαλεί μικρή αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος.

Ελαφρά αδρανή τα οποία είναι παρόμοια στην εμφάνιση, μπορούν να παράγουν σκυροδέματα με σημαντικές διαφορές στα τεχνικά χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες, ώστε να απαιτείται συχνά ο έλεγχος της συμπεριφοράς κάθε νέου αδρανούς.

Οι σχέσεις που παρατηρούνται μεταξύ της αντοχής σε θλίψη και της πυκνότητας του σκυροδέματος αποτελούν απαραίτητους δείκτες της ποιότητας του υλικού. Οι έλεγχοι σε θλίψη του σκυροδέματος χαμηλής πυκνότητας θα πρέπει να γίνονται σύμφωνα με τον ASTM C495. Η αντοχή συσχετίζεται με το απόλυτο στεγνό ειδικό βάρος του σκυροδέματος όπως φαίνεται στον Πίνακα 2.9 .

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.9 Τιμές αντοχής– Απόλυτο ειδικό βάρος

Απόλυτο ειδικό βάρος σκυροδέματος kgr/m ³	Κλίμακα αντοχής σε θλίψη στις 28 ημέρες MPa
320–400	0.48–0.86
400–480	0.86–1.55
480–560	1.55–2.41
560–640	2.41–3.10
640–800	3.10–5.17

Τα σκυροδέματα χαμηλής πυκνότητας με αντοχές κάτω από 0,48 ΜΡα έχουν επίδειξει ικανοποιητική συμπεριφορά για ειδικές εφαρμογές, όπως είναι οι σωλήνες αποχέτευσης και η μόνωση τοίχων, στρώσεις σε σήραγγες και ορυχεία, καθώς και η χρήση του υλικού ως υπόστρωμα σε σοβαρά έργα και έργα οδοποιίας.

2.7.5 ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Το μέτρο ελαστικότητας σκυροδέματος με ελαφρά αδρανή συσχετίζεται με την αντοχή του υλικού σε θλίψη, όπως και στο συνηθισμένο σκυρόδεμα. Επιπλέον και ο λόγος του Poisson εμφανίζεται να είναι παρόμοιος με αυτόν του συνηθισμένου σκυροδέματος. Τα μέτρα ελαστικότητας είναι περίπου 1/2 έως 3/4 αυτού για το συνηθισμένο σκυρόδεμα για την ίδια αντοχή.

Σε γενικές γραμμές τα μέτρα ελαστικότητας μεταβάλλονται με την πυκνότητα του υλικού. Επίσης ο ρυθμός αύξησης της αντοχής του ελαφροσκυροδέματος είναι όμοιος με το ρυθμό του συνηθισμένου σκυροδέματος υπό τις ίδιες συνθήκες φόρτισης. Στον Πίνακα 2.10 δίνονται τιμές του μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με την αντοχή και το στεγνό ειδικό βάρος.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.10 Τιμές του μέτρου ελαστικότητας σε σχέση με την αντοχή και το στεγνό ειδικό βάρος

Τύπος Σκυροδέματος	Στεγνό Ειδικό Βάρος kg/m^3	Αντοχή (ΜΡα)	Μέτ. Ελαστ. (GPa)
Περλιτομπετόν	320 – 640	0.52 – 3.10	0.48 – 1.72
Βερμικουλίτης	240 – 640	0.48 – 2.76	0.28 – 0.97
Κυψελομπετόν S	400 – 560	0.90 – 1.72	0.14 – 0.69
Κυψελομπετόν N	240 – 690	0.48 – 3.10	0.07 – 1.65
Σκυρ. με Πολυστερίνη	545 – 770	2.24 – 3.79	0.69 – 1.10

2.7.6 ΣΥΣΤΟΛΗ ΞΗΡΑΝΣΕΩΣ

Όλα τα σκυροδέματα που παρασκευάζονται με ελαφρά αδρανή παρουσιάζουν υψηλότερη μετακίνηση υγρασίας απ' ότι στην περίπτωση του κοινού σκυροδέματος. Τα ελαφροσκυροδέματα έχουν μια υψηλή αρχική συστολή ξήρανσεως, περίπου 5 έως 40 % υψηλότερη από αυτή του συνηθισμένου σκυροδέματος. Ωστόσο η ολική συστολή με ορισμένα ελαφρά αδρανή μπορεί να είναι ακόμα υψηλότερη. Τα σκυροδέματα που παράγονται με διογκωμένη άργιλο, σχιστόλιθο και αφρώδη σκωρία έχουν τη μικρότερη παρατηρούμενη συστολή. [10]

Λόγω της συγκριτικά χαμηλής αντοχής σε εφελκυσμό του ελαφροσκυροδέματος υπάρχει σημαντικός κίνδυνος από τις ρωγμές συστολής. Γενικά θα πρέπει να τοποθετούνται αρμοί συστολής και μαζί με κατάλληλες προφυλάξεις είναι δυνατό να αποφευχθούν προβλήματα που οφείλονται στην απώλεια νερού. Η συστολή μετά από 6 μήνες σε σχετική υγρασία 50% στους 23 °C βρίσκεται μέσα στα όρια που φαίνονται στον Πίνακα 2.11.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.11 Τιμές συστολής ξήρανσης.

Τύπος Σκυροδέματος	Συνήθης διακύμανση της συστολής στις 180 ημέρες, %
Περλιτομπετόν	0.10 – 0.30
Βερμικουλίτης	0.20 – 0.45
Κυψελομπετόν	0.30 – 0.60
Σκυρόδεμα με διογκομ. πολυστ.	0.24 – 0.60

2.7.7 ΘΕΡΜΙΚΗ ΔΙΑΣΤΟΛΗ

Το σκυρόδεμα χαμηλής πυκνότητας παρουσιάζει μεγάλο εύρος θερμικής διαστολής. Η θερμική διαστολή θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψιν από τον μελετητή σε εφαρμογές όπου η θερμοκρασία σκυροδέτησης και λειτουργίας του ελαφροσκυροδέματος μεταβάλλεται σημαντικά. Να σημειωθεί ότι συ-

γκριτικά το σκυρόδεμα με ελαφρά αδρανή έχει γενικά χαμηλότερη θερμική διαστολή απ' ότι το συνηθισμένο σκυρόδεμα. Αυτό μπορεί να δημιουργήσει προβλήματα στις κατασκευές, όταν το ελαφροσκυρόδεμα και το κοινό σκυρόδεμα χρησιμοποιούνται το ένα δίπλα στο άλλο.

Ο συντελεστής θερμικής διαστολής μεταβάλλεται ανάλογα με την πυκνότητα. Συντελεστές θερμικής διαστολής για ορισμένους τύπους σκυροδεμάτων χαμηλής πυκνότητας φαίνονται στον Πίνακα 2.12 .[12]

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.12 Τιμές συντελεστή θερμικής διαστολής για διάφορους τύπους σκυροδέματος.

Τύπος σκυροδέματος	Συντελεστής θερμικής διαστολής * 10^6 / °C
Περλιτομπετόν	7.7 - 11
Βερμικουλίτης	8.3 - 14.2
Κυψελομπετόν	9 - 12.6
Σκυρόδεμα με διογκομ. πολυστερ.	9 - 14.2

2.7.8 ΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑ

Κατά την παραγωγή ελαφροσκυροδέματος είναι απαραίτητο όλη η επιφάνεια του αδρανούς να είναι ομοιόμορφα καλυμμένη από ένα στρώμα τσιμεντοκονίας. Ωστόσο η εκτίμηση της εργασιμότητας καθώς και ο προσδιορισμός της απαιτούμενης περιεκτικότητας σε νερό δεν είναι εύκολος.

Συνήθως το εργάσιμο προσδιορίζεται μέσω της χαλάρωσης κατά τη συμύκνωση, οπότε για την ίδια εργασιμότητα, το ελαφροσκυρόδεμα παρουσιάζει μικρότερη κάθιση και λόγο συμύκνωσης από το κανονικού βάρους σκυρόδεμα. Γενικά μια κάθιση του υλικού από 50 έως 75 mm παριστάνει μια υψηλή τιμή εργασιμότητας, ενώ μια κάθιση πάνω από 75 έως 100 mm ίσως προκαλέσει απόμιξη του υλικού, με τα μεγάλα ελαφρά τεμάχια των αδρανών να αιωρούνται στην κορυφή.

Εάν κατά την στιγμή της τοποθέτησης των αδρανών στον αναμκτήρα τα

αδρανή είναι στεγνά, τότε αυτά θα απορροφήσουν πολύ γρήγορα νερό με αποτέλεσμα η εργασιμότητα του μίγματος να μειωθεί απότομα. Συνεπώς καλό θα είναι αρχικά να αναμίξουμε τα αδρανή με ποσότητα νερού ίση με το 1,5 του υπό ανάμιξη νερού και μόνο τότε να προσθέσουμε το τσιμέντο μέσα στον αναμικτήρα. Η διαδικασία αυτή παρεμποδίζει τη δημιουργία σβώλων μέσα στη μάζα του τσιμέντου καθώς και την απώλεια της κάθισης. [10]

2.7.9. ΙΚΑΝΟΤΗΤΑ ΔΙΑΤΡΗΣΗΣ

Η ικανότητα του ελαφροσκυροδέματος να διατρείται από καρφιά είναι σημαντικό πλεονέκτημα όταν για παράδειγμα η διάτρηση έχει σκοπό να συγκρατήσει τα στοιχεία της στέγης στη πλάκα. Συνήθως απαιτείται ικανότητα διάτρησης του υλικού μέσα σε 7 ημέρες από την σκυροδέτηση.

Δύο είναι οι βασικές ιδιότητες που θα πρέπει να εξετάζονται :

α) Η ικανότητα του υλικού να αναλαμβάνει το καρφί δίχως να θρυμματίζεται ή να σπάει.

β) Η ικανότητα του υλικού να κρατά το καρφί όταν το φορτίο εξώκελυσης φτάνει στα 178 N. [12]

2.7.10 ΘΕΡΜΙΚΗ ΑΓΩΓΙΜΟΤΗΤΑ

Η θερμική αγωγιμότητα K του ελαφροσκυροδέματος υπολογίζεται με βάση τις μεθόδους Guarded Hot Plate και Heat Flow Meter. Επίσης υπάρχουν εξισώσεις υπολογισμού της θερμικής αγωγιμότητας του ελαφροσκυροδέματος σε σχέση με την μεταβολή των συνθηκών υγρασίας. Οι παρακάτω σχέσεις εφαρμόζονται για στεγνό υλικό, όπου το σκυρόδεμα βρίσκεται σε υγρασιακή κατάσταση που κυμαίνεται μεταξύ 50 και 60 % της σχετικής υγρασίας και σε θερμοκρασία δωματίου.

$$\text{Στεγνό με θέρμανση } K = 0,5 * e^{0.002 * p} \quad (K = 0,072 * e^{0.00125 * p})$$

$$\text{Φυσιολογικά στεγνό } K = 0,6 * e^{0.02 * p} \quad (K = 0,087 * e^{0.00125 * p})$$

όπου: $e = H$ βάση του φυσικού λογαρίθμου ($=2.718$)

$p = H$ στεγνή πυκνότητα (kg/m^3)

2.7.11 ΑΝΤΙΣΤΑΣΗ ΣΤΗ ΦΩΤΙΑ

Ο καθορισμός της αντίστασης έναντι της φωτιάς ενός σκυροδέματος από ελαφρά αδρανή γίνεται με πρότυπο έλεγχο. Κατά τη διάρκεια του ελέγχου αυτού εξετάζεται η συμπεριφορά ενός δομικού στοιχείου από ελαφροσκυρόδεμα σ' ότι αφορά

- α) Την φέρουσα ικανότητα του στοιχείου κατά την διάρκεια της φωτιάς
- β) Την ταχύτητα μετάδοσης της θερμότητας
- γ) Την ταχύτητα μετάδοσης της φλόγας και των καυτών αερίων

Κατά κανόνα η αντίσταση σε φωτιά του σκυροδέματος από ελαφρά αδρανή είναι μεγαλύτερη από αυτή του κοινού σκυροδέματος διότι το ελαφροσκυρόδεμα έχει μικρότερη ροπή για θρυμματισμό, ο οποίος οφείλεται στην παρουσία φωτιάς. [12]

Στους παρακάτω πίνακες δίνονται ορισμένες από τις ιδιότητες των ελαφροσκυροδεμάτων.

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.13 Συνοπτικός πίνακας ιδιοτήτων ελαφρών σκυροδεμάτων

ωα	Τύπος σκυροδέματος	Φαινόμενο ειδ. βάρος t/m^3	λ $\frac{\text{kcal}}{\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C}}$	β_d $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	β_z $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	Χρόνια συστολή mm/m
1.	Κιςρομπετόν	0,6-1,8	0,25-0,40	20-220	5-50	0,3-0,80
2.	Σκυροκίςρομπετόν	1,1-1,5	—	10-200	—	—
3.	Κεραμομπετόν	1,2-1,8	—	50-200	—	—
4.	Σπογγοκεραμομπετόν	0,6-1,7	0,17-0,51	25-120	—	0,36-0,53
5.	Πελομπετόν	0,15-1,2	0,07-0,15	10-100	—	—
6.	Ξυλομπετόν	0,6-1,2	0,15-0,30	10-130	10-70	10-30
7.	Κηφελομπετόν	0,4-1,0	0,10-0,52	20-60	2-20	10-25
Ακραίες τιμές		0,15-1,8	0,07-0,51	10-220	2-70	0,3-30

ΠΙΝΑΚΑΣ 2.14 Γενικές ιδιότητες ελαφρών σκυροδεμάτων.

α/α	ΙΔΙΟΤΗΤΑ	Μονάδες	Τιμή
1.	Φαινόμενο ειδικό βάρος ελαφρά μέσα βαρέα	t/m^3	0,3 - 0,8 0,8 - 1,2 1,2 - 2,0
2.	απόλυτο ειδικό βάρος ανόργανα αδρανή οργανικά αδρανή	t/m^3	2,45 - 2,80 1,75 - 2,20
3.	Συντελεστής θερμικής διαστολής	$^{\circ}\text{C}$	$1-1,5 \times 10^{-5}$
4.	ολικό πορώδες	%	35 - 80
5.	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας	$\text{kcal/m}\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C}$	0,20 - 0,68
6.	Αντοχή σε θλίψη	kg/cm^2	20 - 500
7.	Αντοχή σε εφελκυσμό	kg/cm^2	5 - 30
8.	Μόδιος ελαστικότητας	kg/cm^2	10.000 - 150.000
9.	Χρόνια συστολή ανόργανα αδρανή οργανικά αδρανή	mm/m	0,4 - 2,0 - 6,0

ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ ΑΝΤΟΧΩΝ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

3.1 ΕΛΕΓΧΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ

3.1.1 ΓΕΝΙΚΑ

Ο πιο γνωστός έλεγχος αξιολόγησης του σκυροδέματος είναι αυτός που πραγματοποιείται από τον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής. Ορισμένοι λόγοι που κάνουν αναγκαίο τον έλεγχο αυτό είναι οι εξής :

α) Θεωρείται ότι οι περισσότερες ιδιότητες του σκυροδέματος σχετίζονται άμεσα με την θλιπτική αντοχή .

β) Αφού το σκυρόδεμα έχει πολύ μικρή εφελκυστική αντοχή χρησιμοποιείται για να φέρει μόνο θλιπτικά φορτία και για το λόγο αυτό η θλιπτική αντοχή του υλικού είναι το απαραίτητο στοιχείο για τους στατικούς υπολογισμούς .

γ) Ο στατικός υπολογισμός των κατασκευών στηρίζεται κυρίως στη θλιπτική του σκυροδέματος .

δ) Ο έλεγχος της θλίψης είναι ιδιαίτερα εύκολος να πραγματοποιηθεί . [11]

3.1.2 Η ΔΟΚΙΜΗ ΤΟΥ A.S.T.M ΓΙΑ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΑ ΔΟΚΙΜΙΑ

Είναι γεγονός ότι ο έλεγχος της θλιπτικής αντοχής είναι πολύ επιρρεπής στις μεταβολές της διαδικασίας ελέγχου . Έτσι θα πρέπει να πραγματοποιείται σύμφωνα με τους Κανονισμούς ώστε τα αποτελέσματα που προκύπτουν από διαφορετικούς εργαστηριακούς ελέγχους (ή ακόμη και μέσα στο ίδιο το εργαστήριο) να είναι συγκρίσιμα. Γι' αυτό ο έλεγχος του A.S.T.M περιγράφε-

ται με κάθε λεπτομέρεια. Το συνηθισμένο δοκίμιο που χρησιμοποιείται στις Η.Π.Α για την δοκιμή της θλίψης είναι το κυλινδρικό, με λόγο ύψους προς διάμετρο (l/d) ίσο με 2:1. Συνήθως οι διαστάσεις των δοκιμίων είναι, διάμετρος 150 mm και ύψος 300 mm. Τα δοκίμια προετοιμάζονται και ελέγχονται σύμφωνα με τις ακόλουθες διαδικασίες: [11]

3.1.2.1 ΤΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ

Τα καλούπια είναι συνήθως επαναχρησιμοποιήσιμα, φτιαγμένα από σκληρό μέταλλο, αλλά και μια χρήσης, φτιαγμένα από διαμορφωμένη λαμαρίνα ή από ενισχυμένο χαρτόνι. Οι προδιαγραφές για τα καλούπια (A.S.T.M C 470) απαιτούν αυτά να είναι φτιαγμένα από υλικά τα οποία δεν αντιδρούν με το σκυρόδεμα, να είναι υδατοστεγανά και να είναι πολύ σκληρά, ώστε να μην παραμορφώνονται υπερβολικά όταν χρησιμοποιούνται. Δυστυχώς έχει βρεθεί ότι τα καλούπια από ενισχυμένο χαρτόνι παραμορφώνονται στις χαμηλές πιέσεις, γεγονός που οφείλεται στην απορρόφηση του νερού από το χαρτόνι ή στην διαστολή του καλουπιού κατά την έκχυση του σκυροδέματος. Επίσης τα καλούπια από λαμαρίνα υφίστανται μόνιμες παραμορφώσεις που εξαρτώνται από το χρόνο χρήσης και γι' αυτό δεν συνιστώνται.

3.1.2.2 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΛΗΨΗΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Το καλούπι τοποθετείται σε επίπεδη επιφάνεια, απομονωμένη από δονήσεις. Από αντιπροσωπευτικό δείγμα του σκυροδέματος γεμίζεται το καλούπι σε στρώσεις, ο αριθμός των οποίων εξαρτάται από τον βαθμό συμπίκνωσης. Όταν η κάθιση είναι πάνω από 75 mm το σκυρόδεμα συμπυκνώνεται με ράβδισι. Όταν η κάθιση είναι μικρότερη από 25 mm το σκυρόδεμα συμπυκνώνεται με δόνηση. Για κάθιση μεταξύ των 25 mm και 75 mm τα δοκίμια συμπυκνώνονται με άλλο τρόπο. Ο λόγος εναλλακτικών μεθόδων συμπίκνωσης είναι, ότι ένα φτωχά συμπυκνωμένο δοκίμιο θα έχει μικρότερη αντοχή από ένα καλά συμπυκνωμένο. Για τα σφιχτά μίγματα απαιτείται συμπίκνωση πάντοτε με δόνηση, αφού η ρά-

βδιση δεν είναι δυνατόν να συμπυκνώσει επαρκώς τα δοκίμια . Ωστόσο παρατεταμένη δόνηση των δοκιμίων ίσως επιφέρει απόμιξη του υλικού .

Όταν το δοκίμιο πρόκειται να δονηθεί με την χρήση ράβδου, τότε το καλούπι θα πρέπει να γεμίζεται σε τρεις ίσου πάχους στρώσεις. Κάθε στρώση ραβδίζεται 25 φορές με ράβδο Φ16. Κατά την ράβδιση των άνω στρώσεων η ράβδος θα πρέπει να εισχωρεί περίπου 25 mm μέσα στην υποκείμενη στρώση.

Όταν τα δοκίμια πρόκειται να δονηθούν, τότε τα καλούπια γεμίζονται σε δύο στρώσεις ίσου πάχους. Η διαδικασία αυτή ακολουθείται είτε χρησιμοποιηθεί εσωτερική, είτε εξωτερική δόνηση. Μετά τη συμπύκνωση η άνω επιφάνεια του δοκιμίου διαμορφώνεται με μυστρί.

3.1.2.3 Η ΩΡΙΜΑΝΣΗ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Τα δοκίμια παρασκευάζονται συνήθως για τους εξής τρεις λόγους οι οποίοι είναι:

1. Να ελεγχθεί εάν το μίγμα σχεδιασμού του εργαστηρίου επιτυγχάνει την προδιαγραφόμενη αντοχή σχεδιασμού, ώστε να γίνει αποδεκτό και να γίνει ο έλεγχος ποιότητας του σκυροδέματος.
2. Να καθορισθεί πότε είναι ασφαλές, να απομακρυνθούν οι ξυλότυποι της κατασκευής.
3. Να προσδιορισθεί πότε θα πρέπει η κατασκευή να τεθεί σε λειτουργία ή πότε τα προεντεταμένα στοιχεία μπορούν να ενταθούν.

Οι συνθήκες ωρίμανσης εξαρτώνται από το σκοπό για τον οποίο φτιάχνονται τα δοκίμια.

Αν τα δοκίμια έχουν φτιαχτεί για τον πρώτο σκοπό, τότε αυτά θα πρέπει να αποθηκεύονται σε θερμοκρασία μεταξύ 16 και 27 °C . Για τις πρώτες 24 ώρες, με τέτοιο τρόπο ώστε να εμποδίζεται η απώλεια υγρασίας. Στη συνέχεια τα δοκίμια απομακρύνονται από τα καλούπια και τοποθετούνται σε χώρο σταθερής, σύμφωνα με τους κανονισμούς, υγρασίας ή σε κορεσμένο ασβεστόνερο στους $23 \pm 1,7$ °C από τη στιγμή της παρασκευής τους. Εάν τα δοκίμια φτιάχνονται με σκοπό να καθοριστεί ο χρόνος απομάκρυνσης των ξυλοτύπων, τότε αυτά τοποθετούνται κοντά στη υπό εξέταση κατασκευή και επίσης θα πρέπει να προφυλάσσονται με τον ίδιο τρόπο όπως η κατα-

σκευή. Τα δοκίμια θα πρέπει να υποβάλλονται στη δοκιμή θλίψης, πριν απομακρυνθούν οι ξυλότυποι από τη κατασκευή. Στα δοκίμια εκείνα που φτιάχνονται με σκοπό να προσδιοριστεί, πότε η κατασκευή μπορεί να λειτουργήσει, οι μήτρες θα πρέπει να αφαιρούνται την ίδια χρονική στιγμή με την απομάκρυνση των ξυλοτύπων. Αυτό γίνεται ώστε οι συνθήκες υγρασίας των δοκιμίων να είναι περίπου ίδιες με αυτές της κατασκευής. Σε μερικές περιπτώσεις, όπου απαιτείται να ταιριάζουν οι συνθήκες υγρασίας μεταξύ δοκιμίων και μελών της κατασκευής επιτρέπεται να μένουν ακάλυπτα μόνο τα άκρα των δοκιμίων.

3.1.2.4 ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ (Καπέλωμα)

Τα κυλινδρικά δοκίμια που φτιάχνονται με τους τρόπους που ήδη αναφέρθηκαν, έχουν τις επιφάνειες των άκρων τους, ιδιαίτερα την άνω επιφάνεια, τραχείες και όχι επίπεδες ή παράλληλες. Εάν τα δοκίμια ελεγχθούν σ' αυτή την κατάσταση η παρατηρούμενη αντοχή του σκυροδέματος θα είναι σημαντικά μικρότερη, γεγονός που οφείλεται στην συγκέντρωση τάσεων που αντιστοιχούν στην φόρτιση. Τα κυρτά άκρα οδηγούν σε μειωμένες τιμές αντοχής σε σχέση με τα κοίλα άκρα, διότι σ' αυτά η συγκέντρωση των αναπτυσσόμενων τάσεων είναι μεγαλύτερη. Έτσι απαιτείται τα άκρα των δοκιμίων να είναι επίπεδα με ακρίβεια 0,05mm. Ένας τρόπος για να αναπτυχθεί η επιπεδότητα των βάσεων του κυλίνδρου είναι να λειανθούν, πράγμα όμως που είναι ακριβό και χρονοβόρο. Ο πιο γνωστός τρόπος για να αναπτυχθεί αυτή η επιπεδότητα είναι να καλυφθούν τα άκρα των δοκιμίων (A.S.T.M C617) με ένα κατάλληλο υλικό. Για το σκοπό αυτό επιτρέπεται η χρήση μόνο τριών υλικών:

1. Τσιμεντοπολτός, με τον οποίο κατασκευάζεται λεπτό στρώμα στα άκρα δοκιμίων τα οποία μόλις έχουν φτιαχτεί.
2. Γυψοκονία υψηλής αντοχής.
3. Θειούχος κονία, η οποία είναι και η πιο διαδεδομένη.

Η θειούχος κονία παράγεται με θέρμανση του υλικού, στους 130 °C και στην συνέχεια έκχυση αυτού μέσα σε ελαφρώς λαδωμένα ειδικά μεταλλικά ελάσματα. Τα δοκίμια τοποθετούνται μέσα σ' αυτά τα ελάσματα με τέτοιο τρόπο, ώστε το πάχος της θειούχου κονίας να είναι περίπου 3mm. Στην συνέχεια ευθυ-

γραμμίζονται, ώστε ο άξονας του δοκιμίου να είναι κάθετος στο επίπεδο του ελάσματος και η απόκλιση αυτής της καθετότητας να είναι μικρότερη από $0,5^\circ$. Μετά από την διαμόρφωση των επιφανειών τα κυλινδρικά δοκίμια θα πρέπει να φυλάσσονται σε υγρό περιβάλλον έως την στιγμή του ελέγχου. Σε περίπτωση μιγμάτων μικρής αντοχής είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθούν για καπέλωμα και άλλα υλικά.

3.1.2.5 ΚΑΘΟΡΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ **(ASTM C 39)**

Από τη στιγμή που τα δοκίμια έχουν διαμορφωθεί κατάλληλα όπως έχει περιγραφεί παραπάνω, είναι έτοιμα για τη δοκιμή θλίψης. Οι δοκιμές μπορούν να πραγματοποιηθούν σε οποιαδήποτε, κατάλληλη όμως, μηχανή ελέγχου. Χρησιμοποιούνται δύο κατάλληλα μεταλλικά ελάσματα, ένα στερεό στο οποίο κάθε-ται το δοκίμιο και ένα σφαιρικό το οποίο τοποθετείται στο πάνω μέρος του δοκιμίου. Τα ελάσματα θα πρέπει να είναι επίπεδα με απόκλιση μικρότερη από $0,025 \text{ mm}$. Για κυλινδρικό δοκίμιο διαμέτρου 150 mm η μέγιστη διάμετρος του σφαιρικού ελάσματος είναι 254 mm . Επειδή η αντοχή εξαρτάται από την ταχύ-τητα φόρτισης, το δοκίμιο θα πρέπει να φορτίζεται με μια ελεγχόμενη ταχύτη-τα φόρτισης, η οποία κυμαίνεται μεταξύ $0,15$ και $0,34 \text{ MPa/sec}$ για υδραυλικές μηχανές ή να υποβάλλεται σε μια ταχύτητα παραμόρφωσης που έχει τιμή $1,3 \text{ mm/min}$ για μηχανικές μηχανές ως την στιγμή της θραύσης. Ως θραύση ορίζε-ται το μέγιστο φορτίο το οποίο μπορεί να αναλάβει το δοκίμιο. Στην συνέχεια καταγράφονται, το μέγιστο φορτίο και ο τρόπος αστοχίας του δοκιμίου.

3.1.3 ΑΛΛΟΙ ΕΛΕΓΧΟΙ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΤΗΣ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ **ΑΝΤΟΧΗΣ**

Ο έλεγχος του A.S.T.M που περιγράφηκε πιο πάνω, δεν είναι ο μοναδι-κός έλεγχος προσδιορισμού της θλιπτικής αντοχής που χρησιμοποιείται. Χρη-σιμοποιούνται επίσης έλεγχοι σε κυβικά και πρισματικά δοκίμια.

3.1.3.1 ΕΛΕΓΧΟΣ ΚΥΒΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Έλεγχοι κυβικών δοκιμίων πραγματοποιούνται για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής στην χώρα μας, στην Μεγάλη Βρετανία, στην Γερμανία καθώς και σε άλλες χώρες της Ευρώπης. Ο Βρετανικός Κανονισμός (BS 1881 Part 3), απαιτεί κυβικά καλούπια ακμής 150 mm, τα οποία γεμίζονται με σκυρόδεμα σε τρεις στρώσεις. Κάθε στρώση ραβδίζεται 35 φορές με τετραγωνικής διατομής ράβδο ακμής 25mm. Εναλλακτικά η συμπύκνωση του υλικού μπορεί να γίνει με δόνηση. Στην συνέχεια τα δοκίμια ωριμάζουν με παρόμοιο τρόπο όπως αναφέρθηκε πιο πάνω, με μόνη διαφορά ότι η θερμοκρασία του χώρου εναπόθεσης είναι 20 ± 1 °C.

Κατά την δοκιμή (BS 1881 : Part 4) ο κύβος τοποθετείται με τέτοιο τρόπο ώστε οι επιφάνειες του κύβου που έρχονται σε επαφή με τις επιφάνειες φόρτισης της μηχανής, να είναι αυτές που έρχονται σε επαφή με τις κάθετες πλευρές του καλουπιού. Έτσι οι επιφάνειες φόρτισης είναι κατά το δυνατόν επίπεδες ώστε να μην απαιτείται διαμόρφωση και επικάλυψη όπως στα κυλινδρικά δοκίμια. Αυτό αποτελεί το μεγαλύτερο πλεονέκτημα των κυβικών δοκιμίων. Στην συνέχεια το δοκίμιο φορτίζεται με ταχύτητα φόρτισης που η τιμή της είναι 0,25 MPa/sec ως την στιγμή της θραύσης.

Στην χώρα μας ο Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος (Κ.Τ.Σ) προβλέπει είτε την παρασκευή κυβικών δοκιμίων (ακμής 150 ή 200 mm) είτε κυλινδρικών (διαμέτρου 150mm, ύψους 300mm). Συνήθως όμως προτιμούνται τα κυβικά δοκίμια για να αποφεύγεται το καπέλωμα. Η παρασκευή και η συντήρηση των δοκιμίων διέπεται από την Μέθοδο Σ.Κ 303, ενώ ο έλεγχος αυτών σε θλίψη από τη Μέθοδο Σ.Κ 304. [2]

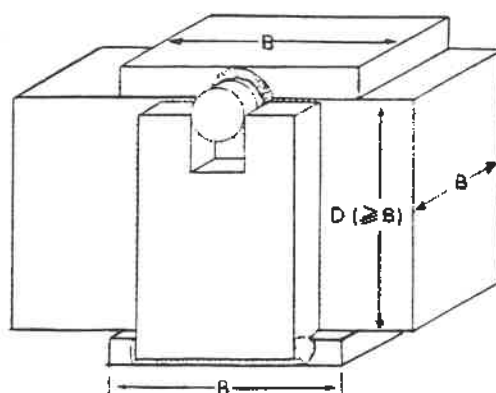
3.1.3.2 ΕΛΕΓΧΟΣ ΠΡΙΣΜΑΤΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

(Έλεγχος ισοδύναμου κύβου)

Ο έλεγχος αυτός έχει καθιερωθεί ώστε να υπολογίζεται η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος από τα σπασμένα τμήματα των δοκών που υποβάλλονται στην δοκιμή της κάμψης. Ο έλεγχος αυτός είναι κυρίως εργαστηριακός με σκοπό την

έρευνα και δεν αποτελεί έναν εναλλακτικό τρόπο προσδιορισμού της αντοχής, γιατί δεν δίνει τις ίδιες τιμές με τον έλεγχο των κυλινδρικών δοκιμών, εξαιτίας της διαφορετικής γεωμετρίας των πρισματικών δοκιμών. Επιπλέον η αντοχή δεν θα είναι η ίδια με αυτή των πρότυπων κύβων διότι ασκείται μεγάλη επίρροη από τα μέρη του δοκιμίου που προεξέχουν. Πάντως αυτός ο έλεγχος μπορεί να πραγματοποιηθεί με σκοπό να καθοριστούν οι αντοχές διαφορετικών μιγμάτων σκυροδέματος.

Το πρισματικό δοκίμιο ελέγχεται σύμφωνα με το Σχήμα 3.1. Τοποθετείται έτσι ώστε το πλάτος του να είναι μικρότερο ή τουλάχιστο ίσο με το ύψος του. Εάν το δοκίμιο προέρχεται από τετραγωνικής διατομής δοκό οι επιφάνειες φόρτισης μπορεί να είναι οι δύο απέναντι πλευρές του τετραγώνου, όπως αυτές ορίζονται από την αρχική παρασκευή. Σε αντίθετη περίπτωση οι επιφάνειες επιβολής του φορτίου θα πρέπει να είναι επίπεδες και λείες ή να διαμορφώνονται όπως περιγράφηκε προηγουμένως. Η αντοχή καθορίζεται από την εσωτερική περιοχή που ορίζουν τα δύο ελάσματα. Επειδή ο έλεγχος αυτός βασικά εφαρμόζεται σε δοκούς τετραγωνικής διατομής, συχνά αναφέρεται ως "έλεγχος ισοδύναμου κύβου". Μια παρόμοια διαδικασία ελέγχου περιγράφεται και στον Βρετανικό Κανονισμό (BS 1881. Part 4).



ΣΧΗΜΑ 3.1 Συσκευή κατάλληλη για την ευθυγράμμιση επίπεδων μεταλλικών ελασμάτων.

3.1.4 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗΝ ΜΕΤΡΟΥΜΕΝΗ ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ

Οι έλεγχοι της θλιπτικής αντοχής, όπως περιγράφηκαν πιο πάνω, φαίνονται να είναι αλάνθαστοι. Δυστυχώς όμως τα αποτελέσματα τα οποία προκύπτουν επηρεάζονται σημαντικά από ένα μεγάλο αριθμό παραγόντων. Εάν πρόκειται να ερμηνεύσουμε τα μεγέθη της θλιπτικής αντοχής, που προκύπτουν από τις πρότυπες διαδικασίες ελέγχου, είναι απαραίτητο να εξετάσουμε με κάθε λεπτομέρεια, τους παράγοντες αυτούς.

3.1.4.1 Η ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΩΝ ΤΑΣΕΩΝ ΣΤΑ ΔΟΚΙΜΙΑ

Ο έλεγχος σε θλίψη θεωρεί ότι εφαρμόζεται καθαρή, μονοαξονική θλίψη. Ωστόσο αυτό δεν ισχύει πλήρως, διότι αναπτύσσεται τριβή μεταξύ των επιφανειών του δοκιμίου και των χαλύβδινων πλακών της μηχανής. Αυτή η δύναμη τριβής εμφανίζεται εξαιτίας του γεγονότος, ότι το μέτρο ελαστικότητας και ο λόγος του Poisson είναι διαφορετικός για το σκυρόδεμα και το μέταλλο. Η εγκάρσια παραμόρφωση των μεταλλικών πλακών είναι πολύ μικρότερη από την εγκάρσια διαστολή των άκρων του δοκιμίου, εάν αυτά ήταν ελεύθερα να κινηθούν. Οι εγκάρσιες παραμορφώσεις της πλάκας της μηχανής και του δοκιμίου δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις:

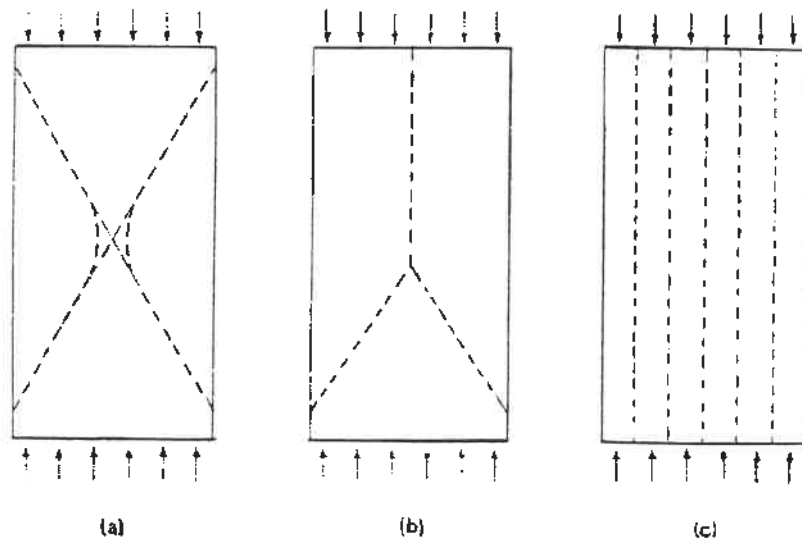
$$\text{Πλάκα:} \quad \varepsilon_{\pi\lambda} = \mu_{\pi\lambda} * \frac{\sigma_1}{E_{\pi\lambda}}$$

$$\text{Δοκίμιο:} \quad \varepsilon_{\delta} = \mu_{\delta} * \frac{\sigma_1}{E_{\delta}}$$

Η εγκάρσια παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη στο δοκίμιο όταν $(\mu/E)_{\delta} > (\mu/E)_{\pi\lambda}$ ενώ είναι μεγαλύτερη στην πλάκα όταν $(\mu/E)_{\delta} < (\mu/E)_{\pi\lambda}$. Οι τιμές του λόγου μ/E για σκυρόδεμα με συνήθη αδρανή κυμαίνονται μεταξύ $3,7$ έως $14,5 * 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{kgf}$ ενώ για σκυρόδεμα με ελαφρά αδρανή κυ-

μαίνονται μεταξύ $7,5$ έως $28,6 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2 / \text{kgf}$. Για τους χάλυβες των μηχανών θραύσης η τιμή του λόγου μ / E ισούται με $1,6 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2 / \text{kgf}$. [9]

Έτσι, μέσω της τριβής, οι μεταλλικές πλάκες συντελούν στη συγκράτηση της πλευρικής διαστολής των άκρων των δοκιμίων και συνιστούν μια πλευρική πίεση συγκράτησης κοντά στα άκρα του δοκιμίου. Αυτή η πίεση συγκράτησης (η οποία συνιστά επίσης διατμητικές τάσεις) έχει την μεγαλύτερη τιμή της ακριβώς στα άκρα του δοκιμίου, ενώ μειώνεται αναλογικά και μηδενίζεται σε μια απόσταση από κάθε άκρο ίση περίπου με $(\sqrt{3} / 2) \cdot d$, όπου d η διάμετρος του δοκιμίου. Η ακριβής μορφή της κατανομής των τάσεων εξαρτάται από τον τρόπο επαφής του δοκιμίου με τις μεταλλικές πλάκες για κάθε συγκεκριμένο έλεγχο. Η εκδήλωση αυτής της πλευρικής πίεσης συγκράτησης οδηγεί στην εμφάνιση άθραυστων κώνων σκυροδέματος στα δοκίμια που ελέγχονται σε τάση κοντά στην τάση θραύσης, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2α. Έτσι σε ένα πρότυπο κυλινδρικό δοκίμιο με λόγο $l/d = 2$, μόνο ένα κεντρικό τμήμα του κυλίνδρου βρίσκεται υπό κεντρική θλίψη, ενώ το υπόλοιπο υποβάλλεται σε τριαξονική καταπόνηση. Το αποτέλεσμα αυτής της συγκράτησης των άκρων, είναι η εμφάνιση υψηλότερης αντοχής από την "πραγματική" του δοκιμίου.



ΣΧΗΜΑ 3.2 Τυπικές μορφές αστοχίας κυλινδρικών δοκιμίων σκυροδέματος σε θλίψη : α) Διατμητική αστοχία β) Συνδιασμός διατμητικής αστοχίας και διάρρηξης γ) Διάρρηξη

Η παρατηρούμενη τάση αυξάνεται όσο αυξάνεται ο σχετικός όγκος του δοκιμίου, που υποβάλλεται σε πλευρική συγκράτηση. Αυτό εξηγεί τις υψηλότερες αντοχές που παρουσιάζουν τα κυλινδρικά δοκίμια με λόγο l/d μικρότερο από 2. Επίσης το γεγονός αυτό εξηγεί και το ότι τα κυβικά δοκίμια εμφανίζουν υψηλότερες αντοχές απ' ότι τα κυλινδρικά, πράγμα που οφείλεται στο ότι αυτά δεν είναι αρκετά υψηλά, για να μηδενιστεί η τάση που εμφανίζεται στα άκρα των δοκιμίων. Για μια δεδομένη γεωμετρία, όσο υψηλότερη είναι η τάση συγκράτησης των άκρων τόσο μεγαλύτερη είναι η παρατηρούμενη θλιπτική αντοχή. Αντίστροφα θα πρέπει να σημειωθεί, ότι αν τοποθετηθεί λιπαντικό (ή μαλακό λάστιχο) μεταξύ των άκρων των δοκιμίων και των μεταλλικών πλακών ώστε να μηδενιστεί η τριβή, η ροή αυτών των υλικών προς το εξωτερικό υπό την επιβολή της πίεσης, θα αυξήσει την πλευρική εφελκυστική δύναμη στα άκρα των δοκιμίων. Έτσι θα μειωθεί η αντοχή και τα δοκίμια θα αστοχήσουν από κατακόρυφη διάρρηξη.

Σε ένα περισσότερο θεωρητικό επίπεδο, δεν είναι γνωστά τα πάντα όσο αναφορά τον τρόπο αστοχίας του σκυροδέματος σε θλίψη. Αφού η θλίψη τείνει να συμπίεσει τα άτομα και τα μόρια του υλικού, το ένα κοντά στο άλλο, είναι δύσκολο να φανεί πως η ασθενής θλίψη μπορεί να οδηγήσει στην αστοχία. Σε μια δοκιμή θλίψης αναπτύσσονται επίσης δευτερεύουσες εφελκυστικές τάσεις στο δοκίμιο, σχηματίζοντας γωνίες με τον άξονα του δοκιμίου. Επειδή το σκυρόδεμα δεν μπορεί να αναλάβει εφελκυστικές τάσεις, αυτές μπορούν να δημιουργήσουν ρωγμές και να οδηγήσουν το δοκίμιο στην αστοχία. Έχει προταθεί να θεωρείται ως αστοχία του σκυροδέματος σε εφελκυσμό, όταν στο υλικό αναπτύσσονται οριακές παραμορφώσεις που κυμαίνονται από 0,0001 έως 0,0002. Για το κοινό σκυρόδεμα του οποίου ο λόγος του Poisson είναι περίπου 0,2 αυτές οι πλευρικές εφελκυστικές παραμορφώσεις είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν σε τελείως χαμηλά θλιπτικά φορτία, και αυτό είναι το αίτιο της αστοχίας όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2c. Αυτός είναι ίσως ο φυσικός τρόπος αστοχίας κατά την ασθενή θλίψη. Οι αναπτυσσόμενες διατμητικές τάσεις που οφείλονται στην συγκράτηση των άκρων, μπορούν να οδηγήσουν σε διατμητική θραύση του δοκιμίου, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.2a. [11]

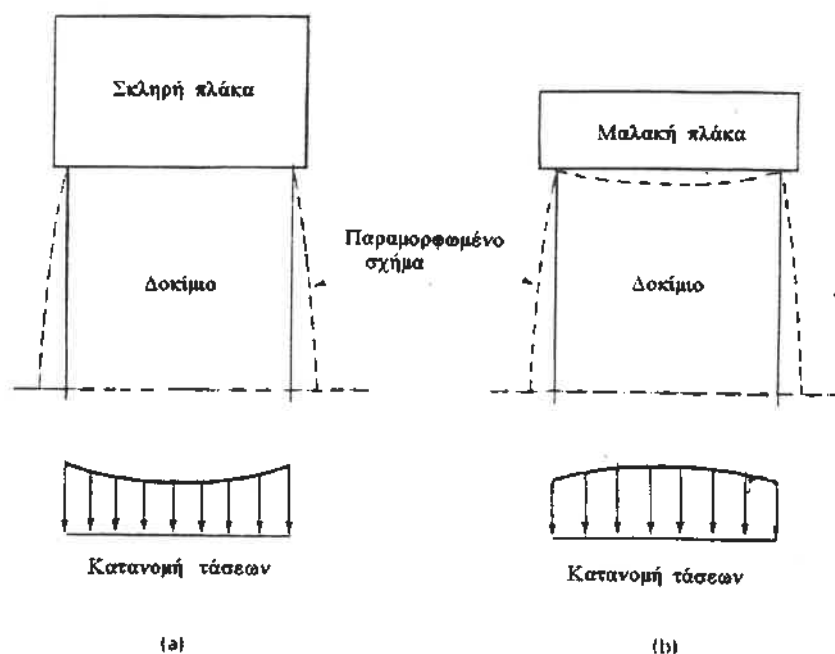
Εφόσον δεν είναι δυνατόν να αποφευχθούν οι τάσεις συγκράτησης των άκρων, είναι φανερό ότι η αστοχία επέρχεται από ένα συνδυασμό διατμητικών

και εφελκυστικών δυνάμεων όπως φαίνονται σχηματικά στο Σχήμα 3.2b.

3.1.4.2 Η ΜΗΧΑΝΗ ΘΡΑΥΣΗΣ

Όσο επίπεδα και αν είναι τα άκρα του δοκιμίου, θα πρέπει να είναι παράλληλα μεταξύ τους και κάθετα στον άξονα του δοκιμίου. Επειδή αυτό είναι ιδιαίτερα δύσκολο να γίνει, χρησιμοποιείται μια σφαιρική άρθρωση ώστε μια μικρή απόκλιση να μην επηρεάζει την αντοχή. Ο A.S.T.M C 39 καθορίζει ότι η σφαιρική κεφαλή θα πρέπει να λαδώνεται με συμβατικό λάδι, έτσι ώστε όταν αυτή βρίσκεται σε επαφή με το δοκίμιο, αυτό να μην στρέφεται. Μεταβάλλοντας την ποσότητα του λαδιού πάνω στην μεταλλική κεφαλή μεταβάλλεται και η μετρούμενη αντοχή του δοκιμίου.

Επίσης είναι δυνατόν διαφορετικοί τύποι μεταλλικών κεφαλών να οδηγούν σε διαφορετικά αποτελέσματα. Το Σχήμα 3.3 δείχνει τα αποτελέσματα από την χρήση "σκληρών" ή "μαλακών" πλακών (δηλαδή πλακών διαφορετικής ακαμψίας) στην παραμόρφωση του δοκιμίου, αφού ακόμη και οι μεταλλικές πλάκες είναι δυνατόν να καμφθούν σε υψηλές τιμές φόρτισης.



ΣΧΗΜΑ 3.3 Ιδανική παραμόρφωση δοκιμίου και κατανομή των τάσεων για
α) "σκληρά" και β) "μαλακά" μεταλλικά ελάσματα.

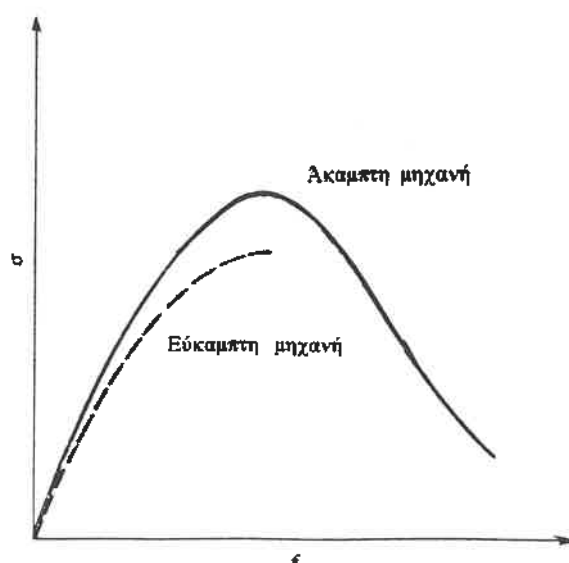
Στις σκληρές πλάκες (Σχήμα 3.3a) η τάση θα είναι μεγαλύτερη στις άκρες του δοκιμίου . Αντίθετα στις μαλακές πλάκες η τάση θα είναι μεγαλύτερη στο κέντρο του δοκιμίου (Σχήμα 3.3b) . [11]

Ακόμη ο τύπος της μηχανής που χρησιμοποιείται για την δοκιμή της θλίψης έχει σημαντική επίδραση στις της αντοχής. Οι μηχανές δοκιμών μπορούν να καταταγούν σε δύο κύριες κατηγορίες :

- α) Οι σκληρές (πολύ άκαμπτες) μηχανές.
- β) Οι μαλακές (λιγότερο άκαμπτες) μηχανές .

Σε μια άκαμπτη μηχανή, η μεταλλική κεφαλή δεν ακολουθεί τις γρήγορες παραμορφώσεις του δοκιμίου. ενώ σε μια εύκαμπτη η κεφαλή ακολουθεί με τον ίδιο τρόπο αυτές τις παραμορφώσεις .

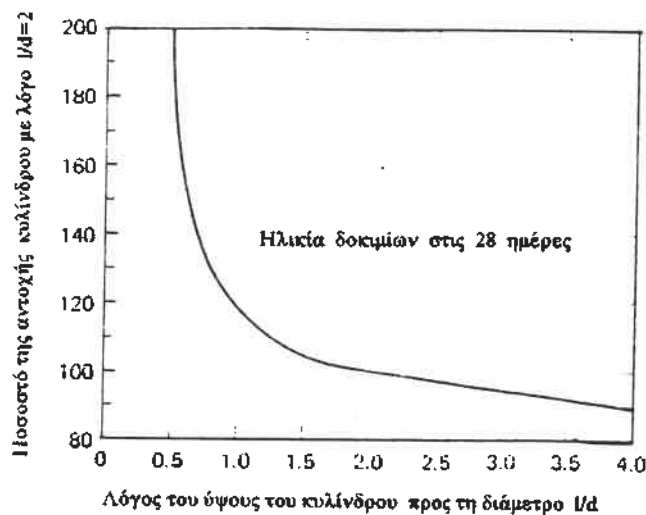
Ενώ οι μηχανές δοκιμών είναι είτε άκαμπτες, είτε εύκαμπτες η σχετική ακαμψία μπορεί να επιφέρει μεγάλες διαφορές στις μετρήσεις. Στις εύκαμπτες μηχανές η αποθηκευμένη ενέργεια της μηχανής απελευθερώνεται, όταν το δοκίμιο αρχίζει να αστοχεί . Αυτή η πρόσθετη ενέργεια προκαλεί μεγαλύτερες ρωγμές και αστοχία στα χαμηλά φορτία. Αντίθετα οι άκαμπτες μηχανές δεν ελευθερώνουν τόσο εύκολα την αποθηκευμένη τους παραμορφωσιακή τους ενέργεια τόσο εύκολα. Τα αποτελέσματα των δύο τύπων μηχανών φαίνονται στο Σχήμα 3.4 .



ΣΧΗΜΑ 3.4 Επιρροή της ακαμψίας της μηχανής εγέγχου στις καμπύλες τάσεων — παραμορφώσεων ($\sigma - \epsilon$) του σκυροδέματος .

3.1.4.3 Η ΕΠΙΡΡΟΗ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ h/d

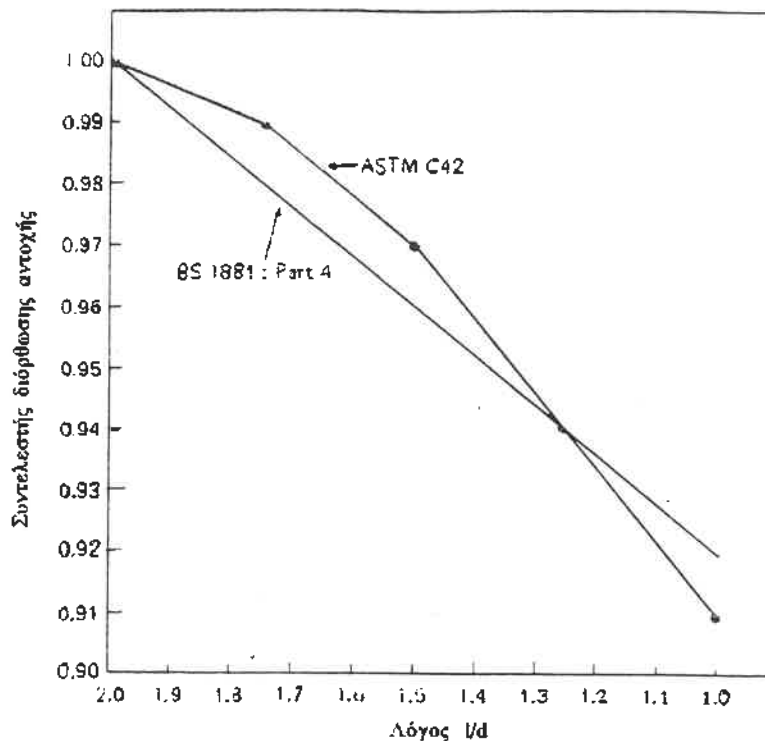
Το πρότυπο κυλινδρικό δοκίμιο έχει λόγο ύψους προς διάμετρο ίσο με 2. Έχει βρεθεί, ότι όταν χρησιμοποιούνται δοκίμια με διαφορετικό λόγο h/d , οι διαφορές στην τιμή της αντοχής οφείλονται στην επιρροή των άκρων του δοκιμίου, όπως έχει αναφερθεί. Ο γενικός τρόπος επίδρασης του λόγου h/d στην αντοχή φαίνεται στο Σχήμα 3.5.



ΣΧΗΜΑ 3.5 Σχέση ανάμεσα στο λόγο h/d δοκιμίου σκυροδέματος και της θλιπτικής αντοχής.

Πάντως το ακριβές σχήμα της καμπύλης εξαρτάται από τον τύπο του σκυροδέματος και την έκταση του φαινομένου των άκρων. Επίσης έχει βρεθεί ότι τα υψηλής αντοχής σκυροδέματα επηρεάζονται λιγότερο, από τις μεταβολές της γεωμετρίας των δοκιμών. Η επίδραση του λόγου h/d είναι βασικά σημαντικότερη σε ελέγχους που γίνονται σε πυρήνες από σκληρυμένο σκυρόδεμα, όπου ο λόγος h/d είναι συχνά μικρότερος από 2. Σε αυτή την περίπτωση συστήνονται συντελεστές διόρθωσης σύμφωνα με τους A.S.T.M C 42, BS 1881, Part 4 (Σχήμα 3.6), ώστε τα αποτελέσματα από δοκίμια με διαφορετικό λόγο

h/d να συγκρίνονται. Εάν ο λόγος h/d είναι μεγαλύτερος από 2 το δοκίμιο, μπορεί να κοπεί στο απαιτούμενο μέγεθος πριν τον έλεγχο. Ανάλογοι συντελεστές διόρθωσης σε σχέση με τις τιμές του λόγου h/d προβλέπονται και από το Ελληνικό Πρότυπο ΕΛΟΤ 344.

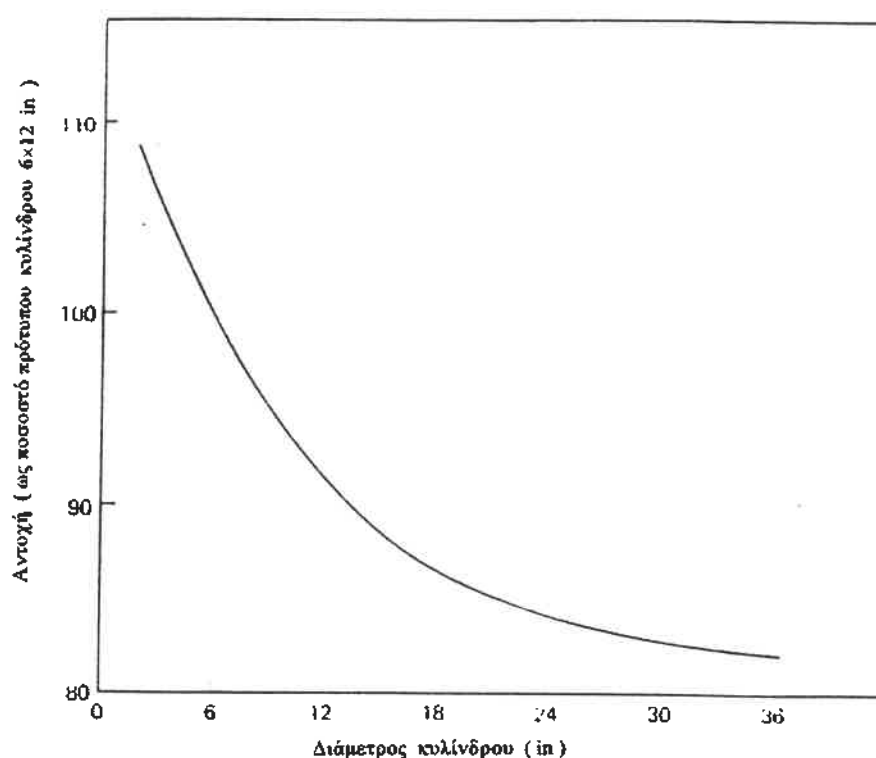


ΣΧΗΜΑ 3.6 Συντελεστής διόρθωσης για κυλινδρικά δοκίμια με λόγους h/d μικρότερους από 2.0. Οι τιμές μπορούν να εφαρμοστούν σε κοινό σκυρόδεμα και για αντοχές μεταξύ 2000 – 6000 lib/in^2 .

3.1.4.4 Η ΓΕΩΜΕΤΡΙΑ ΤΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Εφόσον η διαφορετική γεωμετρία των δοκιμίων (κυλινδρικά, κυβικά, πρισματικά) δίνει διαφορετικά αποτελέσματα για την αντοχή του σκυροδέματος, τίθεται το ερώτημα ποιο σχήμα είναι το καλύτερο. Βασικά οι κύβοι είναι ευκολότεροι κατά την δοκιμή, γιατί δεν απαιτούν διαμόρφωση των επιφανειών. Συνήθως όμως προτιμούνται οι κύλινδροι παρά οι κύβοι, γιατί αποδίδουν καλύτερα

την αντοχή του σκυροδέματος. Αλλά όπως γνωρίζουμε τα μικρά δοκίμια δεν αποδίδουν πλήρως την αντοχή του σκυροδέματος που χρησιμοποιείται στις κατασκευές. Δίνουν μόνο αντιπροσωπευτικά δεδομένα. Έτσι δεν παίζει ρόλο ποια γεωμετρία δοκιμίου επιλέγεται, εφόσον η δοκιμή γίνεται σύμφωνα με τους Κανονισμούς. Αν και ο λόγος της αντοχής του κύβου προς την αντοχή του κυλίνδρου μειώνεται όσο αυξάνεται η αντοχή του σκυροδέματος, συχνά θεωρείται ότι η αντοχή του κύβου είναι περίπου 1,25 φορές μεγαλύτερη της αντοχής του κυλίνδρου, φτιαγμένο από το ίδιο σκυρόδεμα.



ΣΧΗΜΑ 3.7 Επιρροή του μεγέθους του κυλινδρικού δοκιμίου με σταθερό λόγο $l/d = 2.0$ στην θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.

Τόσο η αντοχή όσο και η μεταβολή της αντοχής του σκυροδέματος μειώνονται, όσο το μέγεθος του δοκιμίου αυξάνεται. Αυτό γενικά εξηγείται από την θεωρεία των "ασθενέστερων δεσμών". Γι' αυτό θεωρούμε ότι η αντοχή του σκυροδέματος σε ένα δοκίμιο κυριαρχείται από το ασθενέστερο στοιχείο που περιέχει το υλικό. Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του δοκιμίου, τόσο πε-

ρισσότερο πιθανό είναι να περιέχει ένα στοιχείο το οποίο θα αστοχήσει σε ένα (δεδομένο) χαμηλό φορτίο. Πάντως όσο το μέγεθος του δοκιμίου αυξάνει, η διαφοροποίηση των κατανομών των ατελειών που υπάρχουν μέσα σε κάθε δείγμα, γίνεται μικρότερη και έτσι η μεταβλητότητα μειώνεται στο δείγμα αυτό. Το Σχήμα 3.7 δείχνει την μεταβολή της αντοχής κυλινδρικών δοκιμίων, για λόγο $h/d = 2$ αλλά με διαφορετικές διαμέτρους.

3.1.4.5 Η ΤΑΧΥΤΗΤΑ ΦΟΡΤΙΣΗΣ

Γενικά όσο μεγαλύτερη είναι η ταχύτητα φόρτισης, τόσο μεγαλύτερη προκύπτει η μετρούμενη αντοχή. Οι λόγοι που συμβαίνει δεν είναι πλήρως ξεκάθαροι. Ίσως οφείλεται στο γεγονός, ότι οι αργοί ρυθμοί φόρτισης επιτρέπουν την δημιουργία περισσότερων ρωγμών, οδηγώντας έτσι το υλικό στο σχηματισμό μεγαλύτερων ρωγμών, με μικρότερα φορτία θραύσης. Από την άλλη μεριά, ίσως οι μικρές ταχύτητες φόρτισης επιτρέπουν τη δημιουργία μεγαλύτερου ερπυσμού, ο οποίος αυξάνει την παραμόρφωση για ένα δεδομένο φορτίο. Όταν το υλικό φτάνει στην οριακή τιμή παραμόρφωσης, τότε επέρχεται η αστοχία. Με παρόμοιο, τρόπο επιδρά και η παρατηρούμενη ταχύτητα φόρτισης στην συμπεριφορά του υλικού κατά την αστοχία, όπως φαίνεται και στο Σχήμα 3.8. Φυσικά, όταν απαιτείται τα αποτελέσματα να είναι συγκρίσιμα, η ταχύτητα φόρτισης στην πράξη θα πρέπει να παραμένει μέσα σε εντελώς στενά όρια.

3.1.4.5 Η ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΗ ΥΓΡΑΣΙΑ

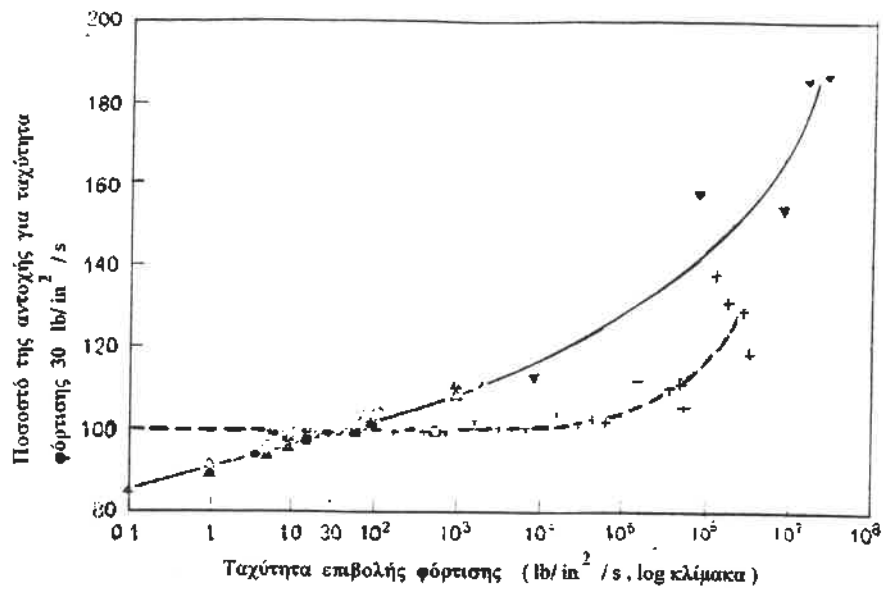
Πολλοί κανονισμοί σκυροδέματος όπως ο A.S.T.M C 39 απαιτούν το σκυρόδεμα να παραμένει και να ελέγχεται σε κορεσμένη φάση. Έχει βρεθεί ότι ένα σκυρόδεμα που έχει στεγνώσει παρουσιάζει μια αύξηση της αντοχής του. Οι λόγοι γι' αυτό δεν είναι απόλυτα κατανοητοί. Ίσως έχει να κάνει με την αλλαγή της πλευρικής τριβής και της συνοχής σε μικροσκοπική κλίμακα, αφού η υγρασία ίσως να λειτουργεί σαν λιπαντικό ανάμεσα στα μόρια του σκυροδέματος, επιτρέποντας τους να ολισθαίνουν το ένα σε σχέση με το άλλο πιο εύκολα κατά την διάτμηση. Η χαμηλή τιμή της αντοχής του βρεγμένου

σκυροδέματος, μπορεί να οφείλεται στην ανάπτυξη εσωτερικών πιέσεων στους πόρους καθώς εφαρμόζεται το φορτίο. Σε ένα στεγνό δοκίμιο η αύξηση της αντοχής είναι σχεδόν 10 έως 15 %. Αυτή η αύξηση της αντοχής φαίνεται να είναι λογική καθώς μια νέα βύθιση των δοκιμίων στο νερό, θα οδηγούσε το σκυρόδεμα στην αρχική αντοχή του.

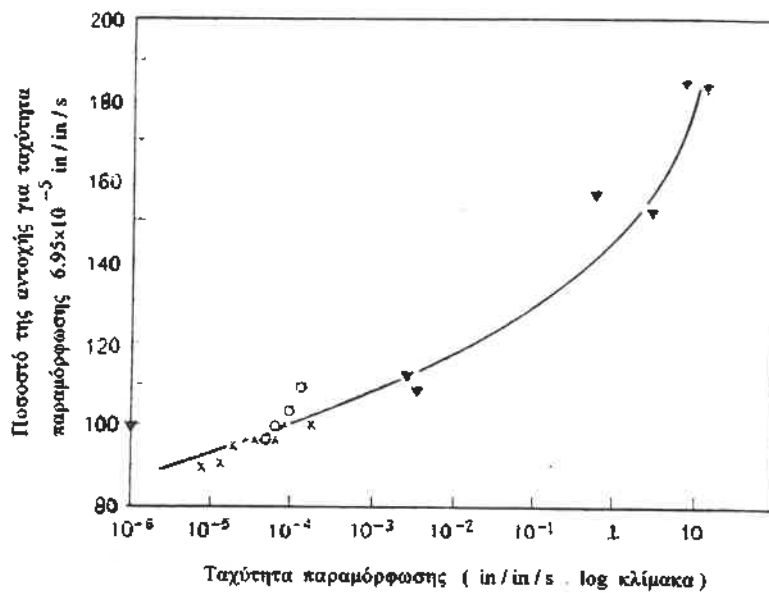
Πάντως τα πειραματικά δεδομένα είναι κάπως αντιφατικά ιδιαίτερα στις εφελκυστικές και στις καμπτικές αντοχές. Αφού το σκυρόδεμα έχει μικρό βαθμό απορροφητικότητας και στεγνώνει από τα έξω προς τα μέσα, είναι ιδιαίτερα δύσκολο να πετύχουμε ένα τελείως "στεγνό" σκυρόδεμα ή ένα πλήρως "επαναδιαποτισμένο" υλικό. Έτσι ο βαθμός στεγνότητας εξαρτάται από το μέγεθος και το σχήμα του δοκιμίου. Το πολύ γρήγορο στέγνωμα έχει ως αποτέλεσμα την δημιουργία ρωγμών, λόγω εφελκυσμού, που οφείλεται στο ανομοιόμορφο στέγνωμα (και επιπλέον στην διαφορά της συστολής ξηράνσεως) του δοκιμίου. Οι ρωγμές αυτές δεν επηρεάζουν την θλιπτική αντοχή, αλλά μειώνουν την εφελκυστική και την καμπτική αντοχή του υλικού. Αντίθετα στο αργό στέγνωμα οι ρωγμές περιορίζονται, ενώ αυξάνονται οι καμπτικές και εφελκυστικές αντοχές του υλικού. Η επίδραση της υγρασίας στην αντοχή έχει ιδιαίτερη σημασία κατά τον έλεγχο πυρήνων σκυροδέματος. Ο A.S.T.M C 42 απαιτεί, αυτοί οι πυρήνες να βυθίζονται στο νερό για τουλάχιστον 40 ώρες πριν τον έλεγχο.

3.1.4.7 Η ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ΚΑΤΑ ΤΟΝ ΕΛΕΓΧΟ

Για κάποιους λόγους οι οποίοι δεν είναι πλήρως γνωστοί, η θερμοκρασία του δοκιμίου κατά την ώρα του ελέγχου επηρεάζει την αντοχή όπως αυτή φαίνεται στο Σχήμα 3.9. Οι υψηλές θερμοκρασίες την ώρα του ελέγχου οδηγούν σε χαμηλές αντοχές ακόμα και για σκυροδέματα τα οποία ωρίμασαν σε πρότυπες συνθήκες. Η επίδραση αυτή μπορεί οφείλεται κατά ένα μεγάλο μέρος στην απώλεια υγρασίας του δοκιμίου και στη συνεπαγόμενη ρηγμάτωση, όταν αυτό υποβάλλεται σε υψηλές θερμοκρασίες.

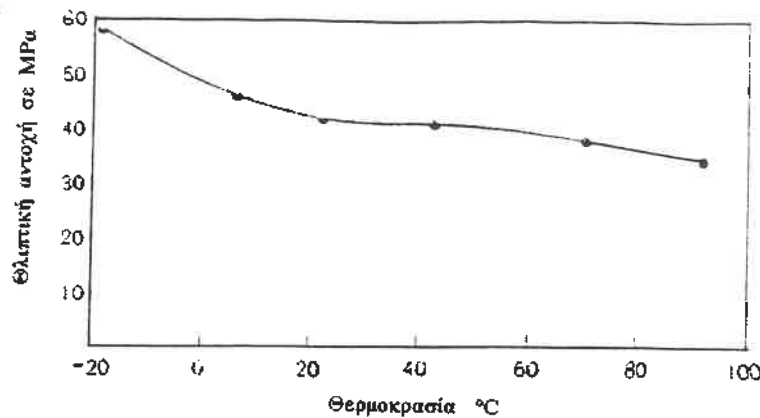


(a)



(b)

ΣΧΗΜΑ 3.8 Επίδραση του ρυθμού επιβολής της τάσης και του ρυθμού παραμόρφωσης στην θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. α) Επιρροή του ρυθμού επιβολής της τάσης στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος. β) Επιρροή του ρυθμού παραμόρφωσης στη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος.



ΣΧΗΜΑ 3.9 Σχέση της θλιπτικής αντοχής και της θερμοκρασίας του δοκιμίου κατά την στιγμή της δοκιμής.

3.2 ΑΛΛΟΙ ΤΥΠΟΙ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

3.2.1 ΓΕΝΙΚΑ

Μέχρι τώρα έχει δοθεί μεγαλύτερη έμφαση στην αντοχή του σκυροδέματος σε θλίψη. Θεωρείται δεδομένο, ότι και άλλοι τύποι αντοχής σκυροδέματος όπως η αντοχή σε κάμψη, η αντοχή σε εφελκυσμό και διάτμηση κ.α επηρεάζονται κατά παρόμοιο τρόπο από του ίδιους παράγοντες, που επηρεάζουν την θλιπτική αντοχή και οι οποίοι αναφέρθηκαν. Ωστόσο είναι γεγονός, ότι δεν υπάρχουν απλές — μοναδικές σχέσεις ανάμεσα στα διάφορα είδη αντοχής του σκυροδέματος, δηλαδή οι διάφοροι παράγοντες επηρεάζουν σε διαφορετικό βαθμό τα αποτελέσματα των διαφόρων τύπων αντοχής.

3.2.2 ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ

Η αντοχή του σκυροδέματος σε εφελκυσμό είναι πολύ μικρότερη από την αντοχή του υλικού σε θλίψη, κυρίως γιατί η δημιουργία των ρωγμών μειώνει την αντοχή του υλικού, πριν αυτό φέρει εφελκυστικά φορτία. Αν και η αντοχή

σε εφελκυσμό δεν λαμβάνεται υπόψιν κατά τον υπολογισμό, θεωρείτε κοντά στο μηδέν, είναι πολύ σημαντική, αφού η ρωγμάτωση του σκυροδέματος οφείλεται κυρίως σε εφελκυστικές τάσεις.

Δεν έχουν αναπτυχθεί πρότυποι έλεγχοι, τόσο από τον A.S.T.M όσο και από τον BSI, ώστε να παρέχεται απευθείας μέτρηση της αντοχής του σκυροδέματος σε εφελκυσμό. Το πρόβλημα των δευτερευουσών τάσεων που προκαλούνται μέσω της επιβολής φόρτισης, κάνουν δύσκολη την ερμηνεία και την αναπαράσταση των αποτελεσμάτων. Πρόσφατα όμως το RILEM προετοίμασε μια πρόταση για τον απευθείας έλεγχο σε εφελκυσμό του σκυροδέματος, η οποία σχεδιάστηκε βασικά για την έρευνα παρά για εκτεταμένη χρήση.

Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει την υποβολή σε καθαρό εφελκυσμό κυλινδρικών ή πρισματικών δοκιμίων, διάμεσο των άκρων, όπου σ' αυτά τα άκρα κολλώνται λάμες πάνω στο σκυρόδεμα. Τα άκρα των δοκιμίων θα πρέπει να είναι καθαρά, ώστε η κόλλα (συνήθως πολυεποξειδική ρητίνη) να είναι απλωμένη ομοιόμορφα πάνω σε ολόκληρη την επιφάνεια. Το φορτίο εφαρμόζεται με ταχύτητα 0,05 MPa/sec μέχρι την στιγμή της θραύσης του δοκιμίου. Πάντως μέχρι τώρα δεν υπάρχει αρκετή εμπειρία πάνω σ' αυτή την μέθοδο ελέγχου του σκυροδέματος, ώστε να γίνει σωστή εκτίμηση της χρησιμότητας της.

Υπάρχουν πάντως δύο γνωστές μέθοδοι για τον προσδιορισμό της αντοχής του σκυροδέματος σε εφελκυσμό, όπου η αντοχή υπολογίζεται έμμεσα. Οι μέθοδοι αυτοί είναι η δοκιμή διάρρηξης που θα αναπτυχθεί σ' αυτή την παράγραφο και η δοκιμή σε κάμψη που θα περιγραφεί στην επόμενη παράγραφο. Η δοκιμή διάρρηξης πραγματοποιείται σ' ένα πρότυπο κύλινδρο, όπου εφαρμόζεται διαμετρική συμπίεση όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10a. Το στοιχειώδες τμήμα στην κατακόρυφη διάμετρο, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.10a, υποβάλλεται στις ακόλουθες τάσεις:

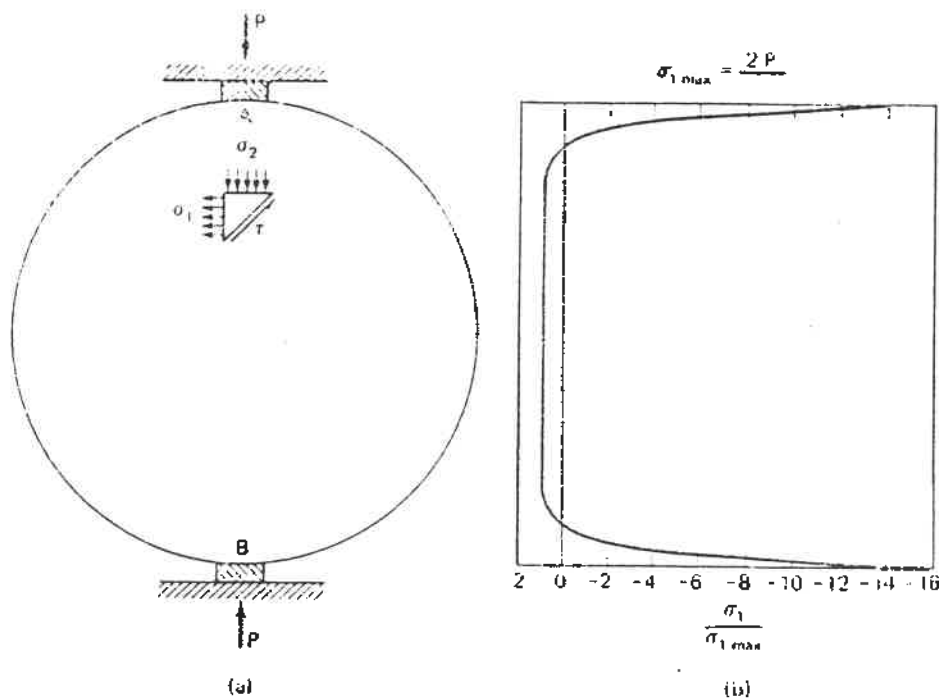
$$\alpha) \text{ Κατακόρυφη τάση } \sigma_c = \frac{2 * P}{\pi * L * D} \left[\frac{D^2}{r * (D - r)} - 1 \right]$$

$$\beta) \text{ Οριζόντια τάση } \sigma_t = \frac{2 * P}{\pi * L * D}$$

όπου P είναι το εφαρμοζόμενο φορτίο, L το μήκος του δοκιμίου, D η

διάμετρος του κυλίνδρου και r η απόσταση του στοιχειώδους τμήματος από την κορυφή του κυλίνδρου.

Δεν είναι σωστό να εφαρμόζεται ένα πραγματικά "γραμμικό" φορτίο κατά μήκος του άξονα του δοκιμίου γιατί αφενός μεν η επιφάνεια δεν είναι τελείως λεία και αφετέρου διότι αυτό θα προκαλούσε εξαιρετικά υψηλές πιέσεις κοντά στα σημεία επιβολής του φορτίου. Για τους λόγους αυτούς το φορτίο εφαρμόζεται μέσω δύο στενών παρεμβλημάτων από μαλακό υλικό. Η μεταβολή της εφελκυστικής τάσης κατά μήκος της κατακόρυφης διαμέτρου του δοκιμίου φαίνεται στο Σχήμα 3.10b. Όπως φαίνεται υπάρχουν πολύ υψηλές τάσεις θλίψης κοντά στα άκρα της κατακόρυφης διαμέτρου, ενώ αντίθετα ενεργεί μια ομοιόμορφη εφελκυστική τάση κοντά στο μέσο και έως τα $2/3$ της ακτίνας του δοκιμίου. [11]



ΣΧΗΜΑ 3.10 Η κατανομή των τάσεων κατά μήκος της φέρουσας διαμέτρου επιβολής του φορτίου σε κυλινδρικό δοκίμιο που συμπιέζεται μεταξύ των δύο επίπεδων ράβδων.

Αφού το σκυρόδεμα είναι περισσότερο αδύναμο στον εφελκυσμό απ' ότι στην θλίψη, η θραύση που θα επέλθει κατά την διάρρηξη θα οφείλεται σε πολύ μικρότερο φορτίο απ' ότι θα απαιτείται για την θραύση του δοκιμίου σε θλίψη. Έτσι είναι δυνατό να γίνει ο υπολογισμός της αντοχής του σκυροδέματος σε εφελκυσμό.

Όπως περιγράφεται στον A.S.T.M C 496, ο έλεγχος πραγματοποιείται σε κυλινδρικά δοκίμια που προκύπτουν είτε από έκχυση του σκυροδέματος σε κυλινδρικές μήτρες, είτε από πυρήνες. Τα παρεμβλήματα που φέρουν το φορτίο είναι φτιαγμένα από φύλλα ξύλου, πάχους 3mm, είναι λεία και έχουν πλάτος 25mm. Το δοκίμιο τοποθετείται στην μηχανή και το φορτίο εφαρμόζεται με ταχύτητα που κυμαίνεται μεταξύ 690 έως 1380 KPa/min, έως ότου επέλθει η διάρρηξη του. Η αντοχή του δοκιμίου σε διάρρηξη υπολογίζεται από την εξίσωση β. Ο κανονισμός BS 1881, Part 4 περιγράφει μία κατά βάση παρόμοια δοκιμή ελέγχου, με την μόνη διαφορά ότι οι ράβδοι που φέρουν το φορτίο είναι μόνο 12mm πλατιές. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι μπορούν να πραγματοποιηθούν έλεγχοι διάρρηξης και σε κυβικά δοκίμια. Αυτό γίνεται με την χρήση δύο ημισφαιρικών πλακών, οι οποίες φέρουν το φορτίο κατά μήκος των κεντρικών γραμμών των δύο απέναντι επιφανειών του δοκιμίου. Αυτή η δοκιμή δίνει περίπου τα ίδια αποτελέσματα με την δοκιμή του κυλινδρικού δοκιμίου. Στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται κυβικά δοκίμια η οριζόντια εφελκυστική τάση είναι :

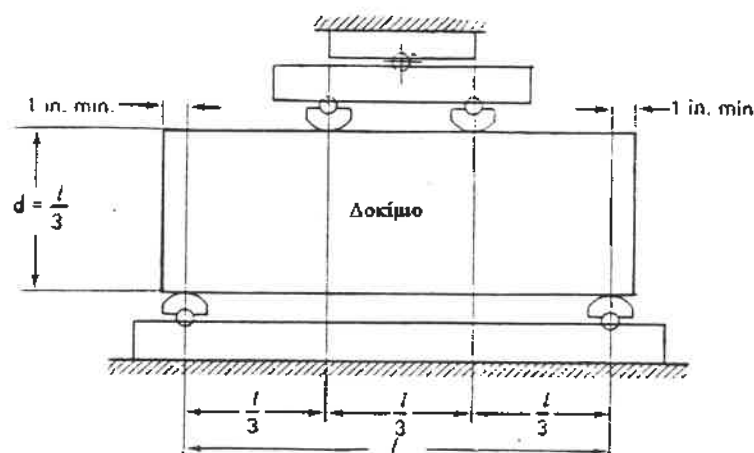
$$\sigma_t = \frac{2 * P}{\pi * a^2}$$

όπου α είναι η ακμή του κύβου.

Γενικά έχει βρεθεί ότι οι τιμές της αντοχής του σκυροδέματος σε εφελκυσμό που προκύπτουν από την δοκιμή διάρρηξης είναι περίπου 15 % υψηλότερες από τις τιμές που λαμβάνονται από την απευθείας δοκιμή του εφελκυσμού.

3.2.3 ΚΑΜΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ

Ο άλλος τρόπος υπολογισμού της αντοχής του σκυροδέματος σε εφελκυσμό είναι με την βοήθεια της δοκιμής κάμψης (A.S.T.M C78). Το δοκίμιο είναι μια δοκός διαστάσεων $152 \times 152 \times 508$ mm. Το καλούπι γεμίζεται σε δύο ίσες στρώσεις, κάθε στρώση ραβδίζεται 60 φορές, μία φορά για κάθε 13cm^2 της επιφάνειάς της. Τα σκληρυμένα μίγματα είναι δυνατόν να συμπυκνώνονται με δόνηση, όπως αυτή περιγράφεται για τα κυλινδρικά δοκίμια τα οποία υποβάλλονται σε θλίψη. Οι δοκοί ωριμάζουν με ένα καθορισμένο τρόπο, και στην συνέχεια υποβάλλονται σε έλεγχο κάμψης με τα φορτία να ενεργούν στα τρίτα του μήκους τους, όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.11.



ΣΧΗΜΑ 3.11 Σχηματική απεικόνιση της μηχανής δοκιμής σε κάμψη δοκών σκυροδέματος με την μέθοδο επιβολής του φορτίου στα τρίτα του μήκους της δοκού. Η συσκευή αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί και στην περίπτωση όπου επιβάλλεται η δύναμη μέσω μιας σφαιρικής κεφαλής. Σ' αυτή την περίπτωση ο κεντρικός άξονας παραλείπεται και το έλασμα στηρίζεται σε μια ράβδο και σε μια σφαίρα.

Οι έλεγχοι είναι δυνατόν να πραγματοποιηθούν και σε δοκούς που κόβονται από τεμάχια σκληρυμένου σκυροδέματος. Τα χυτά δοκίμια ελέγχονται σε τρόπο ώστε να ελέγχονται με τον ίδιο τρόπο, όπως καλουπώνονται. Με τον τρόπο αυτό παρέχονται λείες, επίπεδες, και παράλληλες επιφάνειες για την φόρτιση. Τα δοκίμια φορτίζονται με ταχύτητα φόρτισης η οποία κυμαίνεται από 860 έως 1200 KPa / min. Σύμφωνα με τον Βρετανικό Κανονισμό (Μέρος 4) υπάρχει μία κατά βάση παρόμοια δοκιμή ελέγχου, στην οποία όμως τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται έχουν διαφορετικές διαστάσεις που είναι 150 x 150 x 750 mm ή 100x100x500 mm. Η μέγιστη θεωρητική εφελκυστική αντοχή ή όπως ονομάζεται "Μέτρο Διάρρηξης", R, υπολογίζεται από την παραπάνω διαδικασία φόρτισης απλών δοκών σύμφωνα με την σχέση :

$$\alpha) \quad R = \frac{P * L}{b * d^2}$$

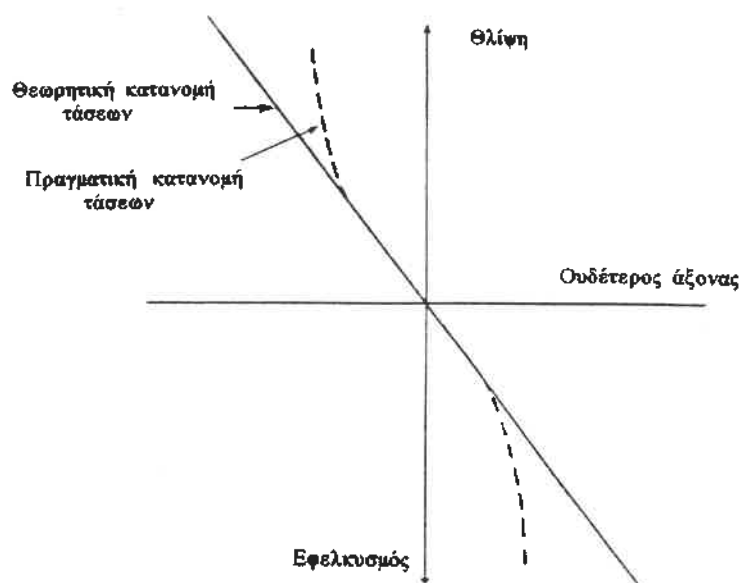
όπου P είναι το μέγιστο φορτίο που δίνει η μηχανή, L είναι το πλάτος ανοίγματος που ορίζεται από τα σημεία στήριξης, b το πλάτος του δοκιμίου και d είναι το ύψος του. Η παραπάνω εξίσωση εφαρμόζεται μόνο όταν η δοκός σπάει σε σημείο του άξονα της που βρίσκεται εσωτερικά των δύο σημείων που φέρουν τα φορτία, δηλαδή στο μεσαίο τρίτο του μήκους της δοκού. Εάν η δοκός σπάσει εκτός του διαστήματος που ορίζεται από τα σημεία φόρτισης και σε απόσταση από αυτά που δεν ξεπερνά το 5% του μήκους του ανοίγματος, η παραπάνω σχέση αντικαθίσταται από την εξής :

$$\beta) \quad R = \frac{3 * P * a}{b * d^2}$$

όπου a είναι η μέση απόσταση μεταξύ του σημείου ρήξης, και της πλησιέστερης στήριξης. Τα αποτελέσματα δοκιμών, όπου η ρήξη της δοκού γίνεται πολύ κοντά στις στηρίξεις, απορρίπτονται.

Ο έλεγχος αυτός τείνει να υπερεκτιμά την πραγματική εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος σε ποσοστό 50 %, κυρίως γιατί η δοκιμή της καθαρής κάμψης (εξίσωση α) θεωρεί ότι η τάση μεταβάλλεται γραμμικά κατ' μήκος

της κάθετης διατομής της δοκού. Επειδή όμως το σκυρόδεμα έχει μη γραμμική καμπύλη τάσεων — παραμορφώσεων, αυτή η θεώρηση δεν είναι αληθής. Κοντά στην αστοχία, ιδιαίτερα το τετράγωνο των τάσεων, είναι περισσότερο παραβολικό παρά τριγωνικό όπως φαίνεται στο Σχήμα 3.12. Παρόλα αυτά ο έλεγχος αυτός παραμένει πολύ χρήσιμος, αφού τα δομικά στοιχεία από σκυρόδεμα συνήθως φορτίζονται σε κάμψη, παρά σε αξονικό εφελκυσμό. Έτσι οι τιμές που λαμβάνονται από την δοκιμή της κάμψης, δίνουν μια πολύ καλή ένδειξη της ικανότητας του σκυροδέματος.



ΣΧΗΜΑ 3.12 Κατανομή των τάσεων κατά μήκος του μεσαίου άξονα της δοκού κατά την δοκιμή της κάμψης.

3.3 ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΕΣ ΚΑΙ ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΜΜΟΡΦΩΣΕΩΣ

ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΚΑΝΟΝΙΣΜΟ

ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

3.3.1 ΓΕΝΙΚΑ

Τα δοκίμια παίρνονται στην έξοδο του αναμικτήρα για το εργοταξιακό σκυρόδεμα ή στην έξοδο του αυτοκινήτου μεταφοράς για εργοστασιακό σκυρόδεμα. Τα συμβατικά δοκίμια με τα οποία θα γίνονται έλεγχοι συμμορφώσεως, καθώς και τα δοκίμια του έργου θα είναι κυβικά, ακμής 20 cm ή 15 cm ή κυλινδρικά διαμέτρου 15 cm και ύψους 30 cm.

Για τους ελέγχους συμμορφώσεως ενός έργου πρέπει να χρησιμοποιούνται δοκίμια του ίδιου τύπου με εκείνα που χρησιμοποιήθηκαν για την μελέτη σύνθεσης. Η σύγκριση των αντοχών διαφορετικών δοκιμίων ύστερα από αναγωγή της αντοχής με διάφορους συντελεστές απαγορεύεται. Για άλλες όμως ανάγκες, όπως για του ελέγχους αντοχής σε μικρή ηλικία, που δεν έχουν σχέση με τους ελέγχους συμμορφώσεως υιοθετούνται από τον κανονισμό οι ακόλουθες σχέσεις:

Αντοχή κυβικού δοκιμίου πλευράς 15 cm ($\beta 15$) προς την αντοχή κυβικού δοκιμίου πλευράς 20 cm ($\beta 20$) :

$$\beta 15 = 1,05 * \beta 20$$

και οι σχέσεις κυβικών δοκιμίων πλευράς 20 cm ($\beta 20$), προς κυλινδρικά 15 x 30 όπως στον Πίνακα 3.1 . [2]

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.1 Σχέση αντοχής κύβου / κυλίνδρου

Αντοχές κυλ. δοκιμίων 15x 30 σε (MPa)	≤ 9.2	12.8	18.4	25.4	≥ 39.5
Συντελεστής πολ/μού για αναγωγή αντοχής κυλίνδρου σε αντοχή κύβου 20 cm .	1.30	1.25	1.22	1.18	1.14

Δοκίμια με εμφανή ελαττώματα από κακή συμπύκνωση ή τραυματισμό δεν θα συμπεριλαμβάνονται στον έλεγχο συμμορφώσεως. Για να αντιμετωπιστεί η παραπάνω περίπτωση συνίσταται η λήψη σε κάθε δειγματοληψία, ενός υπεράριθμου δοκιμίου. Στην περίπτωση που δεν διαπιστωθεί ελαττωματικό δοκίμιο το υπεράριθμο δοκίμιο δεν θα λαμβάνεται υπόψιν.

3.3.2 ΕΡΓΟΣΤΑΣΙΑΚΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

- Το σκυρόδεμα που διαστρώνεται σε μια μέρα αποτελεί μια παρτίδα και αντιπροσωπεύεται από μια δειγματοληψία δοκιμίων.
- Αν η ποσότητα σκυροδέματος που διαστρώνεται σε μια μέρα υπερβαίνει τα 150 κ.μ θα αντιπροσωπεύεται από μια δειγματοληψία 12 δοκιμίων.
- Αν η σκυροδέτηση διαρκεί δύο ημέρες τότε το σκυρόδεμα του διημέρου αποτελεί μια παρτίδα και αντιπροσωπεύεται από μια δειγματοληψία 12 δοκιμίων (6 την πρώτη μέρα και 6 την δεύτερη ημέρα).
- Αν η σκυροδέτηση διαρκέσει παραπάνω από δύο ημέρες, τότε η ποσότητα του κάθε διημέρου αποτελεί, μια παρτίδα και αντιπροσωπεύεται από 12 δοκίμια.
- Αν η διάστρωση ενός διημέρου διακοπεί πριν συμπληρωθούν τα 12 δοκίμια, τότε η παρτίδα του σκυροδέματος που έχει διαστρωθεί θα αντιπροσωπεύεται από τα 6 πρώτα δοκίμια.
- Από κάθε αυτοκίνητο μεταφοράς θα παίρνεται ένα δοκίμιο, εκτός αν η σκυροδέτηση συμπληρώνεται με λιγότερα από 6 αυτοκίνητα.
- Οι αντοχές 28 ημερών κάθε δειγματοληψίας 6 δοκιμίων πρέπει να ικανοποιούν το Κριτήριο Συμμορφώσεως Α.
- Οι αντοχές 28 ημερών κάθε δειγματοληψίας 12 δοκιμίων πρέπει να ικανοποιούν το κριτήριο συμμορφώσεως Β.
- Δεν επιτρέπεται ο χωρισμός των δοκιμίων μιας δειγματοληψίας 12 δοκιμίων σε δυο ομάδες των 6 και ο έλεγχος αυτών με το κριτήριο Α. [2]

Κριτήριο Συμμορφώσεως Α :

1ος κανόνας $\overline{X}_6 \geq f_{ck} + 1,40 * S \text{ (MPa)}$

2ος κανόνας $X_i \geq f_{ck} - 2,5 \text{ (MPa)}$

Κριτήριο Συμμορφώσεως Β :

3ος κανόνας $\overline{X}_{12} \geq f_{ck} + 1,43 * S \text{ (MPa)}$

4ος κανόνας $X_i \geq f_{ck} - 4 \text{ (MPa)}$

όπου X_6, X_{12} = μέσος όρος αντοχής των 6 ή 12 δοκιμίων.

X_i = η αντοχή κάθε δοκιμίου

S = η τυπική απόκλιση της δειγματοληψίας

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_n)^2}{n-1}} \quad \text{όπου } n = 6 \text{ ή } 12$$

3.3.3 ΕΡΓΟΤΑΞΙΑΚΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΙΚΡΩΝ ΕΡΓΩΝ

• Το σκυρόδεμα που διαστρώνεται σε μια μέρα αποτελεί μία "παρτίδα" και αντιπροσωπεύεται από μια δειγματοληψία 6 δοκιμίων.

• Αν η ποσότητα του σκυροδέματος που διαστρώνεται σε μία μέρα υπερβαίνει τα 150 m^3 , τότε η δειγματοληψία θα περιλαμβάνει 12 δοκίμια.

• Για τους ελέγχους συμμορφώσεως παίρνεται ένα δοκίμιο από διαφορετικό ανάμιγμα, το οποίο πρέπει να είναι τυχαίο και να μην γίνεται επιλογή ορισμένων "καλών".

• Για τους κανόνες συμμόρφωσης ισχύουν κριτήρια Α και Β .[2]

3.3.4 ΕΡΓΟΤΑΞΙΑΚΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΜΕΓΑΛΩΝ ΕΡΓΩΝ

• Μεγάλα έργα θεωρούνται εκείνα στα οποία, ο κατασκευαστής είναι υποχρεωμένος να εγκαταστήσει συγκρότημα παραγωγής σκυροδέματος, και να διενεργήσει προκαταρκτικούς ελέγχους.

• Κατασκευάζονται 15 έως 60 δοκιμαστικά αναμίγματα με τις αναλογίες της μελέτης συνθέσεως. Από κάθε ανάμιγμα παίρνονται δύο δοκίμια (ένα για την αντοχή 7 ημερών και ένα για την αντοχή 28 ημερών).

• Από τις αντοχές αυτών των δοκιμίων θα υπολογισθούν :

α) Ο λόγος αντοχών $7/28$ ημερών

β) Η τυπική απόκλιση S' των αντοχών 28 ημερών και η τυπική απόκλιση

$$S_{\pi} = \lambda * S'$$

όπου λ = συντελεστής διορθώσεως αναλόγως του αριθμού των δοκιμίων, από τον Πίνακα 3.2 . [2]

ΠΙΝΑΚΑΣ 3.2 Συντελεστής διόρθωσης της τυπικής απόκλισης.

Αριθμός δοκιμίων	Συντελεστής πολλαπλασιασμού
15	1.27
20	1.18
30	1.09
40	1.05
50	1.02
60 ή περισσότερα	1.00

• Αν η τυπική απόκλιση S_{π} είναι μεγαλύτερη από την S της μελέτης σύνθεσης, τότε η απαιτούμενη αντοχή πρέπει να διορθώνεται με την σχέση :

$$f_a = f_{ck} + 1.91 * S_{\pi}$$

(αν $S_{\pi} < 3 \text{ MPa}$ θα εισάγεται η τιμή $S_{\pi} = 3 \text{ MPa}$).

Συγχρόνως θα διορθώνονται οι αναλογίες των υλικών βάσει της καμπύλης

N/T και αντοχής της μελέτης σύνθεσης.

- Μετά την έναρξη του έργου, το σκυρόδεμα που διαστρώνεται σε μία μέρα θα αποτελεί μία παρτίδα και θα αντιπροσωπεύεται από μια δειγματοληψία.

- Οι δειγματοληψίες των τριών πρώτων ημερών θα αποτελούνται από 12 δοκίμια, οι δε δειγματοληψίες των επομένων ημερών από 3 δοκίμια η κάθε μια.

- Οι αντοχές των δειγματοληψιών 12 δοκιμίων πρέπει να ικανοποιούν το Κριτήριο Συμμορφώσεως Γ, οι δε αντοχές των δειγματοληψιών 3 δοκιμίων πρέπει να ικανοποιούν έναν τουλάχιστον από τους κανόνες 7 και 8 του Κριτηρίου Συμμορφώσεως Δ.

Κριτήριο Συμμορφώσεως Γ :

5ος κανόνας $\overline{X}_{12} \geq f_{ck} + 1,43 * S$ (MPa)

6ος κανόνας $X_i \geq f_{ck} - 4$ (MPa)

Κριτήριο Συμμορφώσεως Δ :

7ος κανόνας $\overline{X}_{36} \geq f_{ck} + 1,50 * S$ (MPa)

8ος κανόνας $X_3 \geq f_{ck} + 1,60 * S$ (MPa)

όπου : X_{12} , X_3 = μέσος όρος αντοχής της δειγματοληψίας 12 και 3 δοκιμίων αντίστοιχα .

X_{36} = μέσος όρος αντοχής των 3 δοκιμίων της δειγματοληψίας και των 33 αμέσως προηγούμενων .

S = τυπική απόκλιση των τελευταίων 60 δοκιμίων . [2]

ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

4.1 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΣΥΝΘΕΤΟΥ ΥΛΙΚΟΥ

Η δομή του σκυροδέματος είναι σύνθετη, γεγονός που οδηγεί στην αναγκαία θεώρηση απλοποιήσεων, ώστε να δημιουργηθεί, ένα μαθηματικό μοντέλο που να επιτρέπει τον προσδιορισμό μιας σχέσης μεταξύ της δομής του υλικού και των φυσικών του ιδιοτήτων. Έτσι θεωρείται ότι τα αδρανή και ο πολτός είναι δύο φάσεις ομογενείς και ισότροπες. Η εμπειρία έχει δείξει ότι ένα τέτοιο μοντέλο μπορεί να περιγράψει πολύ καλά τη μηχανική συμπεριφορά του σκυροδέματος όταν είναι γνωστές οι ιδιότητες των δύο συστατικών μερών.

Για να περιγραφεί ένα σύστημα με δύο ή περισσότερα διαφορετικής φάσης υλικά (αδρανή, πολτός), θα πρέπει να εξεταστούν οι ακόλουθες παράμετροι :

1. Το σχήμα των τεμαχιδίων (μορίων)
2. Το μέγεθος και η διαβάθμιση των μορίων
3. Η συγκέντρωση και η κατανομή της συγκέντρωσης των μορίων
4. Ο προσανατολισμός των μορίων
5. Η κατανομή των μορίων στο χώρο
6. Η σύνθεση του υλικού διασκορπισμένης φάσης (αδρανές)
7. Η σύσταση του υλικού συνεχόμενης φάσης (τσιμεντοπολτός)
8. Η φύση του δεσμού μεταξύ της διασκορπισμένης φάσης και της συνεχόμενης φάσης .

Η απλή περιγραφή της γεωμετρίας ενός συστήματος, σε σχέση με τις πα-

ραμέτρους αυτές, είναι πολύ δύσκολη. Επίσης είναι δύσκολο να καθοριστεί αν η φάση είναι συνεχόμενη ή διασκορπισμένη. Έτσι είναι χρήσιμο να θεωρείται σαν ύπαρξη δύο ακραίων φάσεων τακτοποίησης των συστατικών μερών, που είναι το παράλληλο και το σειριακό μοντέλο που φαίνονται στα Σχήμα 4.1a και 4.1.b αντίστοιχα. Τα συστήματα αυτά και ορισμένα άλλα χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των ελαστικών παραμέτρων του σύνθετου υλικού όταν είναι γνωστές οι ελαστικές παράμετροι των διαφορετικών φάσεων. Το παράλληλο μοντέλο, στο οποίο οι δύο φάσεις υποβάλλονται σε ομοιόμορφες παραμορφώσεις, παρέχει το ανώτερο όριο τιμών των ελαστικών παραμέτρων. Το σειριακό μοντέλο, στο οποίο οι δύο φάσεις υποβάλλονται σε ομοιόμορφες τάσεις, παρέχει το κατώτερο όριο τιμών των ελαστικών παραμέτρων. [11]

Χρησιμοποιώντας τα δύο μοντέλα για τον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας του σύνθετου υλικού προκύπτει ότι για το παράλληλο μοντέλο ισχύει :

$$4.a) \quad E_s = E_1 \cdot V_1 + E_2 \cdot V_2$$

ενώ για το σειριακό μοντέλο

$$4.β) \quad 1/E_s = V_1 / E_1 + V_2 / E_2$$

όπου E_s = το μέτρο ελαστικότητας του σύνθετου υλικού

E_1, E_2 = τα μέτρα ελαστικότητας των δύο συστατικών μερών

V_1, V_2 = τα ποσοστά των όγκων των δύο συστατικών μερών

4.2 ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Τα μοντέλα αυτά των σύνθετων συστημάτων έχουν εφαρμοστεί στο σκυρόδεμα όπου οι εξισώσεις 4.α και 4.β γράφονται ως εξής :

$$4.γ) \quad E_c = E_p \cdot V_p + E_a \cdot V_a$$

$$4.δ) \quad 1/E_c = V_p/E_p + V_a/E_a$$

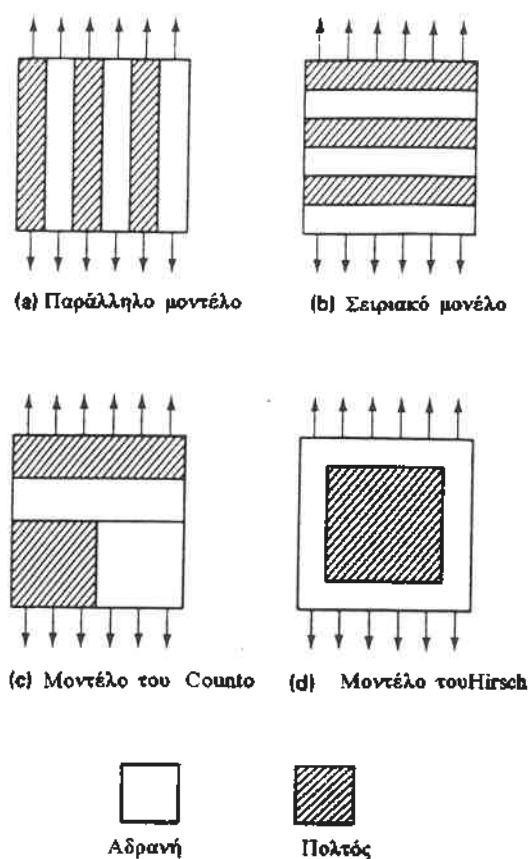
όπου E_c το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος, E_p , E_a τα μέτρα ελαστικότητας του πολτού και των αδρανών αντίστοιχα, και V_p , V_a τα ποσοστά των όγκων του πολτού και των αδρανών αντίστοιχα.

Ωστόσο για ένα σύνθετο υλικό, όπως το σκυρόδεμα που αποτελείται από μόρια αδρανών διασκορπισμένα μέσα στον πολτό, συνίσταται να έχει δύο θεμελιώδη διαφορετικές δομές. Τα σκυροδέματα τα οποία φτιάχνονται από συνηθισμένα αδρανή (σκληρά μόρια μέσα σε ένα μαλακό πολτό) προσαρμόζονται καλύτερα στο μοντέλο των κατώτερων ορίων, δηλαδή των ενιαίων τάσεων (Σχήμα 4.1b). Αντίθετα τα σκυροδέματα που φτιάχνονται από ελαφρά αδρανή (μαλακά μόρια μέσα σε σκληρό πολτό) προσαρμόζονται καλύτερα στο μοντέλο των ανώτερων ορίων δηλαδή των ενιαίων παραμορφώσεων (Σχήμα 4.1a). Στην πραγματικότητα κανένα μοντέλο δεν είναι απόλυτα σωστό, αφού το σκυρόδεμα όταν υποβάλλεται σε φόρτιση δεν επιδεικνύει ούτε ομοιόμορφη τάση ούτε ομοιόμορφη παραμόρφωση. Για το σκυρόδεμα που φτιάχνεται από τα συνηθισμένα αδρανή, το μοντέλο των ομοιόμορφων τάσεων υπερεκτιμά την τιμή E_c κατά 10 % περίπου ενώ το μοντέλο των ομοιόμορφων παραμορφώσεων υπερεκτιμά το E_c σε μεγαλύτερο ποσοστό. Επίσης έχουν προταθεί και άλλα μοντέλα για να περιγραφούν οι ελαστικές παράμετροι του σκυροδέματος. Για παράδειγμα, έχει προταθεί από τον Hirsch ένα μοντέλο που είναι το άθροισμα των εξισώσεων 4.γ και 4.δ όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.1c. Η σχέση του μοντέλου αυτού είναι η εξής :

$$4.ε) \quad \frac{1}{E_c} = x * \left(\frac{1}{V_p * E_p + V_k * E_a} \right) + (1-x) * \left(\frac{V_p}{E_p} + \frac{V_a}{E_a} \right)$$

όπου x και $(1-x)$ είναι οι σχετικές αναλογίες του υλικού που προσαρμόζεται στις κατώτερες και ανώτερες οριακές τιμές. Έχει βρεθεί ότι για ορισμένα σκυροδέματα η τιμή του x είναι περίπου 0,5. Να σημειωθεί ότι όταν υπάρχει δεσμός μεταξύ του πολτού και των αδρανών ($x=0$) η εξίσωση 4.ε παίρνει την μορφή της εξίσωσης 4.δ που περιγράφει το μοντέλο των ενιαίων τάσεων.

Για την τέλεια δομή μεταξύ αδρανών και πολτού όπου $x = 1$ η εξίσωση 4.ε παίρνει την μορφή της εξίσωσης 4.γ που περιγράφει το μοντέλο των ενιαίων παραμορφώσεων. [11]



ΣΧΗΜΑ 4.1 Μοντέλα της δομής του σκυροδέματος: α) Παράλληλο μοντέλο ομοιόμορφης παραμόρφωσης, β) Σειριακό μοντέλο ομοιόμορφης τάσης, γ) Μοντέλο του Hirsch δ) Μοντέλο του Counto

Ένας περιορισμός για τις εξισώσεις 4.δ και 4.ε είναι ότι για $E_a = 0$ αυτές δίνουν $E_c = 0$, πράγμα που είναι λάθος. Για το σκοπό αυτό υπάρχει ένα άλλο μοντέλο που έχει προταθεί από τον Counto, Σχήμα 4.1d, και δίνει την σχέση :

$$4.στ) \quad \frac{1}{E_c} = \frac{1 - \sqrt{V_a}}{E_p} + \left[\frac{1}{\frac{(1 - \sqrt{V_a})}{\sqrt{V_a}} * E_p + E_a} \right]$$

Τα μοντέλα αυτά δίνονται γραφικά στο Σχήμα 4.2 .

Εάν τώρα μελετήσουμε, σαν πιο ρεαλιστικό μοντέλο για το σκυρόδεμα, ένα διφασικό υλικό που αποτελείται από σφαιρικά μόρια αδρανών μέσα σε ένα συνεχόμενο πολτό και θεωρήσουμε ότι ο λόγος του Poisson είναι ο ίδιος για το σύνθετο υλικό και για τις δύο φάσεις, τότε το E_c μπορεί να εκφραστεί ως :

$$4.ζ) \quad E_c = \frac{(1 - V_a) * E_p + (1 + V_a) * E_a}{(1 + V_a) * E_p + (1 - V_a) * E_a}$$

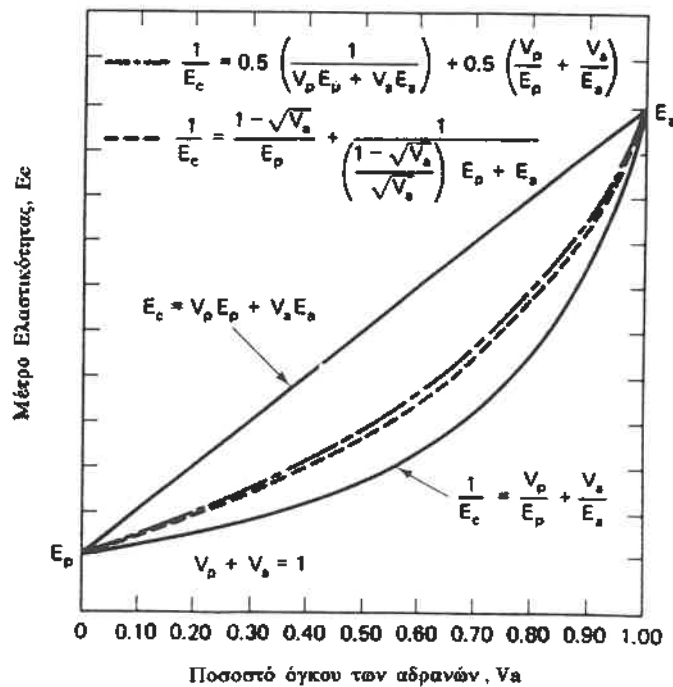
Η εξίσωση αυτή ισχύει μόνο όταν :

- α) Δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των μορίων των αδρανών.
- β) Αναπτύσσονται ισχυροί δεσμοί μεταξύ των αδρανών και του πολτού.

Ενώ η πρώτη σύμβαση είναι απόλυτα λογική η δεύτερη δεν είναι.

Για συνηθισμένου βάρους σκυρόδεμα, το E_a , είναι γενικά σημαντικά μεγαλύτερο του E_p . Σ' αυτή την περίπτωση των σκληρών μορίων μέσα στον πολτό, η εξίσωση 4.δ αποδίδει επίσης το θεωρητικό κατώτερο όριο για το E_c , το οποίο μπορεί να ληφθεί μόνο όταν δεν υπάρχει δεσμός μεταξύ των μορίων και του πολτού. Από την άλλη μεριά, το θεωρητικό ανώτερο όριο τώρα αποδίδεται από την εξίσωση 4.ζ (αντί της εξίσωσης 4.γ) και μάλιστα μπορεί να μόνο όταν υπάρχει ισχυρός δεσμός μεταξύ των δύο φάσεων του υλικού. Στην περίπτωση των μερικών δεσμών η τιμή του E_c θα πρέπει να βρίσκεται κάπου μεταξύ αυτών των ακραίων τιμών. Για ορισμένα ελαφροσκυροδέματα είναι $E_a = E_p$. Σ' αυτή την περίπτωση οι εξισώσεις 4.γ, 4.δ και 4.ζ αποδίδουν ως αποτέλεσμα ότι το E_c είναι ανεξάρτητο των σχετικών αναλογιών του τσιμέντου και των αδρανών μέσα στην μάζα του σκυροδέματος. Γι' αυτό ισχύει $E_c = E_a = E_p$ για κάθε αναλογία όγκου των αδρανών. Για άλλα ελαφροσκυροδέματα το E_a είναι

σημαντικά μικρότερο του E_p . Σ' αυτή την περίπτωση των μαλακών μορίων μέσα σ' ένα σκληρό πολτό, το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος θα επηρεάζεται λιγότερο από τον δεσμό των αδρανών με τον πολτό. Για $E_p > E_a$ η εξίσωση 4.γ αποδίδει το θεωρητικό ανώτερο όριο για το E_c το οποίο μπορεί να ληφθεί μόνο όταν η δομή του υλικού μοιάζει μ' αυτή που φαίνεται στο Σχήμα 4.1α. Για τα ελαφροσκυροδέματα αυτά, η εξίσωση 4.ζ δίνει το χαμηλότερο όριο του E_c για σφαιρικά μόρια με ένα μικρό μέτρο ελαστικότητας, τα οποία διανέμονται ομοιόμορφα, μέσα σ' ένα πολτό με ένα υψηλό μέτρο ελαστικότητας.



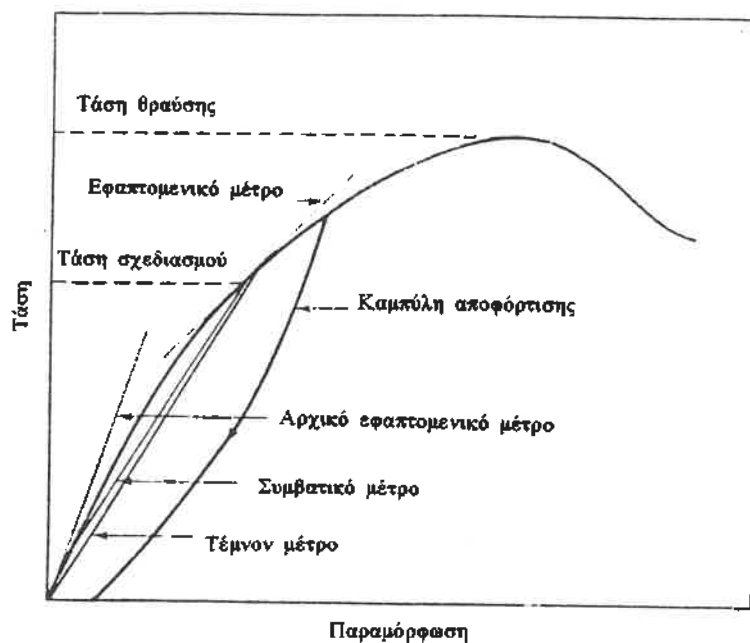
ΣΧΗΜΑ 4.2 Σχέσεις μεταξύ του Μέτρου Ελαστικότητας και του ποσοστού του όγκου των αδρανών για τα απλοποιημένα μοντέλα που δίνονται στο Σχήμα 4.1.

4.3 ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Υπάρχει μια φανερή δυσκολία στον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας (μέτρο του Young), από ένα μη γραμμικό διάγραμμα τάσεων — παραμορφώσεων. Η πρώτη προσέγγιση για το μέτρο ελαστικότητας ονομάζεται αρχικό εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας, και προέρχεται από μια πραγματικά ελαστική συμπεριφορά του υλικού. Το αρχικό μέτρο ελαστικότητας ορίζεται ως η κλίση της εφαπτομένης της καμπύλης στην αρχή των συντεταγμένων (για τάση $\sigma = 0$), όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.3. Το μέτρο αυτό έχει πολύ μικρή πρακτική σημασία, διότι εφαρμόζεται μόνο στις μικρές τάσεις — παραμορφώσεις. Είναι πιθανό το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας που καθορίζεται με την μέθοδο των υπερήχων, να αποτελεί μια λογική εκτίμηση του αρχικού μέτρου ελαστικότητας, αφού ο καθορισμός του απαιτεί πολύ μικρές παραμορφώσεις του υλικού. Ένας πιο πρακτικός υπολογισμός του μέτρου ελαστικότητας είναι το τέμνον μέτρο ελαστικότητας. Ολόκληρη η παραμόρφωση του υλικού που γίνεται για μια δεδομένη τάση, θεωρείται ως ελαστική, με αποτέλεσμα η κλίση της τέμνουσας (χορδής) μεταξύ της αρχής και οποιουδήποτε σημείου της καμπύλης να δίνει το τέμνον μέτρο ελαστικότητας για την παρατηρούμενη εφαρμοζόμενη τάση. Έτσι το τέμνον μέτρο περιλαμβάνει ένα μη γραμμικό τμήμα και φυσικά η τιμή του εξαρτάται από τη στάθμη της εφαρμοζόμενης τάσης που επιλέγεται.

Το αρχικό εφαπτομενικό μέτρο ή το τέμνον μέτρο ελαστικότητας δεν είναι εύκολο να καθοριστούν με την δοκιμή της θλίψης. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι κατά την αρχική φόρτιση, συχνά παρατηρείται ένα μικρό τμήμα παραμόρφωσης που οφείλεται στις προϋπάρχουσες ρωγμές του υλικού, οι οποίες τείνουν να κλείσουν υπό την επιβολή του φορτίου. Το φαινόμενο αυτό δημιουργεί μια λεπτή κοιλότητα στην αρχή της καμπύλης τάσεων — παραμορφώσεων. Σ' αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται το συμβατικό μέτρο ελαστικότητας (A.S.T.M C46) που αντιστοιχεί στην κλίση της ευθείας που ορίζεται μεταξύ δύο σημείων της καμπύλης τάσεων — παραμορφώσεων. Το αρχικό μέτρο ελαστικότητας αντιστοιχεί σε κλίση εφαπτομένης της καμπύλης, όταν η παραμόρφωση έχει αρχική τιμή 0,00005. Το κατώτερο αυτό όριο παραμόρφωσης επιλέγεται με σκοπό να αποφευχθεί κάποιο σφάλμα, που οφείλεται στην επίδραση

των ρωγμών στο αρχικό τμήμα της καμπύλης τάσεων — παραμορφώσεων. Η τιμή του συμβατικού μέτρου καθώς και του τέμνου μέτρου ελαστικότητας που αντιστοιχούν στο 40 % της τελικής αντοχής, δεν διαφέρουν. Ωστόσο το αρχικό μέτρο ελαστικότητας έχει μεγαλύτερη ακρίβεια. Ο υπολογισμός του συμβατικού μέτρου ελαστικότητας είναι μια συντηρητική μέτρηση που είναι εύκολη να γίνει στο εργαστήριο σε σχέση με τον καθορισμό του αρχικού μέτρου ελαστικότητας. Αντίθετα το συμβατικό μέτρο ελαστικότητας υποεκτιμά την πρόσθετη παραμόρφωση που πραγματοποιείται, όταν μία πρόσθετη τάση επιβάλλεται στο σκυρόδεμα. Το εφαπτομενικό μέτρο ελαστικότητας είναι το καλύτερο στοιχείο για την συμπεριφορά του σκυροδέματος, στις μικρές πρόσθετες τάσεις. [11]



ΣΧΗΜΑ 4.3 Τυπικό διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων σκυροδέματος στο οποίο φαίνονται τα διάφορα μέτρα ελαστικότητας.

4.4 ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Το μέτρο ελαστικότητας που χρησιμοποιείται στον υπολογισμό του σκυροδέματος σπάνια προσδιορίζεται με απευθείας δοκιμή. Συνήθως ο υπολογισμός του γίνεται από μια εμπειρική σχέση μεταξύ του μέτρου ελαστικότητας και της αντοχής. Η σχέση του Αμερικανικού Κανονισμού είναι η εξής:

$$4.η) \quad E_c = 0,043 * p^{\frac{3}{2}} * (σ_c')^{\frac{1}{2}} \quad \text{MPa}$$

όπου E_c είναι το τέμνον μέτρο ελαστικότητας (που αντιστοιχεί στο 40 % της τελικής αντοχής), p το ειδικό βάρος του σκυροδέματος σε kgf/m^3 και $σ_c'$ η αντοχή σε θλίψη που προκύπτει από δοκιμές πρότυπων κυλινδρικών δοκιμίων $150 \times 300 \text{ mm}$ σε MPa. Αν υποθέσουμε ότι η πυκνότητα του σκυροδέματος είναι 2320 kgf/m^3 , η παραπάνω σχέση γράφεται:

$$4.θ) \quad E_c = 4,730 * (σ_c')^{\frac{1}{2}} \quad \text{GPa}$$

Στο Βρετανικό Κανονισμό τόσο το στατικό όσο και το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας, συσχετίζονται με την θλιπτική αντοχή. Εδώ όμως χρησιμοποιούνται κυβικά δοκίμια από σκυρόδεμα με πυκνότητα από 2300 kgf/m^3 και άνω (Πίνακας 4.1). Οι τιμές αυτές του πίνακα είναι γενικά σωστές, αν θεωρηθεί μια διασπορά $\pm 4 \text{ GPa}$. Οι τιμές του Πίνακα 4.1 που δίνουν το στατικό μέτρο ελαστικότητας είναι δυνατόν να προκύψουν και από την σχέση:

$$4.ι) \quad E = 9,1 * p * (σ_c')^{\frac{1}{3}} \quad \text{GPa}$$

Για τα σκυροδέματα τα οποία έχουν πυκνότητα μεταξύ 1400 και 2300 kgf/m^3 , οι τιμές του στατικού μέτρου ελαστικότητας που δίνονται στο Πίνακα 4.1, θα

πρέπει να πολλαπλασιάζονται με τον όρο $\left(\frac{P}{2300}\right)^2$.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1 Σχέση ανάμεσα στο Μέτρο Ελαστικότητας και την θλιπτική αντοχή

θλιπτική Αντοχή (MPa)	Στατικό Μέτρο (GPa)	Δυναμικό Μέτρο (GPa)	Στατικό Μέτρο σύμφωνα με τον CEB (GPa)
20	25	35	29
25	26	36	30.5
30	28	38	32
40	31	40	35
50	34	42	37
60	36	44	39

Για το κοινό σκυρόδεμα ο **C.E.B** χρησιμοποιεί την έκφραση :

$$4.κ) \quad E = 9,5 * (\sigma_c + 8)^{\frac{1}{3}} \quad \text{GPa}$$

όπου σ_c είναι η χαρακτηριστική αντοχή και ο αριθμός " 8 " συστήνεται για να ληφθεί υπόψιν η διαφορά μεταξύ της μέσης θλιπτικής αντοχής και της προσδιοριζόμενης χαρακτηριστικής αντοχής. Οι τιμές που προκύπτουν από αυτή την εξίσωση για διαφορετικές χαρακτηριστικές αντοχές δίνονται επίσης στον Πίνακα 4.1. Οι τιμές αυτές θεωρούνται ως σωστές μέσα σ' ένα διάστημα $\pm 30 \%$.

Για ελαφροσκυροδέματα ο **C.E.B** συνιστά, οι τιμές του Πίνακα 4.1 να πολλαπλασιάζονται με τον όρο $\left(\frac{P}{2400}\right)^2$ σύμφωνα με την σχέση :

$$4.λ) \quad E = 9,5 * \left(\frac{P}{2400}\right)^2 * (\sigma_c + 8)^{\frac{1}{3}} \quad \text{GPa}$$

Έχουν γίνει πολλές προσπάθειες με σκοπό να περιγράψουν την μορφή του διαγράμματος τάσεων — παραμορφώσεων αναλυτικά σε σχέση με τα σ και ε . Πάντως δεν υπάρχει μια πρότυπη καμπύλη τάσεων — παραμορφώσεων, αφού το σχήμα της εξαρτάται από άλλες ιδιότητες του σκυροδέματος καθώς και από την διαδικασία ελέγχου. Έτσι η χρησιμότητα αυτών των εκφράσεων φαίνεται να περιορίζεται σημαντικά.

4.5 ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ ΤΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Είδαμε ότι το μέτρο ελαστικότητας σχετίζεται με την θλιπτική αντοχή και την πυκνότητα του σκυροδέματος, ενώ μπορεί να υπολογισθεί από τις εμπειρικές σχέσεις που αναφέρονται στην προηγούμενη παράγραφο, (4.4). Έτσι οι παράγοντες εκείνοι που επηρεάζουν την θλιπτική αντοχή, επιδρούν με παρόμοιο τρόπο και στο μέτρο ελαστικότητας. Ο κυριότερος φυσικά συντελεστής επιρροής είναι το πορώδες, και έτσι το μέτρο ελαστικότητας μειώνεται έντονα, όσο ο λόγος N/T αυξάνεται. Να σημειωθεί ότι αφού το πορώδες αλλάζει ανάλογα με το λόγο N/T που έχει ο πολτός, αντίστοιχα μεταβάλλεται και η συμπεριφορά της καμπύλης τάσεων — παραμορφώσεων.

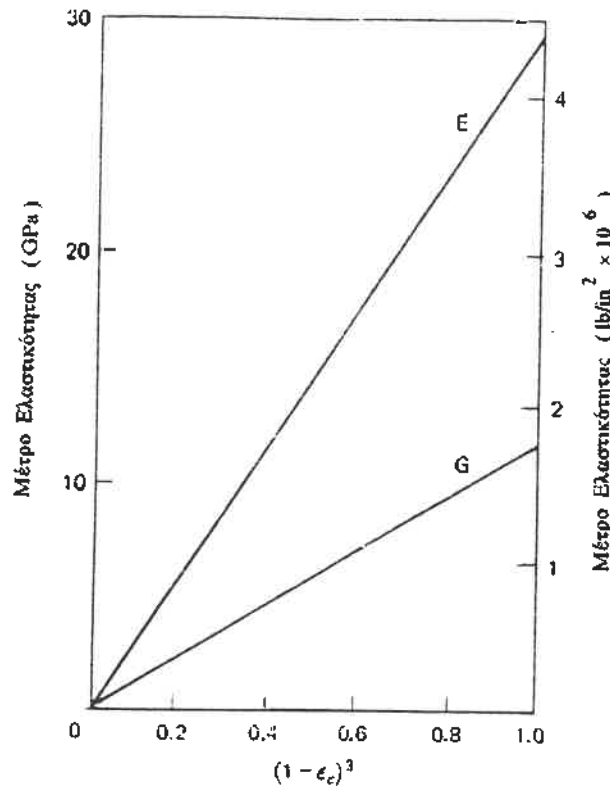
Το μέτρο ελαστικότητας του τσιμέντου E , έχει βρεθεί ότι είναι ανάλογο κατά προσέγγιση του κύβου του λόγου πολτού / χώρου. Σ' ότι αφορά τους τριχοειδείς πόρους, η σχέση που ισχύει είναι η :

$$4.μ \quad E = E_g * (1 - P_c)^3 \quad \text{GPa}$$

όπου E_g , είναι το μέτρο ελαστικότητας του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού για μηδενικό πορώδες, και P_c το πορώδες που οφείλεται στα τριχοειδή αγγεία εκφρασμένο ως λόγος. Μια παρόμοια σχέση ισχύει και για το μέτρο διάτμησης G (Σχήμα 4.4). Για το συνηθισμένο τσιμέντο Πόρτλαντ το E_g παίρνει τιμές κοντά στα 32 GPa, ενώ το G_g παίρνει τιμές κοντά στα 12 GPa.

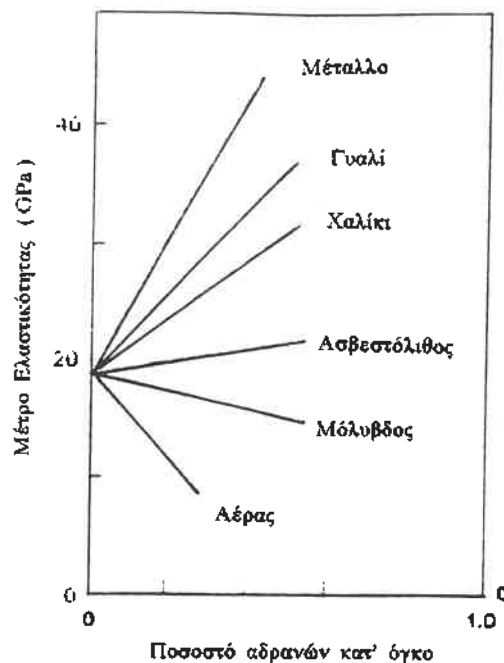
Η σχέση αντοχής — μέτρου ελαστικότητας και υγρασίας παρουσιάζει φα-

νερή ασυνέπεια. Έτσι η αντοχή του υγρού σκυροδέματος, είναι χαμηλότερη από την αντοχή του στεγνού σκυροδέματος, ενώ για το μέτρο ελαστικότητας ισχύει το αντίστροφο.



ΣΧΗΜΑ 4.4 Εξάρτηση του Μέρους Ελαστικότητας από το πορώδες του τσιμεντοπολτού.

Το μέτρο ελαστικότητας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την ποσότητα και την φύση των αδρανών (Σχήμα 4.5). Επειδή η τιμή του μέτρου ελαστικότητας εξαρτάται κατά ένα μέρος από την εξέλιξη των μικρορωγμών των δεσμών μεταξύ τσιμέντου και αδρανών, είναι γεγονός ότι το σχήμα, η υφή, και η τελική ποσότητα των αδρανών, θα επηρεάζουν την τιμή αυτή του μέτρου ελαστικότητας. Για παράδειγμα, ένα σκυρόδεμα από θραυστά πετρώματα, θα έχει μικρότερο μέτρο ελαστικότητας από ένα σκυρόδεμα με στρογγυλά αδρανή, όπως επίσης και ένα σκυρόδεμα που παράγεται με βάση ένα κατώτερο μέγιστο μέγεθος κόκκου αδρανούς.



ΣΧΗΜΑ 4.5 Η επιρροή του τύπου των αδρανών στο Μέτρο Ελαστικότητας του σκυροδέματος.

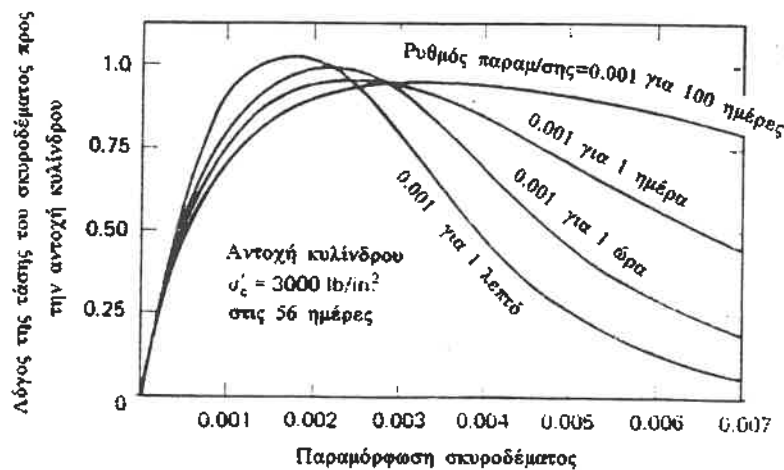
Το μηδενικό μέτρο ελαστικότητας των πόρων, καθώς και το πολύ χαμηλό των ελαφρών αδρανών επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό το τελικό μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος. Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας του ελαφροσκυροδέματος είναι το 40 έως 80 % αυτής του κοινού σκυροδέματος (Πίνακας 4.2). Ο τρόπος δημιουργίας των μικρορωγμών και η εξέλιξη τους, καθώς και η καμπύλη τάσεων — παραμορφώσεων είναι διαφορετικός στην περίπτωση του ελαφροσκυροδέματος. Η συγκέντρωση τάσεων στην περίπτωση αυτή είναι πολύ μικρότερη, με αποτέλεσμα η καμπύλη $\sigma - \epsilon$ να είναι περίπου γραμμική για ένα ευρύ πεδίο τάσεων. Έτσι η επιρροή του σχήματος των αδρανών, της υφής και της ποσότητας να είναι πολύ μικρή σε σχέση με το κοινό σκυρόδεμα. Για το ελαφροσκυρόδεμα είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί και η εξίσωση 4.η.

Ένα υψηλής αντοχής σκυρόδεμα έχει μια περισσότερο γραμμική καμπύλη $\sigma - \epsilon$ αλλά παρουσιάζει ένα υψηλότερο μέτρο ελαστικότητας περίπου κατά 40 GPa.

Η καμπύλη τάσεων — παραμορφώσεων και κατ' επέκταση το μέτρο ελαστικότητας, εξαρτώνται από τις συνθήκες ελέγχου που ακολουθούνται. Ένας σημαντικός παράγοντας είναι η ταχύτητα επιβολής του φορτίου (Σχήμα 4.6).

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.2 Μέτρα Ελαστικότητας των συστατικών του σκυροδέματος (GPa).

	Συνήθους Βάρους	Ελαφρού Βάρους
Αδρανή	70 — 140	14 — 35
Τσιμεντοπλοτός	7 — 28	7 — 28
Τσιμέντο	14 — 42	10 — 18

**ΣΧΗΜΑ 4.6** Καμπύλες τάσεων – παραμορφώσεων για διαφορετικούς ρυθμούς παραμόρφωσης από συγκεντρωμένη φόρτιση.

Εάν η τάση επιβάλλεται ακαριαία, τότε θα δημιουργηθούν πολύ λίγες μικρορωγμές πριν από την τελική αστοχία, και η καμπύλη τάσεων — παραμορφώσεων θα είναι σχεδόν γραμμική. Μειώνοντας τη διάρκεια φόρτισης κάτω από τα δύο λεπτά θα μειωθεί ταυτόχρονα και η παραμόρφωση κατά 15 έως 20 %. Ευτυχώς κατά την φυσιολογική χρονική κλίμακα που απαιτείται, για τον έλεγχο ενός δοκιμίου που είναι 2 έως 10 λεπτά, ο χρόνος επιβολής του φορτίου δεν επηρεάζει σημαντικά τα αποτελέσματα. Επιπλέον κάποιες αυξήσεις στην παραμόρφωση είναι δυνατό να πραγματοποιούνται, όταν τα φορτία επιβάλλονται πολύ αργά, πράγμα που μπορεί να θεωρηθεί ως επιπρόσθετος ερπυσμός.

Αν και υπάρχει συνεισφορά του ερπυσμού στις ελαστικές παραμορφώσεις, όπως προκύπτει από την δοκιμή θλίψης συνήθως αυτό αγνοείται για πρακτικούς λόγους.

4.6 ΔΥΝΑΜΙΚΟ ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Κατά τον προσδιορισμό του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας, το σκυρόδεμα υποβάλλεται σε πολύ μικρές παραμορφώσεις που μπορούν να θεωρηθούν τελείως ελαστικές. Για το λόγο αυτό το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας είναι περισσότερο παρόμοιο με το αρχικό μέτρο ελαστικότητας, παρά με το συμβατικό μέτρο ελαστικότητας, αλλά είναι περίπου 20 έως 30 % υψηλότερο από το αρχικό μέτρο. Το δυναμικό μέτρο ελαστικότητας χρησιμοποιείται βασικά για την εκτίμηση της ποιότητας του σκυροδέματος σε ελέγχους ανθεκτικότητας ή σε επί τόπου υπολογισμούς. Πάντως η χρήση του δυναμικού μέτρου ελαστικότητας είναι ιδιαίτερα κατάλληλη σε υπολογισμούς, που αφορούν στοιχεία κατασκευών από σκυρόδεμα τα οποία υποβάλλονται σε δυναμικά φορτία, όπως είναι ο σεισμός και η κρούση.

Το μέτρο διάτμησης G , το οποίο χαρακτηρίζει τη συμπεριφορά του σκυροδέματος στις διατμητικές τάσεις, είναι δύσκολο να προσδιορισθεί απευθείας από μετρήσεις τάσεων — παραμορφώσεων. Ο καθορισμός του γίνεται μάλλον με δυναμικές μεθόδους, όπως είναι η χρήση ηχητικών συχνοτήτων και η επιβολή στρεπτικών τάσεων σε στοιχεία από σκυρόδεμα.

Ο λόγος του Poisson μ μπορεί να υπολογισθεί απευθείας από μετρήσεις παραμόρφωσης σε μονοαξονική θλίψη. Επίσης ο λόγος του Poisson μπορεί να υπολογισθεί με δυναμικές μεθόδους. Για κορεσμένο σε νερό σκυρόδεμα ο λόγος του Poisson κυμαίνεται μεταξύ 0,2 και 0,3 ενώ για το στεγνό υλικό μειώνεται σε 0,18. Για διαφορετικά σκυροδέματα ο λόγος του Poisson παίρνει τιμές που κυμαίνονται μεταξύ 0,15 και 0,20. Όταν χρησιμοποιούνται δυναμικές μέθοδοι, οι τιμές του μέτρου του Poisson είναι υψηλότερες, ξεπερνώντας το 0,24, τιμή η οποία είναι περισσότερο αντιπροσωπευτική για την ελαστική συμπεριφορά του υλικού. Το μέτρο ελαστικότητας K του τσιμέντου κυμαίνεται από 3,5 GPa στις υψηλές τιμές πορώδους, έως 20 GPa για τις πολύ χαμηλές τιμές.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5ο

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

5.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρεται η ερευνητική προσπάθεια που έγινε ώστε να μελετηθεί η συμπεριφορά του ελαφροσκυροδέματος που έχει ως αδρανή κόκκους από διογκωμένη πολυστερίνη.

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι να γίνει μια πρώτη προσέγγιση των χαρακτηριστικών αυτού του τύπου ελαφροσκυροδέματος, και συγκεκριμένα να προσδιοριστεί η θλιπτική αντοχή, η εφελκυστική αντοχή και το μέτρο ελαστικότητας του υλικού. Επιπλέον να γίνει καταγραφή χρήσιμων παρατηρήσεων και συμπερασμάτων που αφορούν τα παραπάνω χαρακτηριστικά, τις αναλογίες σύνθεσης, καθώς και την συμπεριφορά του υλικού κατά την ανάμιξη.

Τα υλικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν κατά την παρασκευή των μιγμάτων είναι τα εξής:

α) Τσιμέντο Πόρτλαντ ΙΙ35, Ι55

β) Διογκωμένη πολυστερίνη εμπορίου σε χύδην μορφή με διάμετρο κόκκων που κυμαίνεται μεταξύ 2 — 7 mm.

γ) Νερό από το δίκτυο ύδρευσης της πόλης των Αθηνών.

δ) Σε ορισμένα μίγματα χρησιμοποιήθηκαν πρόσθετα υλικά τα οποία αναφέρονται αναλυτικά στις επιμέρους παραγράφους.

Τα μίγματα παρασκευάσθηκαν με βάση δύο λόγους:

α) Το λόγο νερού / τσιμέντο (N / T)

β) Το λόγο αδρανή / τσιμεντοπολτό (Α / Π)

Οι παραπάνω λόγοι είναι κατά βάρος αναλογίες των συστατικών υλικών. Η ζύγιση των αδρανών έγινε σε ζυγαριά ακριβείας επειδή τα αδρανή είναι εξαιρετικά ελαφριά, περίπου 12 kg/m^3 .

Μετά την ανάμιξη κάθε μίγματος και την τοποθέτηση του υλικού σε καλούπια, αυτά δονήθηκαν για χρόνο 10 sec πάνω σε δονητική τράπεζα. Τα δοκίμια παρέμειναν στα καλούπια για 24 ώρες έχοντας καλυμμένη την άνω επιφάνεια τους από ένα φύλλο ναύλο. Στην συνέχεια απομακρύνθηκαν τα καλούπια και τα δοκίμια αφού ζυγίστηκαν τοποθετήθηκαν σε ειδικό θάλαμο συντήρησης στον οποίο η θερμοκρασία ήταν $21 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ και η σχετική υγρασία ήταν μεγαλύτερη από 95%.

5.2 ΑΡΧΙΚΑ ΜΙΓΜΑΤΑ

Εξαιτίας του ότι στην χώρα μας η χρήση του συγκεκριμένου ελαφροσκυροδέματος δεν είναι διαδεδομένη, δεν υπάρχουν επαρκή στοιχεία τόσο για τις αναλογίες σύνθεσης όσο και για τον τρόπο ανάμιξης των συστατικών του υλικού. Για τον λόγο αυτό παρασκευάστηκε μια σειρά από αρχικά μίγματα με σκοπό να προσδιορισθούν τα όρια αναλογιών των συστατικών υλικών, καθώς και του λόγου νερού / τσιμέντο (N / T), έτσι ώστε σε κάθε περίπτωση το υλικό να μην παρουσιάζει φαινόμενα απόμιξης κατά την δόνηση του.

Από κάθε μίγμα παρασκευάστηκαν 3 κυβικά δοκίμια ακμής 10cm. Η διαμόρφωση της άνω επιφάνειας των δοκιμίων έγινε με μυστρί. Η μέτρηση της θλιπτικής αντοχής των 3 κυβικών δοκιμίων κάθε μίγματος έγινε στις 7 ημέρες από την ημέρα της παρασκευής του.

Η μηχανή θραύσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν μία υδραυλική πρέσα μεγίστου φορτίου 60 tn κατάλληλη για δοκιμές θλίψης κοινού σκυροδέματος. Η ταχύτητα φόρτισης των κυβικών δοκιμίων ακμής 10 cm ήταν 2 kN/s .

Κατά την δοκιμή θλίψης τα κυβικά δοκίμια τοποθετήθηκαν με τέτοιο τρόπο ώστε οι επιφάνειες του κύβου που έρχονται σε επαφή με τις επιφάνειες φόρτισης της μηχανής, να είναι εκείνες που έρχονται σε επαφή με τις κάθετες πλευρές του καλουπιού. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η επιπε-

δότητα των επιφανειών φόρτισης των δοκιμίων, ενώ παράλληλα η μετρούμενη αντοχή αποτελεί μια μέση τιμή μεταξύ της αντοχής της άνω περιοχής του δοκιμίου (ασθενής περιοχή) και της αντοχής της κάτω περιοχής του δοκιμίου (ισχυρή περιοχή).

5.2.1 ΜΙΓΜΑΤΑ 1 — 10

Στα μίγματα αυτά χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο τύπου Π35 και η ανάμιξη των υλικών έγινε με τα χέρια χρησιμοποιώντας μυστρί μέσα σε ειδικό δοχείο χωρίς την χρήση αναμικτήρα.

Στα μίγματα αυτά δεν χρησιμοποιήθηκαν υπερρευστοποιητικά καθώς και πρόσθετα υλικά

Στον **ΠΙΝΑΚΑ 1** που ακολουθεί δίνονται οι αναλογίες των υλικών, τα φαινόμενα βάρη των δοκιμίων καθώς και η θλιπτική αντοχή αυτών στις 7 ημέρες.

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΡΧΙΚΩΝ ΜΙΓΜΑΤΩΝ 1-10							
Α / Α		ΛΟΓΟΣ N / T	ΛΟΓΟΣ Α / Π	ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΒΑΡΟΣ	Μ.Ο	ΑΝΤΟΧΗ ΘΛΙΨΗΣ	Μ.Ο
				(gr / cm ³)	(gr / cm ³)	(MPa)	(MPa)
M1	Δ1	0.43	0.018	0.407	0.456	0.633	0.731
	Δ2			0.477		0.476	
	Δ3			0.485		1.093	
M2	Δ1	0.40	0.009	0.784	0.791	3.009	2.686
	Δ2			0.833		2.990	
	Δ3			0.755		2.060	
M3	Δ1	0.40	0.018	0.408	0.419	0.345	0.395
	Δ2			0.404		0.370	
	Δ3			0.444		0.470	
M4	Δ1	0.35	0.018	0.446	0.427	0.467	0.386
	Δ2			0.406		0.387	
	Δ3			0.429		0.305	
M5	Δ1	0.35	0.009	0.820	0.826	2.915	2.700
	Δ2			0.802		2.042	
	Δ3			0.857		3.142	
M6	Δ1	0.30	0.009	0.817	0.813	4.505	4.360
	Δ2			0.798		3.967	
	Δ3			0.824		4.608	
M7	Δ1	0.30	0.018	0.470	0.467	0.434	0.511
	Δ2			0.460		0.517	
	Δ3			0.471		0.582	
M8	Δ1	0.30	0.007	0.961	0.957	6.420	6.220
	Δ2			0.959		6.050	
	Δ3			0.951		6.200	
M9	Δ1	0.35	0.007	0.942	0.929	5.200	4.990
	Δ2			0.943		5.460	
	Δ3			0.903		4.310	
M10	Δ1	0.40	0.007	0.922	0.931	4.620	5.100
	Δ2			0.935		5.060	
	Δ3			0.937		5.610	

5.2.1.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παραγωγή των 10 πρώτων μιγμάτων καθώς και η θραύση των 3 δοκιμών του κάθε μίγματος οδήγησαν στα ακόλουθα συμπεράσματα :

1. Εξαιτίας του μικρού βάρους των αδρανών παρατηρήθηκαν φαινόμενα απόμειξης του υλικού κατά την δόνηση των δοκιμών με αποτέλεσμα την κάθιση του τσιμεντοπολτού στο κάτω τμήμα του δοκιμίου. Τέτοια φαινόμενα ήταν ιδιαίτερα έντονα στα μίγματα εκείνα τα οποία είχαν μεγάλο σχετικό λόγο N/T κοντά στην τιμή 0.40 (μίγματα 1, 3, 10).

2. Όσο ο λόγος αδρανή / πολτός αυξάνεται τόσο πιο δύσκολη γίνεται η ανάμιξη του υλικού αφού δεν υπάρχει αρκετή ποσότητα τσιμεντοπολτού για να περιβάλλει τα μόρια των αδρανών. Για τιμές του λόγου A/Π άνω του 18% η ανάμιξη του υλικού είναι πολύ δύσκολη όπως επίσης και η συμπύκνωση. Για τιμές του λόγου A/Π μεταξύ 15 και 18 % το ελαφροσκυρόδεμα που προκύπτει παρουσιάζει πολύ μικρές αντοχές, αλλά λόγω του μεγάλου πορώδους του έχει πολύ καλές θερμομονωτικές ιδιότητες.

3. Όσο μειώνεται ο λόγος αδρανή / πολτός τόσο αυξάνεται η πυκνότητα του ελαφροσκυροδέματος. Αποτέλεσμα της αύξησης της πυκνότητας του υλικού ήταν και η αύξηση της μετρούμενης θλιπτικής αντοχής. Η μέγιστη θλιπτική αντοχή που παρατηρήθηκε είναι 6.22 MPa (Μίγμα 8).

4. Η μείωση του λόγου N/T οδηγεί σε αύξηση της θλιπτικής αντοχής του υλικού ιδιαίτερα σε μικρές τιμές του λόγου αδρανή / πολτός. Ωστόσο για μεγάλες τιμές του λόγου A/Π (18 %), εξαιτίας της ανομοιομορφίας στη μάζα του υλικού, μείωση της τιμής του λόγου N/T δεν έχει πάντα ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής του.

5.2.2 ΜΙΓΜΑΤΑ 11 — 35

Τα μίγματα αυτά έγιναν έτσι ώστε να αποκτήσουμε μια πληρέστερη εικόνα για τη συμπεριφορά του υλικού σε τιμές του λόγου N/T μικρότερες του 0.30 και κυρίως για να πετύχουμε αύξηση της θλιπτικής αντοχής. Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν ρευστοποιητικά τόσο σε υγρή μορφή όσο και μορφή σκόνης. Οι δύο τύποι ρευστοποιητικών ήταν το RH2000 και το ADDIMENT αντίστοιχα. Η ποσότητες των ρευστοποιητικών ανάλογα με τη μορφή τους υπολογίσθηκαν σαν ποσοστό της ποσότητας του νερού ή του τσιμέντου. Σε ορισμένα μίγματα έγινε προσθήκη ποσότητας *microsilica* σε ποσοστό 10 % της ποσότητας του τσιμέντου, για να εξεταστεί η επίδρασή της στην αύξηση της θλιπτικής αντοχής του υλικού.

Επειδή η ανάμιξη του υλικού με τα χέρια παρουσίαζε μεγάλη δυσκολία εξαιτίας του μικρού λόγου N/T , χρησιμοποιήθηκε ένα περιστροφικό διατρητικό μηχάνημα (BLACK AND DECKER) στην κεφαλή του οποίου προσαρμόσθηκε ειδικό μεταλλικό στέλεχος ίδιο μ' αυτό που φέρουν τα *mixer* οικιακής χρήσης.

Επίσης παρασκευάσθηκαν και κυβικά δοκίμια ακμής 7 cm από τσιμεντοπολτό για λόγους N/T ίδιους με αυτούς των δοκιμών από ελαφροσκυρόδεμα. Αυτό έγινε για να συγκριθούν οι αντοχές των δοκιμών από ελαφρόσκυρόδεμα με τις αντοχές του αντίστοιχου τσιμεντοπολτού. Βέβαια δεν μπορούμε να έχουμε πλήρη συγκριτικά αποτελέσματα μεταξύ αυτών των δύο κατηγοριών, λόγω των διαφορετικών διαστάσεων των δύο τύπων δοκιμών. Ωστόσο τα αποτελέσματα που προέκυψαν, είναι ενδεικτικά της απώλειας αντοχής και της μείωσης της πυκνότητας που παρουσιάζει το υλικό, όσο αυξάνεται η ποσότητα των αδρανών μέσα στο μίγμα.

Στα μίγματα 11, 12, 13 χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο Π35 ενώ στα υπόλοιπα χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο Ι55. Η δόνηση και η ωρίμανση των δοκιμών έγινε σύμφωνα με τις διαδικασίες που αναφέρθηκαν στην εισαγωγή.

Στον ΠΙΝΑΚΑ 2 που ακολουθεί δίνονται οι αναλογίες ανάμιξης, τα ποσοστά των πρόσθετων υλικών, τα φαινόμενα βάρη των δοκιμών καθώς και η θλιπτική αντοχή τους στις 7 ημέρες.

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΡΧΙΚΩΝ ΜΙΓΜΑΤΩΝ 11-35

A/A	ΛΟΓΟΣ N / T	ΛΟΓΟΣ A / Π	ΡΕΥΣΤΟ- ΠΟΙΗΤΙΚΟ	MICRO SILICA	ΦΑΙΝΟ. ΒΑΡΟΣ	M.O	ΑΝΤΟΧΗ ΘΛΙΨΗΣ	M.O
			%	%T	(gr/cm ³)	(gr/cm ³)	(MPa)	(MPa)
Π11	Δ1 Δ2 Δ3	0.35	0.018	RH2000 1%	0 0.454 0.444 0.438	0.446	0.810 0.834 0.805	0.816
Π12	Δ1 Δ2 Δ3	0.35	0.018	ADDIMENT 2%	0 0.441 0.455 0.442	0.446	0.684 0.898 0.758	0.780
Π13	Δ1 Δ2 Δ3	0.30	0.018	RH2000 2%	0 0.407 0.420 0.392	0.406	0.503 0.727 0.610	0.613
Π14	Δ1 Δ2 Δ3	0.30	0.018	RH2000 2,5%	10%T 0.382 0.369 0.462	0.404	0.743 0.650 0.780	0.724
Π15	Δ1 Δ2 Δ3	0.30	0.018	ADDIMENT 2.50%	10%T 0.443 0.414 0.386	0.414	0.718 0.654 0.659	0.677
Π16	Δ1 Δ2 Δ3	0.30	0.009	RH2000 2%	10%T 0.737 0.813 0.762	0.771	4.376 5.750 4.020	4.720
Π17	Δ1 Δ2 Δ3	0.30	0.009	ADDIMENT 3%	10%T 0.813 0.801 0.798	0.804	5.700 5.520 4.004	5.610
Π18	Δ1 Δ2 Δ3	0.30	0.0135	RH2000 2%	10%T 0.640 0.530 0.628	0.600	2.609 1.012 2.411	2.010
Π19	Δ1 Δ2 Δ3	0.30	0.0135	ADDIMENT 3%	10%T 0.678 0.663 0.68	0.674	2.963 2.729 3.008	2.900
Π20	Δ1 Δ2 Δ3 Δ4	0.28	0.005	RH2000 1.11%	10%T 1.106 1.105 1.045 1.183	1.110	11.860 12.730 10.360 14.790	12.435
Π21	Δ1 Δ2 Δ3	0.30	0.0155	RH2000 0.75%	10%T 0.469 0.477 0.458	0.468	0.820 0.743 0.766	0.776
Π22	Δ1 Δ2 Δ3	0.25	0.009	RH2000 1.50%	10%T 0.864 0.816 0.841	0.840	7.430 6.420 7.820	7.220

ΠΙΝΑΚΑΣ 2

A/A	ΛΟΓΟΣ N / T	ΛΟΓΟΣ A / Π	ΡΕΥΣΤΟ- ΠΟΙΗΤΙΚΟ %	MICRO SILICA %T	ΦΑΙΝΟ. ΒΑΡΟΣ (gr/cm ³)	M.O (gr/cm ³)	ΑΝΤΟΧΗ ΘΛΙΨΗΣ (MPa)	M.O (MPa)	
Π23	Δ1 Δ2 Δ3 Δ4	0.3 0	RH2000 0.30%	10%T	2.041 1.983 1.983 1.953	1.990	58.450 58.490 55.290 54.9	56.780	
Π24	Δ1 Δ2 Δ3	0.25 0.009	RH2000 2%	0					
Π25	Δ1 Δ2 Δ3	0.25 0	RH2000 1.20%	0	2.187 2.157 2.216	2.187	76.000 76.700 74.390	75.700	
Π26	Δ1 Δ2 Δ3	0.25 0	RH2000 1%	10%T	2.100 2.128 2.070	2.099	67.530 65.880 66.350	66.590	
Π27	Δ1 Δ2 Δ3	0.3 0	RH2000 0.50%	0	2.157 2.040 2.070	2.090	66.920 59.800 62.370	63.030	
Π28	Δ1 Δ2 Δ3	0.3 0.0135	RH2000 0.50%	0	0.509 0.511 0.539	0.520	1.374 1.147 1.090	1.204	
Π29	Δ1 Δ2 Δ3	0.28 0.005	RH2000 1.20%	0					
Π30	Δ1 Δ2 Δ3	0.28 0.009	RH2000 0.50%	10%T	0.810 0.823 0.814	0.816	5.600 5.900 60.5	5.850	
Π31	Δ1 Δ2 Δ3	0.28 0.009	RH2000 0.50%	0	0.767 0.778 0.788	0.777	4.994 5.192 5.520	5.235	
Π32	Δ1 Δ2 Δ3	0.28 0	RH2000 0.50%	0	2.157 2.128 2.157	2.148	68.760 62.490 67.510	66.250	
Π33	Δ1 Δ2 Δ3	0.28 0	RH2000 0.50%	10%T	2.070 1.983 1.983	2.010	68.370 62.710 64.900	65.330	
Π34	Δ1 Δ2 Δ3	0.25 0.009	RH2000 1.10%	0	0.879 0.887 0.872	0.879	7.670 7.950 7.630	7.750	
Π35	Δ1 Δ2 Δ3 Δ4	0.28 0.005	RH2000 1%	0	1.133 1.134 1.124 1.146	1.134	12.000 12.300 12.710 12.330	12.335	

5.2.2.1 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα συμπεράσματα στα οποία οδηγούμαστε μετά την παρασκευή των μιγμάτων 11 — 35 καθώς και μετά τη θραύση των αντίστοιχων δοκιμών είναι τα ακόλουθα :

1. Η χρήση των ρευστοποιητικών διευκόλυνε σε μέταλλο βαθμό την διαδικασία της ανάμιξης του τσιμεντοπολτού ιδιαίτερα όταν ο λόγος N/T ήταν μεταξύ των τιμών 0.25 και 0.30. Ωστόσο η χρήση των ρευστοποιητικών επέφερε σε ορισμένες περιπτώσεις κάθιση του τσιμεντοπολτού κατά την ανάμιξη του ελαφροσκυροδέματος και απόμειξη του υλικού κατά την δόνηση. Τέτοια φαινόμενα παρατηρήθηκαν στα μίγματα 24 και 29, τα οποία επαναλήφθηκαν με την απαιτούμενη μείωση του ποσοστού του ρευστοποιητικού.

2. Η χρήση του μηχανικού μέσου οδήγησε σε πολύ καλή ανάμιξη του τσιμεντοπολτού όπου δεν παρατηρήθηκαν καθόλου σβώλοι μη ενυδατωμένου τσιμέντου. Το γεγονός αυτό επέφερε θετικά αποτελέσματα στην αύξηση της αντοχής των δοκιμών του υλικού.

3. Από τα αποτελέσματα της δοκιμής για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής των δοκιμών παρατηρείται ότι τα μίγματα τα οποία περιέχουν *microsilica* δεν παρουσιάζουν ιδιαίτερα μεγαλύτερη αντοχή από εκείνα τα οποία παρασκευάστηκαν με τις ίδιες αναλογίες αλλά χωρίς *microsilica*. Αυτό μάλλον οφείλεται στο γεγονός ότι η *microsilica* αρχίζει να επιδρά θετικά στην θλιπτική αντοχή μετά τις δύο πρώτες εβδομάδες από την παρασκευή του υλικού.

4. Από τα δύο ρευστοποιητικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για να διευκολύνουν την ανάμιξη του υλικού, η χρήση του ADDIMENT είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θλιπτικής αντοχής των δοκιμών σε σχέση με το RH2000 για τα ίδια ακριβώς μίγματα (Μίγματα 16 και 17, 18 και 19).

5. Τα μίγματα στα οποία το ποσοστό των αδρανών ήταν περίπου 18 %/100 παρουσιάζουν μεγάλη διασπορά στις τιμές της θλιπτικής αντοχής ανεξάρτητα από την τιμή του λόγου N/T και των πρόσθετων υλικών (Μίγματα 11, 12, 13, 14, 15). Αντίθετα στα μίγματα με λόγο A/Π μικρότερο του 10 %/100,

μία αύξηση του λόγου N/T επιφέρει μείωση της θλιπτικής αντοχής του ελαφροσκυροδέματος.

5.2.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΑΡΧΙΚΩΝ ΜΙΓΜΑΤΩΝ — ΣΧΟΛΙΑ

Επειδή τα αρχικά μίγματα είχαν σαν βασικό σκοπό την καταγραφή γενικών παρατηρήσεων και συμπερασμάτων για τον συγκεκριμένο τύπο ελαφροσκυροδέματος, παρασκευάσθηκε μια σειρά μιγμάτων στα οποία οι αναλογίες σύνθεσης και τα πρόσθετα υλικά μεταβάλλονταν από μίγμα σε μίγμα. Έτσι προέκυψε η ανάγκη να ομαδοποιηθούν ορισμένα μίγματα με βάση τα σημαντικότερα χαρακτηριστικά τους (π.χ. λόγος A/Π , λόγος N/T), για την δημιουργία κάποιων διαγραμμάτων στα οποία θα απεικονίζονται ορισμένα από τα παραπάνω συμπεράσματα των παραγράφων 5.2.1.1 και 5.2.2.1.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1

Στο διάγραμμα αυτό δίνεται η σχέση ανάμεσα στην πυκνότητα του ελαφροσκυροδέματος και της αντοχής του. Για την κατασκευή του διαγράμματος αυτού χρησιμοποιήθηκαν τα αποτελέσματα όλων των μετρήσεων, ανεξάρτητα από τις αναλογίες σύνθεσης και τα πρόσθετα υλικά των μιγμάτων. Όπως έχει ήδη αναφερθεί αύξηση της πυκνότητας έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της αντοχής του υλικού.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2

Το διάγραμμα αυτό παίρνει τιμές από τα αποτελέσματα των μετρήσεων που αφορούν μίγματα με λόγο $N/T=0.30$ ανεξάρτητα των αναλογιών σύνθεσης και των πρόσθετων υλικών. Παρατηρούμε μια συνεχή αύξηση της αντοχής του υλικού με την αύξηση της ποσότητας του τσιμέντου στο 1 m^3 , όπως συμβαίνει και στο κοινό σκυρόδεμα. Παρατηρείται ότι πέραν ενός ορίου ποσότητας τσιμέντου ανά m^3 , ο ρυθμός αύξησης της αντοχής φαίνεται ότι μειώνεται.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.3

Με το διάγραμμα αυτό επιβεβαιώνεται η μεγάλη ανομοιογένεια στη μάζα του υλικού όταν ο λόγος A / Π ισούται με 18 ‰. Παρατηρούμε ότι η τιμή του λόγου N / T δεν παίζει κανένα ρόλο στην τιμή της αντοχής του υλικού. Αυτό συμβαίνει διότι σ' αυτή την περίπτωση η ποσότητα του τσιμεντοπολτού δεν επαρκεί να περιβάλει πλήρως τα αδρανή, με αποτέλεσμα να δημιουργούνται ζώνες ασυνέχειας του τσιμεντοπολτού στον οποίο οφείλεται η αντοχή του υλικού, λόγο της μηδενικής αντοχής του αδρανούς.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ 5.4 — 5.5

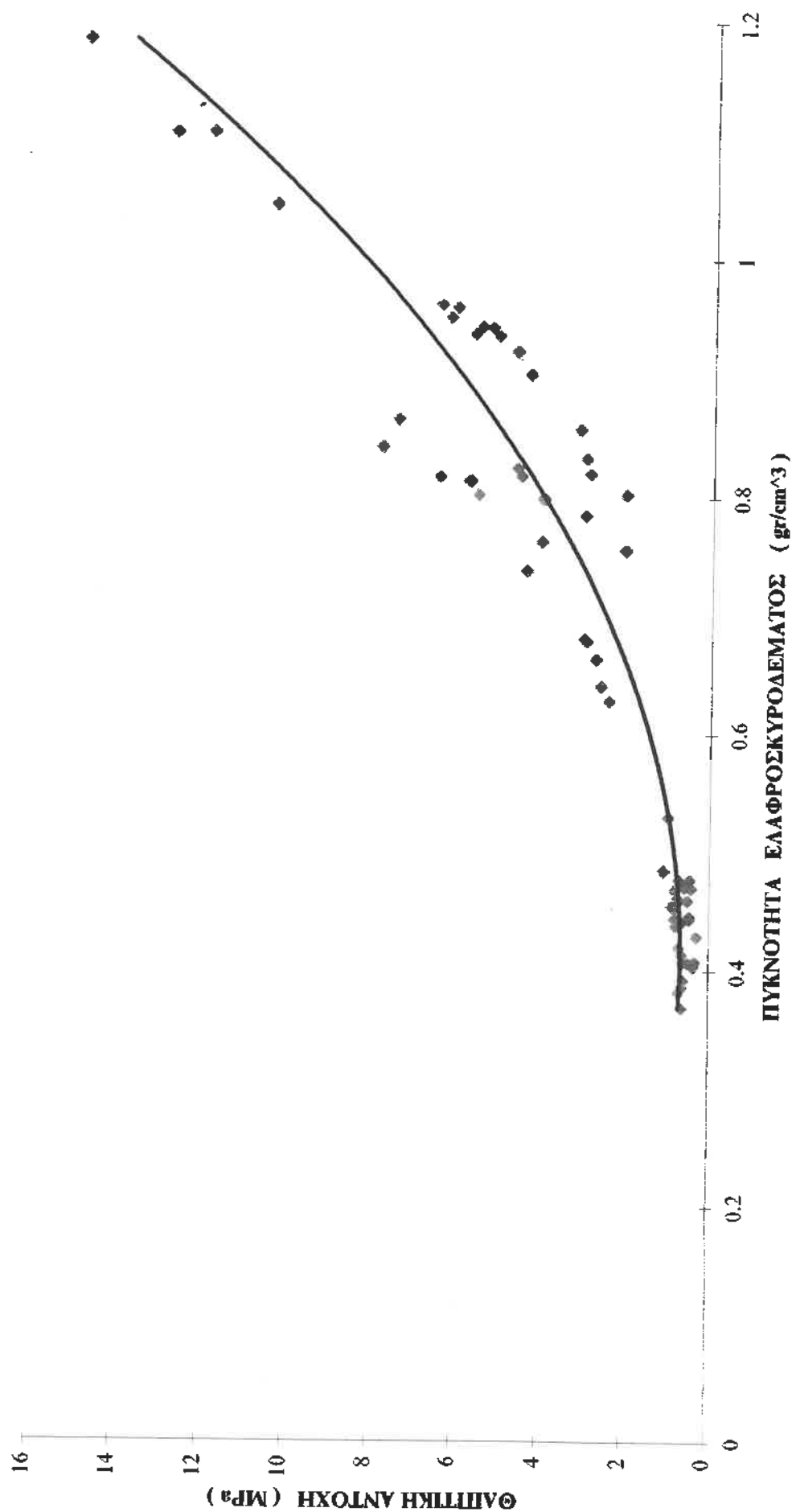
Στα διαγράμματα αυτά δίνεται η μεταβολή της θλιπτική αντοχής συναρτήσει του λόγου N / T για τα μίγματα που έχουν λόγο $A / \Pi = 9$ και 7 ‰ αντίστοιχα. Αντίθετα με ότι παρατηρείται στο προηγούμενο διάγραμμα, στα διαγράμματα αυτά η μεταβολή της θλιπτικής αντοχής σε σχέση με την διακύμανση του λόγου N / T είναι ανάλογη της μεταβολής της αντοχής του κοινού σκυροδέματος.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.6

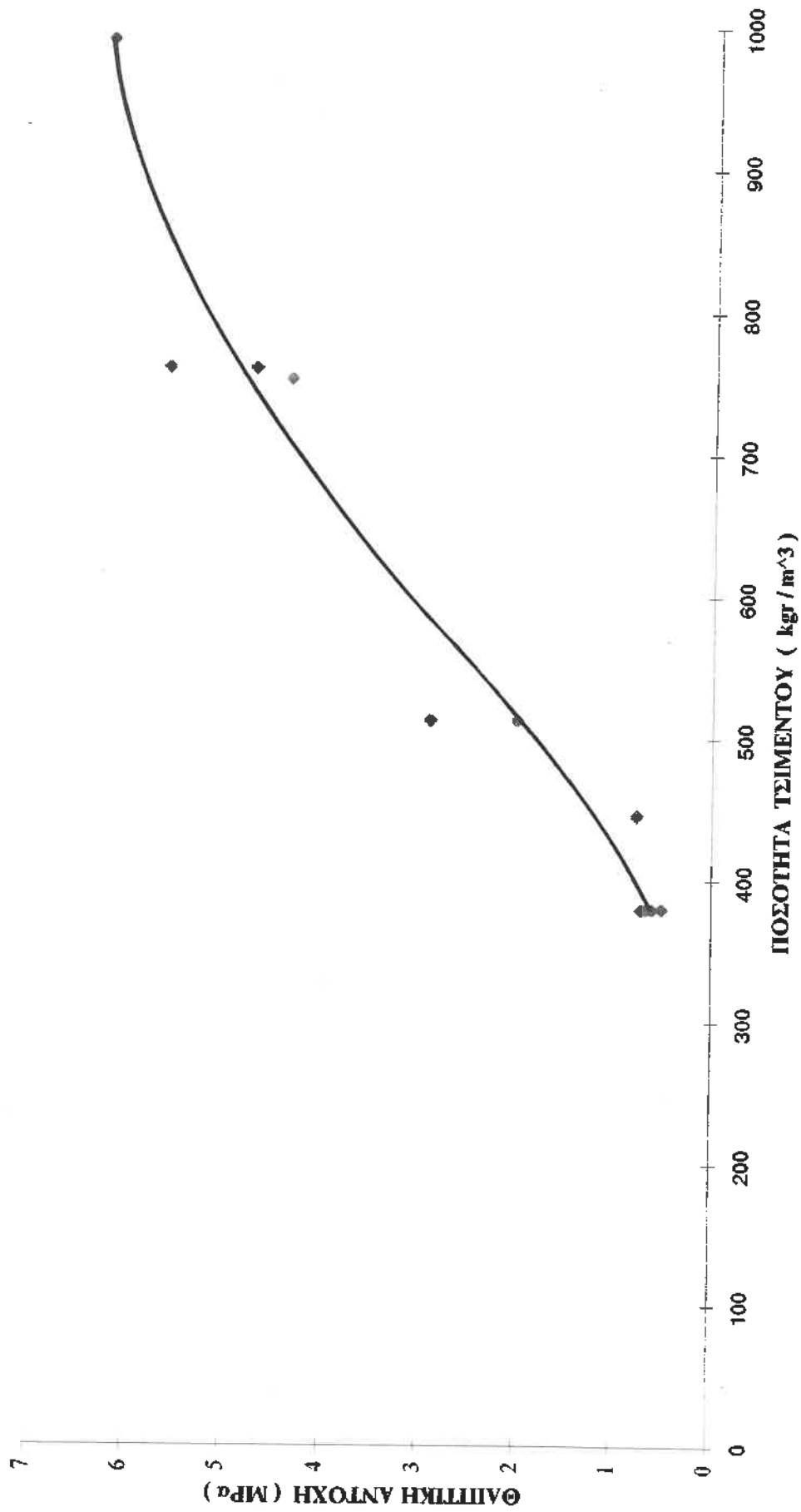
Στο διάγραμμα αυτό απεικονίζεται η μείωση της αντοχής του τσιμεντοπολτού με την αύξηση της τιμής του λόγου N / T .

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.1

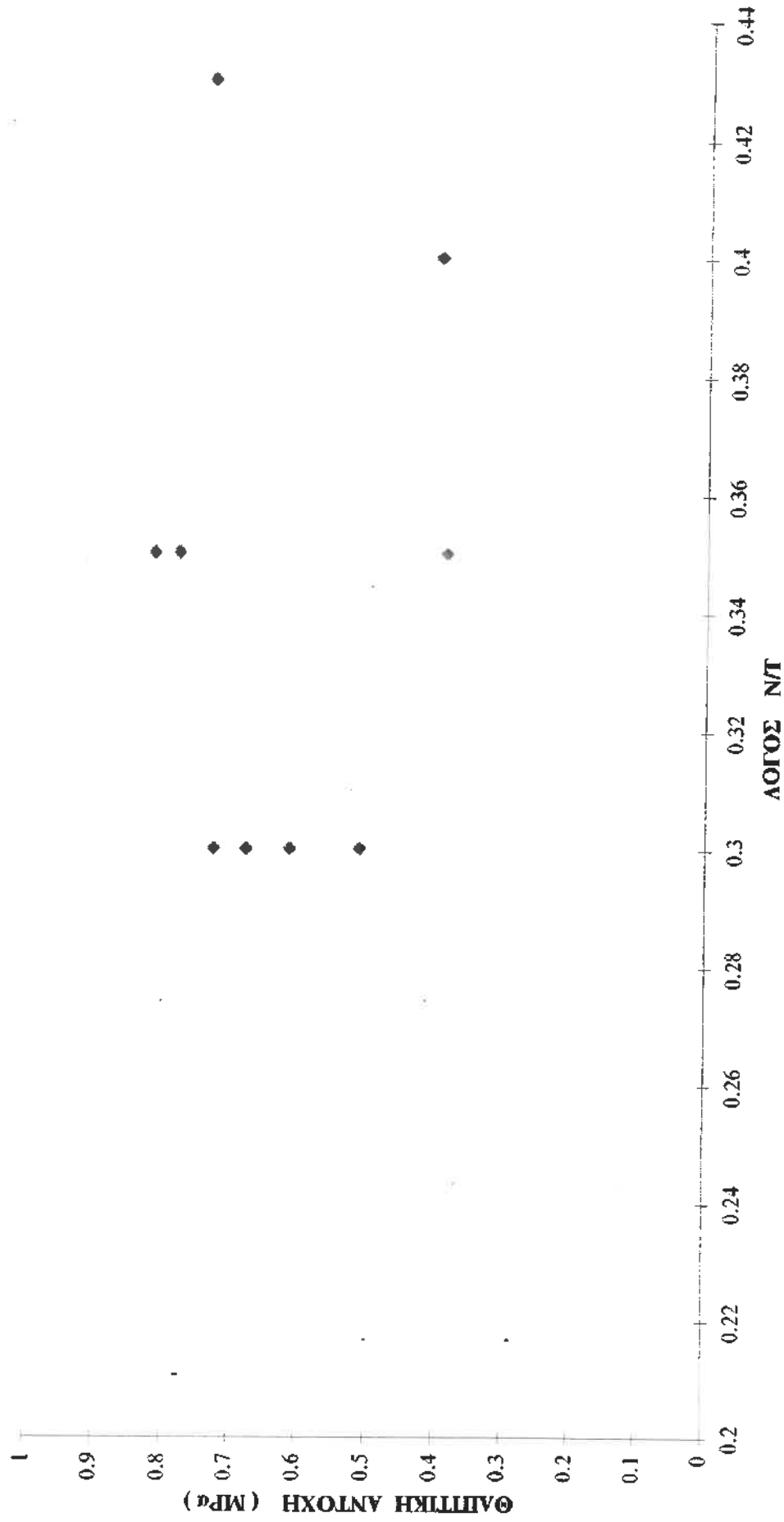
ΘΑΛΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ - ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ ΕΛΑΦΡΟΣΚΥΡΩΔΕΜΑΤΟΣ



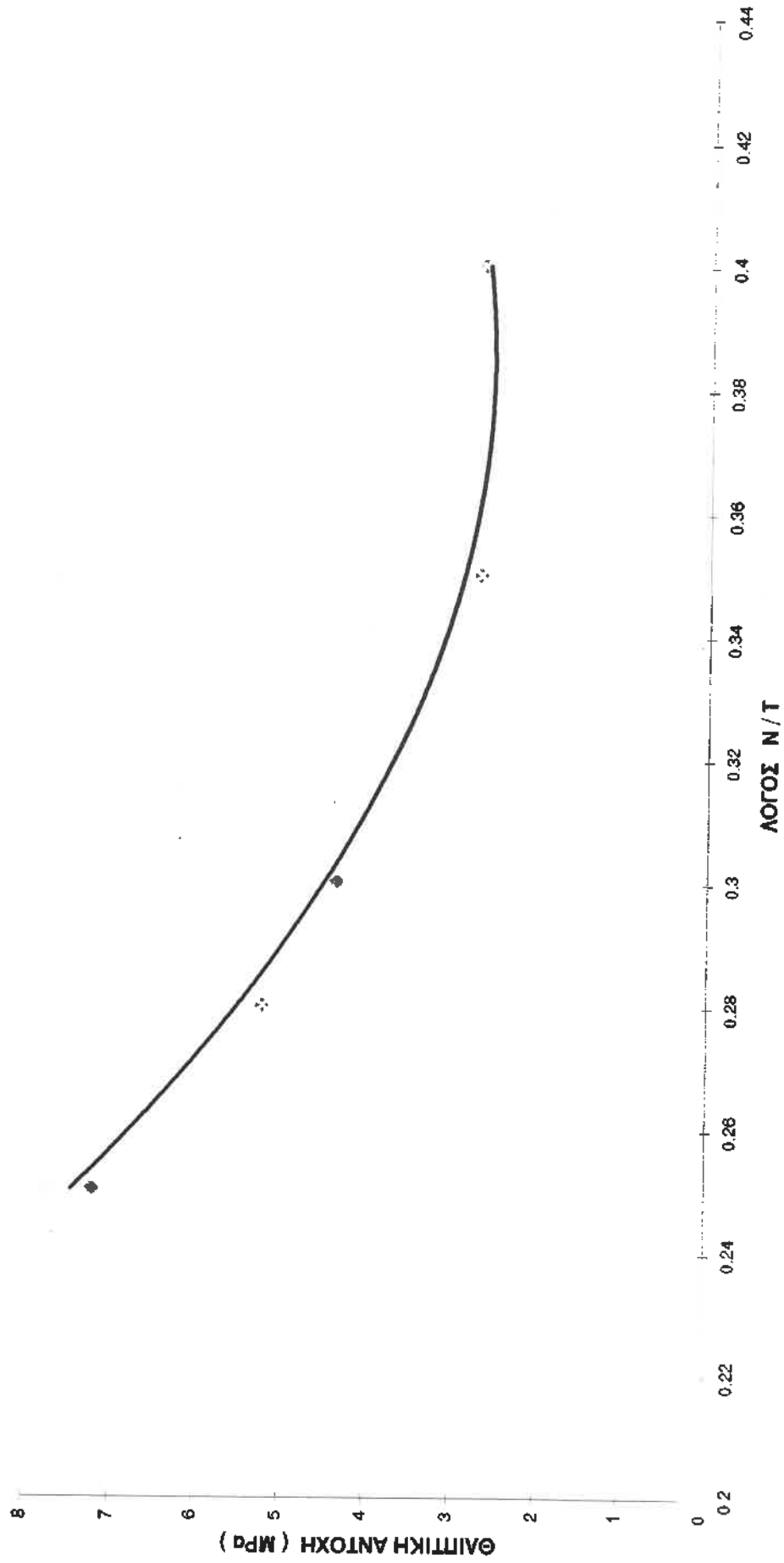
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.2

ΘΑΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ - ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΓΙΑ ΛΟΓΟ $N/T=0,30$ 

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.3

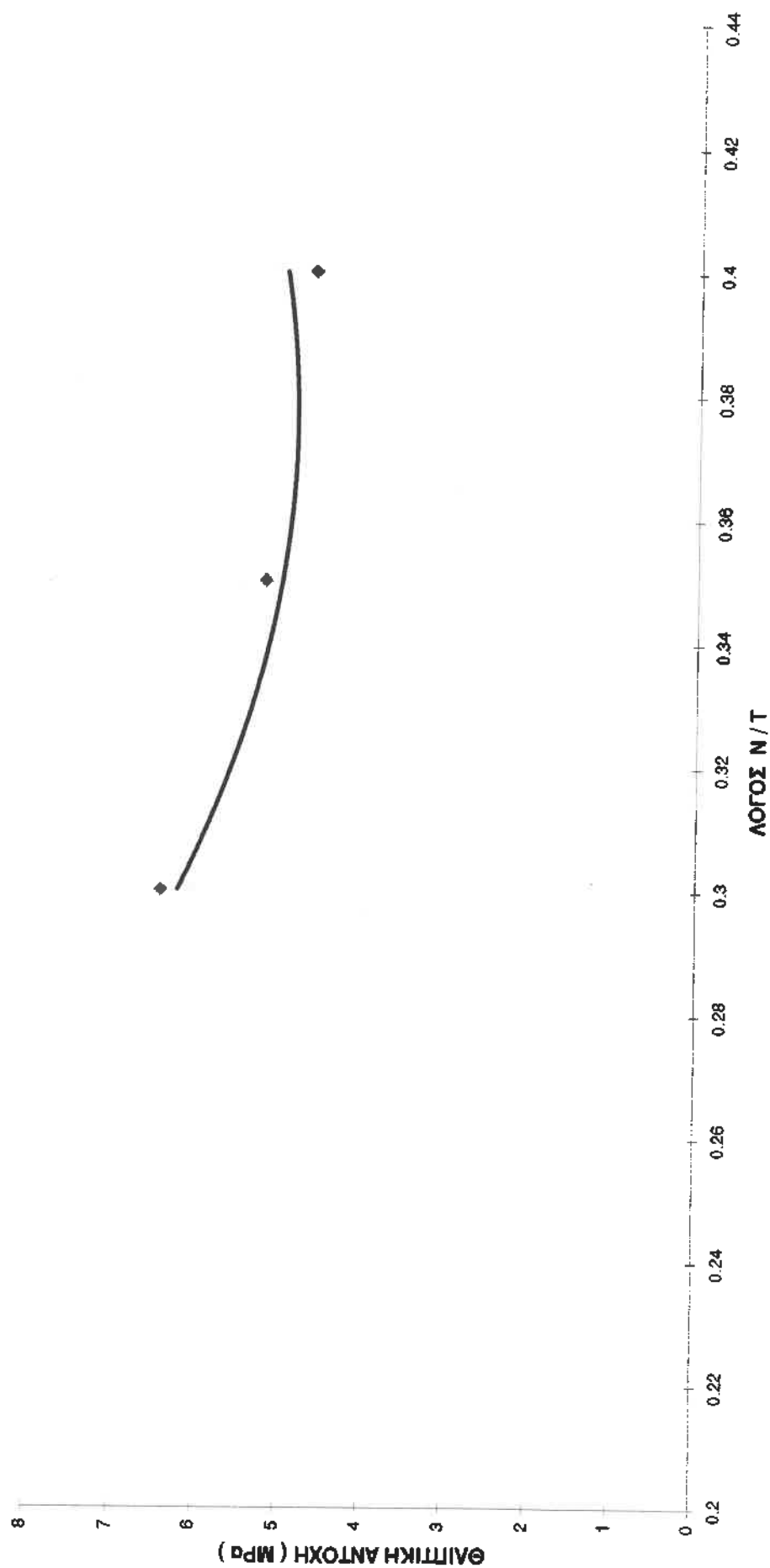
ΘΑΛΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ – ΛΟΓΟΣ N/T ΓΙΑ ΛΟΓΟ $A/\Pi = 18 \nu /_{\infty}$ 

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.4

ΑΝΤΟΧΗ ΘΛΙΨΗΣ - ΛΟΓΟΣ N/T ΓΙΑ ΛΟΓΟ $A/\Pi = 9^\circ / \infty$ 

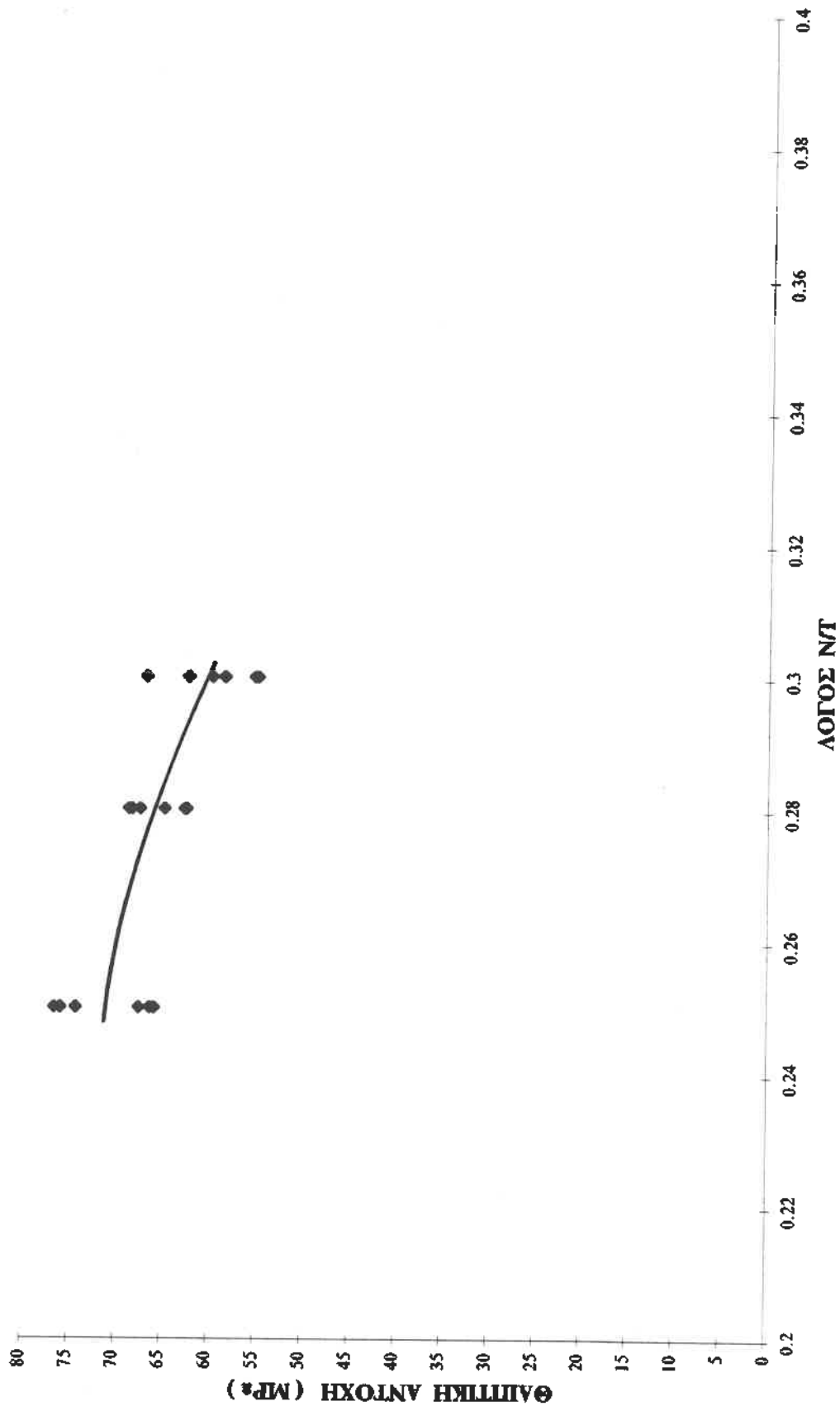
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.5

ΕΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ - ΛΟΓΟΣ N/T ΓΙΑ ΛΟΓΟ $A/\Pi = 7^\circ / \infty$



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.6

ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ - ΛΟΓΟΣ Ν/Τ ΓΙΑ ΔΟΚΙΜΙΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΠΟΛΑΤΟΥ ΑΚΜΗΣ 7cm



5.3 ΚΥΡΙΑ ΕΡΕΥΝΑ — ΜΙΓΜΑΤΑ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ

Από τα αρχικά μίγματα έγινε φανερό ότι δεν μπορούμε να μιλάμε για "ένα μίγμα σχεδιασμού" αλλά για "μίγματα σχεδιασμού", αφού κάθε φορά το ελαφροσκυρόδεμα θα πρέπει να ικανοποιεί διαφορετικές απαιτήσεις ανάλογα με το σκοπό για τον οποίο παράγεται. Έτσι αν θέλουμε ένα υλικό με υψηλές θερμομονωτικές ιδιότητες θα πρέπει να αυξήσουμε το ποσοστό των αδρανών μέσα στο μίγμα ώστε ο λόγος A/P να είναι μεταξύ 15 — 18 ‰. Ένα τέτοιο υλικό όμως, όπως φαίνεται από τους προηγούμενους πίνακες παρουσιάζει χαμηλές αντοχές. Αντίθετα αν απαιτείται ένα υλικό με σχετικά υψηλή αντοχή τότε ο λόγος A/P θα πρέπει να μειωθεί σε τιμές κοντά στο 5 ‰.

Προκύπτει λοιπόν η ανάγκη να εξεταστεί το ελαφροσκυρόδεμα για διαφορετικές τιμές του λόγου A/P ώστε να μπορούμε κάθε φορά να ανταποκριθούμε στις διάφορες κατασκευαστικές απαιτήσεις. Επειδή η συμπεριφορά του υλικού αλλάζει ριζικά με την μεταβολή του λόγου A/P , και λιγότερο από την μεταβολή του λόγου N/T , επιλέχθηκε να μελετηθούν οι μηχανικές ιδιότητες του υλικού για 3 χαρακτηριστικές τιμές του λόγου A/P :

$$\alpha) \quad \frac{A}{P} = 5\text{‰}$$

$$\beta) \quad \frac{A}{P} = 9\text{‰}$$

$$\gamma) \quad \frac{A}{P} = 15\text{‰}$$

στις οποίες είναι εμφανής η μεταβολή της συμπεριφοράς του υλικού.

Από τα αρχικά μίγματα έγινε φανερό ότι η τιμή του λόγου N/T δεν πρέπει να υπερβαίνει την τιμή 0.35 στην περίπτωση που η ανάμιξη του τσιμεντοπολτού γίνεται με μηχανικό μέσο, εξαιτίας της κάθισης του τσιμεντοπολτού κατά την δόνηση των δοκιμίων.

Έτσι για κάθε μια από τις παραπάνω τιμές του λόγου A/P παρασκευάστηκαν 3 μίγματα για κάθε τιμή του λόγου N/T :

$$\frac{N}{T} = 0.25$$

$$\frac{N}{T} = 0.30$$

$$\frac{N}{T} = 0.35$$

Για κάθε τιμή του λόγου N/T παρασκευάστηκαν 3 κυβικά δοκίμια τσιμεντοπολτού ώστε να συγκριθούν οι τιμές των αντοχών των τριών κατηγοριών του ελαφροσκυροδέματος, με αυτές των δοκιμίων του τσιμεντοπολτού.

Οι δοκιμές για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών του υλικού έγιναν στις 35 ημέρες από την ημέρα παρασκευής του.

5.3.1 ΕΙΔΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Για τον προσδιορισμό των μηχανικών χαρακτηριστικών του ελαφροσκυροδέματος χρησιμοποιήθηκαν δύο τύποι δοκιμίων:

α) Κυβικά δοκίμια ακμής 7 cm

Τα δοκίμια αυτά χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό της θλιπτικής αντοχής του τσιμεντοπολτού και του ελαφροσκυροδέματος.

β) Κυλινδρικά δοκίμια με λόγο $h/d = 2$

Τα δοκίμια αυτά χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό της εφελκυστικής αντοχής, της θλιπτικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας του ελαφροσκυροδέματος. Οι διαστάσεις των δοκιμίων αυτών ήταν $h = 10$ cm και $d = 4.57$ cm.

5.3.2 ΤΑ ΚΑΛΟΥΠΙΑ

Τα καλούπια των κυβικών δοκιμίων που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα πρότυπα καλούπια του εργαστηρίου φτιαγμένα από σκληρό μέταλλο τα οποία είναι επαναχρησιμοποιήσιμα.

Για την παραγωγή των κυλινδρικών δοκιμίων δεν χρησιμοποιήθηκαν πρότυπα καλούπια. Για τον σκοπό αυτό κατασκευάστηκαν κυλινδρικά καλούπια από σωλήνες PVC διαμέτρου $d = 5$ cm οι οποίοι χρησιμοποιούνται στα δίκτυα ύδρευσης και αποχέτευσης. Οι σωλήνες αυτοί κόπηκαν σε τεμάχια ύψους

10 cm και λειάνθηκαν οι βάσεις τους. Στην συνέχεια κόπηκαν καθ' ύψος έτσι ώστε να είναι εύκολη η απομάκρυνση τους κατά την διαδικασία του ξεκαλουπάματος. Η παράπλευρη επιφάνεια των καλουπιών τυλίχθηκε με πλατιά ταινία, έτσι ώστε να αποφευχθεί διαρροή του τσιμεντοπολτού εξαιτίας της κατακόρυφης τομής. Τα καλούπια τέλος κωλύθηκαν πάνω σε φύλλα plexy glass, με τη χρήση κατάλληλης κόλας για πλαστικά.

5.3.3 ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΙΓΜΑΤΩΝ

Η διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε για την παραγωγή των μιγμάτων ήταν η ακόλουθη. Αρχικά υπολογίσθηκαν οι ποσότητες των συστατικών υλικών (τσιμέντο + νερό + πολυστερίνη) που απαιτούνται για την παρασκευή 3 μιγμάτων με λόγους $A/\Pi = 5, 9, 15\%$ τα οποία είχαν τον ίδιο λόγο N/T . Στην συνέχεια έγινε η ανάμιξη όλου του τσιμεντοπολτού μέσα σε δοχείο με την χρήση του μηχανικού μέσου (BLACK AND DECKER) και προστέθηκε η κατάλληλη ποσότητα ρευστοποιητικού RH2000. Μετά το τέλος της ανάμιξης φτιάχτηκαν τρία δοκίμια από σκέτο τσιμεντοπολτό, ενώ η υπόλοιπη ποσότητα χωρίστηκε σε τρία μέρη έτσι ώστε με την κατάλληλη προσθήκη ποσότητας αδρανών να προκύψουν τα τρία μίγματα με τις παραπάνω τιμές του λόγου A/Π .

Από κάθε ένα από τα παραπάνω τελικά μίγματα φτιάχτηκαν:

- α) 5 κυβικά δοκίμια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην δοκιμή θλίψης
- β) 3 κυλινδρικά δοκίμια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στην δοκιμή αντιδιαμετρικής θλίψης (εφελκυσμού)
- γ) 3 κυλινδρικά δοκίμια τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στον υπολογισμό του μέτρου ελαστικότητας του υλικού και της αντοχής σε θλίψη.

Η άνω επιφάνεια των δοκιμίων διαμορφώθηκε με μυστρί. Εξαιτίας όμως της μορφής του υλικού δεν ήταν δυνατόν να επιτευχθεί πλήρης επιπεδότητα της επιφάνειας αυτής.

Η δόνηση και η ωρίμανση των δοκιμίων έγιναν σύμφωνα με όσα αναφέρθηκαν στην εισαγωγή του κεφαλαίου.

5.4 ΔΟΚΙΜΗ ΘΛΙΨΗΣ ΚΥΒΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Η δοκιμή θλίψης έγινε σε υδραυλική πρέσα μεγίστου φορτίου 60 tn κατάλληλη για θραύση δοκιμίων από κοινό σκυρόδεμα. Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στην μηχανή έτσι ώστε οι επιφάνειές τους που έρχονται σε επαφή με τις επιφάνειες φόρτισης της μηχανής, να είναι αυτές που έρχονται σε επαφή με τις κάθετες πλευρές των καλουπιών τους κατά το καλούπωμα. Αυτό έγινε για να είναι παράλληλες και επίπεδες οι επιφάνειες φόρτισης του δοκιμίου. Στην συνέχεια τα δοκίμια φορτίστηκαν με ταχύτητα ίση με 0.98 kN/s μέχρι την στιγμή της θραύσης τους. Ως θραύση ορίζεται το μέγιστο φορτίο που μπορεί να αναλάβει το δοκίμιο και το οποίο αναγράφεται στον ηλεκτρονικό πίνακα της μηχανής.

Στον **ΠΙΝΑΚΑ 3** που ακολουθεί δίνονται τα χαρακτηριστικά των δοκιμίων, η θλιπτική αντοχή, ο μέσος όρος, η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής μεταβλητότητας. Παρατηρούμε ότι στα μίγματα με λόγο $A/\Pi = 5\%$ και για κάθε τιμή του λόγου N/T υπάρχει ομοιομορφία αποτελεσμάτων αφού οι συντελεστές μεταβλητότητας κάθε κατηγορίας είναι κοντά στο 3%. Αντίθετα στα μίγματα με λόγο $A/\Pi = 9\%$ και 15% τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής εμφανίζουν έντονη ανομοιομορφία αφού οι συντελεστές μεταβλητότητας είναι μεταξύ 10 – 25%. Το φαινόμενο αυτό οφείλεται στην ανομοιογένεια του υλικού στις δύο αυτές κατηγορίες μιγμάτων.

5.4.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΚΥΒΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ — ΣΧΟΛΙΑ

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ 5.7 (α, β, γ, δ)

Στα διαγράμματα α, β, γ δίνεται η μεταβολή της θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων συναρτήσει του λόγου A/Π για τις διάφορες τιμές του λόγου N/T . Παρατηρούμε μια εμφανή μείωση της θλιπτικής αντοχής με την αύξηση του λόγου A/Π . Πράγματι η μείωση της ποσότητας του τσιμεντοπολτού ο οποίος είναι το υλικό που αναλαμβάνει τη φόρτιση, οδηγεί σε μείωση της

αντοχής. Στο διάγραμμα δ δίνονται συγκεντρωτικά όλες οι καμπύλες αντοχής—λόγου A/Π οι οποίες παρουσιάζουν παρόμοια μεταβολή.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ 5.8 (α, β, γ, δ)

Η μεταβολή της θλιπτικής αντοχής ανάλογα με την τιμή του λόγου N/T του υλικού, για τις διάφορες τιμές του λόγου A/Π , δίνεται στα διαγράμματα α, β, γ. Όπως συμβαίνει και στο κοινό σκυρόδεμα η αντοχή του υλικού μειώνεται όσο η τιμή του λόγου N/T αυξάνει. Επίσης παρατηρούμε ότι όταν η τιμή του λόγου N/T ελαττωθεί πέρα από κάποια οριακή τιμή η αντοχή αρχίζει πάλι να μειώνεται. Το φαινόμενο αυτό παρατηρείται και στο κοινό σκυρόδεμα και μπορεί να οφείλεται είτε στο γεγονός ότι η ποσότητα του νερού είναι ανεπαρκής για την ολοκληρωτική ενυδάτωση του τσιμέντου, με αποτέλεσμα μέρος του τσιμέντου να παραμένει αδρανές, είτε η συμύκνωση του ελαφροσκυροδέμαρτος είναι ανεπαρκής με αποτέλεσμα την αντίστοιχη μείωση της πυκνότητας και της αντοχής.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.8ε

Στο διάγραμμα αυτό δίνεται η μεταβολή της αντοχής του τσιμεντοπολτού συναρτήση του λόγου N/T . Παρατηρούμε μείωση της θλιπτικής αντοχής του τσιμεντοπολτού με την αύξηση του λόγου N/T , πράγμα το οποίο οφείλεται στην αύξηση του πορώδους του τσιμεντοπολτού και στην μείωση της πυκνότητας του.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.8στ

Στο διάγραμμα αυτό δίνεται η μεταβολή της θλιπτικής αντοχής των κυβικών δοκιμίων του ελαφροσκυροδέματος ως συνάρτηση της πυκνότητάς τους. Όπως είναι φυσικό η αύξηση της πυκνότητας οδηγεί σε αύξηση της θλιπτικής αντοχής του υλικού. Αυτό οφείλεται στην αύξηση του ποσοστού του τσιμεντοπολτού στο μίγμα και άρα αύξηση της αντοχής του.

ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΒΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΘΛΙΨΗ

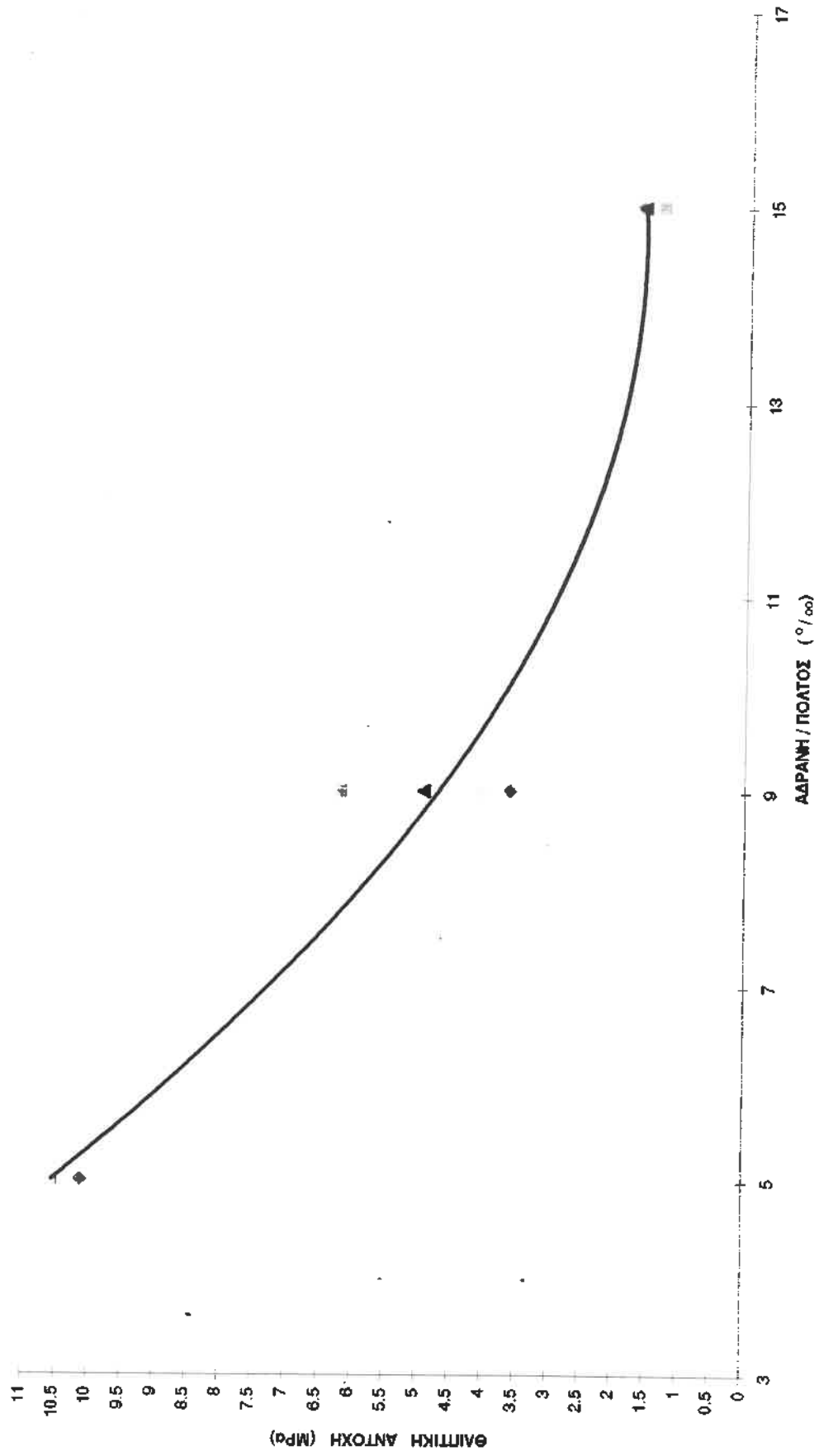
A / A	ΛΟΓΟΣ N / T	ΡΕΥΣΤΟ- ΠΟΙΗΤΙΚΟ	ΦΑΙΝΟ. ΒΑΡΟΣ	M.O	ΑΝΤΟΧΗ ΘΛΙΨΗΣ	M.O	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛ.	ΣΥΝΤΕΛΕ. ΜΕΤΑΒΛΗ.
		%	gr / cm ^{^3}	gr / cm ^{^3}	MPa	MPa	MPa	%
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ= 5 ο/οο								
Δ1	0.25	0.9	1.06	1.078	10.039	10.217	0.222	2.17
Δ2			1.09		10.093			
Δ3			1.07		10.203			
Δ4			1.09		10.534			
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ= 9 ο/οο								
Δ1	0.25	0.9	0.755	0.821	3.601	4.687	1.148	24.49
Δ2			0.778		4.033			
Δ3			0.882		4.911			
Δ4			0.869		6.202			
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ= 15 ο/οο								
Δ1	0.25	0.9	0.621	0.612	1.663	1.608	0.204	12.66
Δ2			0.629		1.823			
Δ3			0.607		1.612			
Δ4			0.59		1.334			
ΤΣΙΜΕΝΤΟΠΟΛΤΟΣ								
Δ1	0.25	0.9	2.173	2.193	97.53	96.94	0.522	0.538
Δ2			2.199		96.73			
Δ3			2.208		96.55			

155
ΠΙΝΑΚΑΣ 3

A / A	ΛΟΓΟΣ N / T	ΡΕΥΣΤΟ- ΠΟΙΗΤΙΚΟ	ΦΑΙΝΟ. ΒΑΡΟΣ	M.O	ΑΝΤΟΧΗ ΘΛΙΨΗΣ	M.O	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙ.	ΣΥΝΤΕΛΕ. ΜΕΤΑΒΛΗ.
		%	gr / cm ^{^3}	gr / cm ^{^3}	MPa	MPa	MPa	%
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ= 5 ο /οο								
Δ1	0.3	0.37	1.131	1.109	10.416	10.265	0.472	4.6
Δ2			1.132		10.469			
Δ3			1.156		10.605			
Δ4			1.018		9.566			
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ= 9 ο /οο								
Δ1	0.3	0.37	0.745	0.777	3.784	4.872	0.897	18.41
Δ2			0.788		4.84			
Δ3			0.755		4.21			
Δ4			0.796		5.706			
Δ5			0.802		5.82			
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ= 15 ο /οο								
Δ1	0.3	0.37	0.626	0.584	2.002	1.924	0.223	11.58
Δ2			0.579		2.245			
Δ3			0.548		1.659			
Δ4			0.604		1.785			
Δ5			0.565		1.931			
ΤΣΙΜΕΝΤΟΠΟΛΤΟΣ								
Δ1	0.3	0.37	2.104	2.118	78.96	80.1	0.993	1.24
Δ2			2.116		80.59			
Δ3			2.133		80.76			

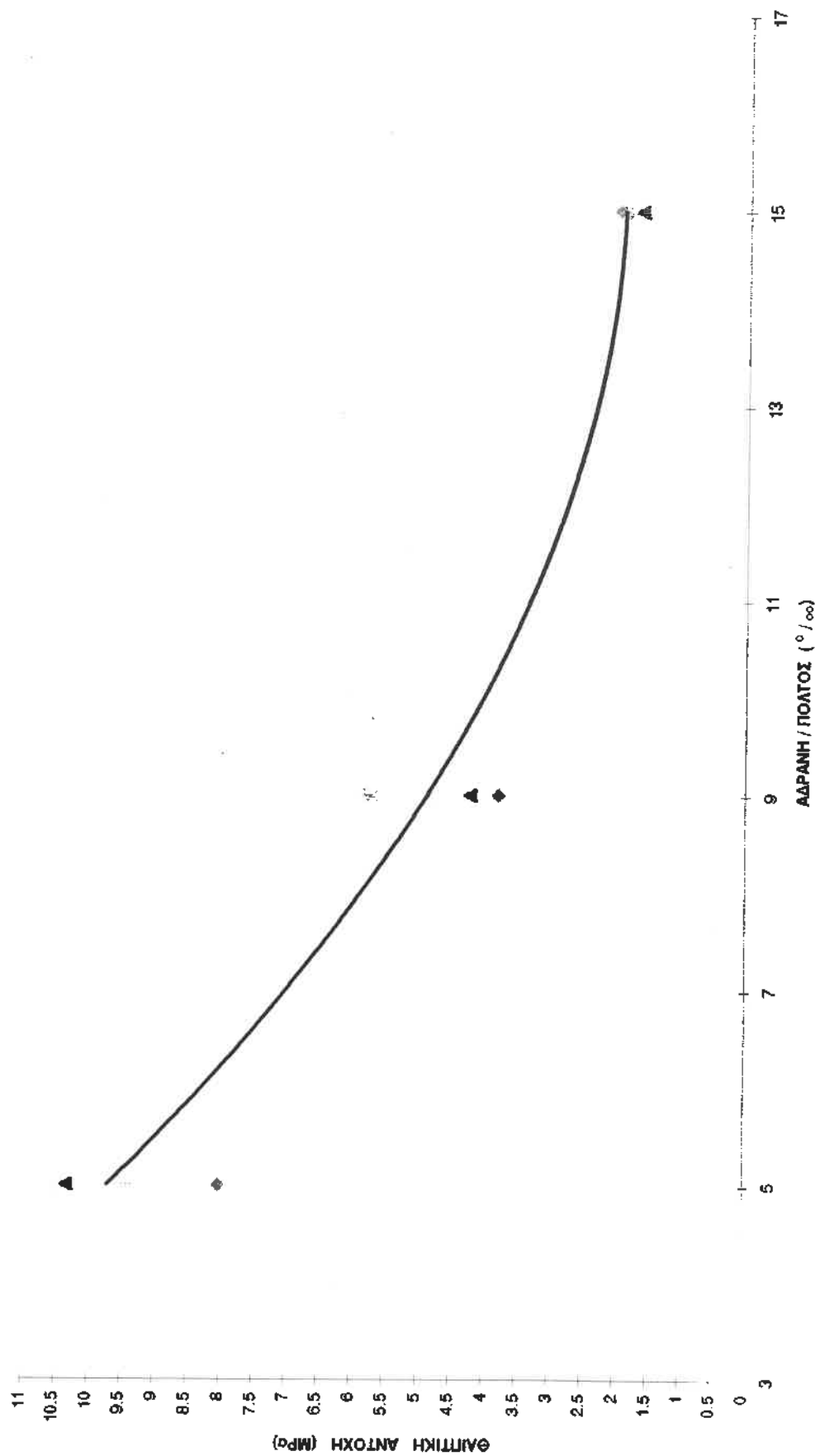
A / A	ΛΟΓΟΣ N / T	ΡΕΥΣΤΟ- ΠΟΙΗΤΙΚΟ	ΦΑΙΝΟ. ΒΑΡΟΣ	M.O	ΑΝΤΟΧΗ ΘΛΙΨΗΣ	M.O	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛ.	ΣΥΝΤΕΛΕ. ΜΕΤΑΒΛΗ.
		%	gr / cm ³	gr / cm ³	MPa	MPa	MPa	%
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ= 5 ο/οο								
Δ1			1.039		10.236			
Δ2			1.067		10.125			
Δ3	0.35	0.2	1.074	1.062	10.416	10.165	0.26	2.56
Δ4			1.081		9.74			
Δ5			1.051		10.308			
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ= 9 ο/οο								
Δ1			0.753		4.286			
Δ2			0.752		4.438			
Δ3	0.35	0.2	0.725	0.747	2.986	4.14	0.652	15.74
Δ4			0.763		4.546			
Δ5			0.743		4.444			
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ= 15 ο/οο								
Δ1			0.539		1.352			
Δ2			0.562		1.718			
Δ3	0.35	0.2	0.561	0.536	1.618	1.41	0.248	17.57
Δ4			0.526		1.194			
Δ5			0.494		1.17			
ΤΣΙΜΕΝΤΟΠΟΛΤΟΣ								
Δ1			2.073		73.86			
Δ2	0.35	0.2	1.991	2.04	68.71	70.65	2.8	3.96
Δ3			2.055		69.37			

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.7α

ΕΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΒΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΓΙΑ ΛΟΓΟ $N/T=0.25$ 

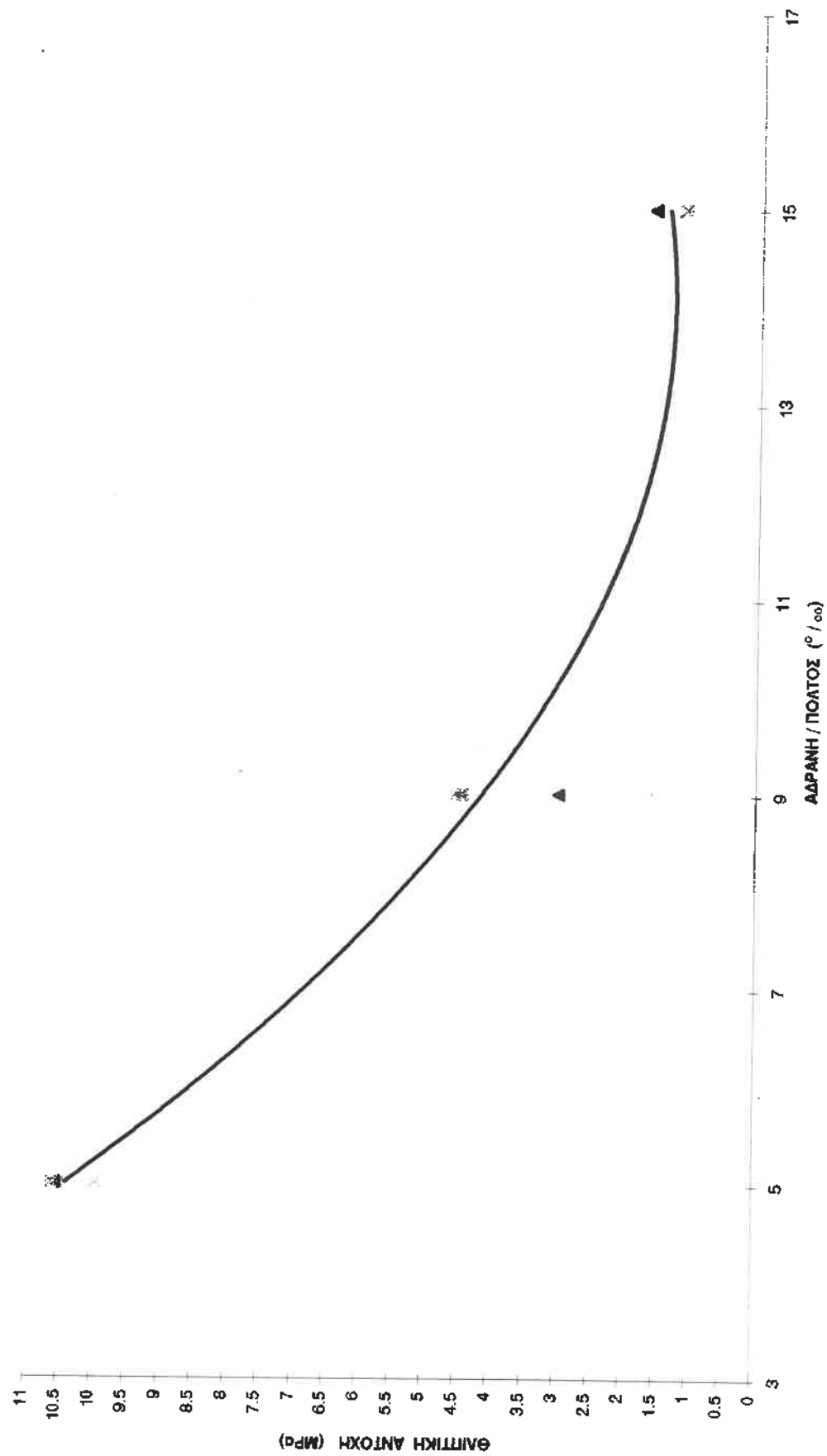
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.7β

ΕΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΒΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΓΙΑ ΛΟΓΟ $N/T=0.30$

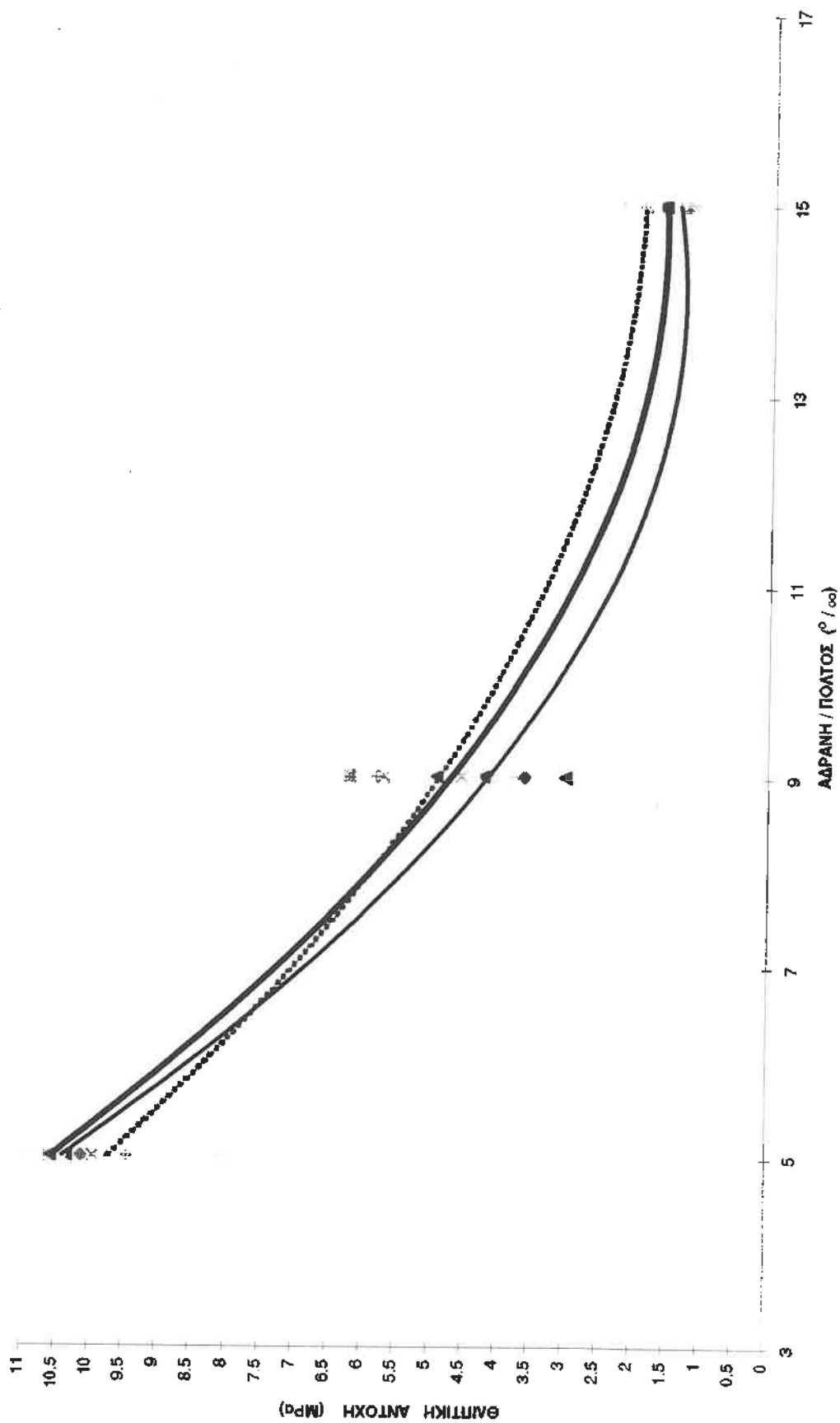


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.7Υ

ΕΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΒΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΓΙΑ ΛΟΓΟ $N/T=0.35$

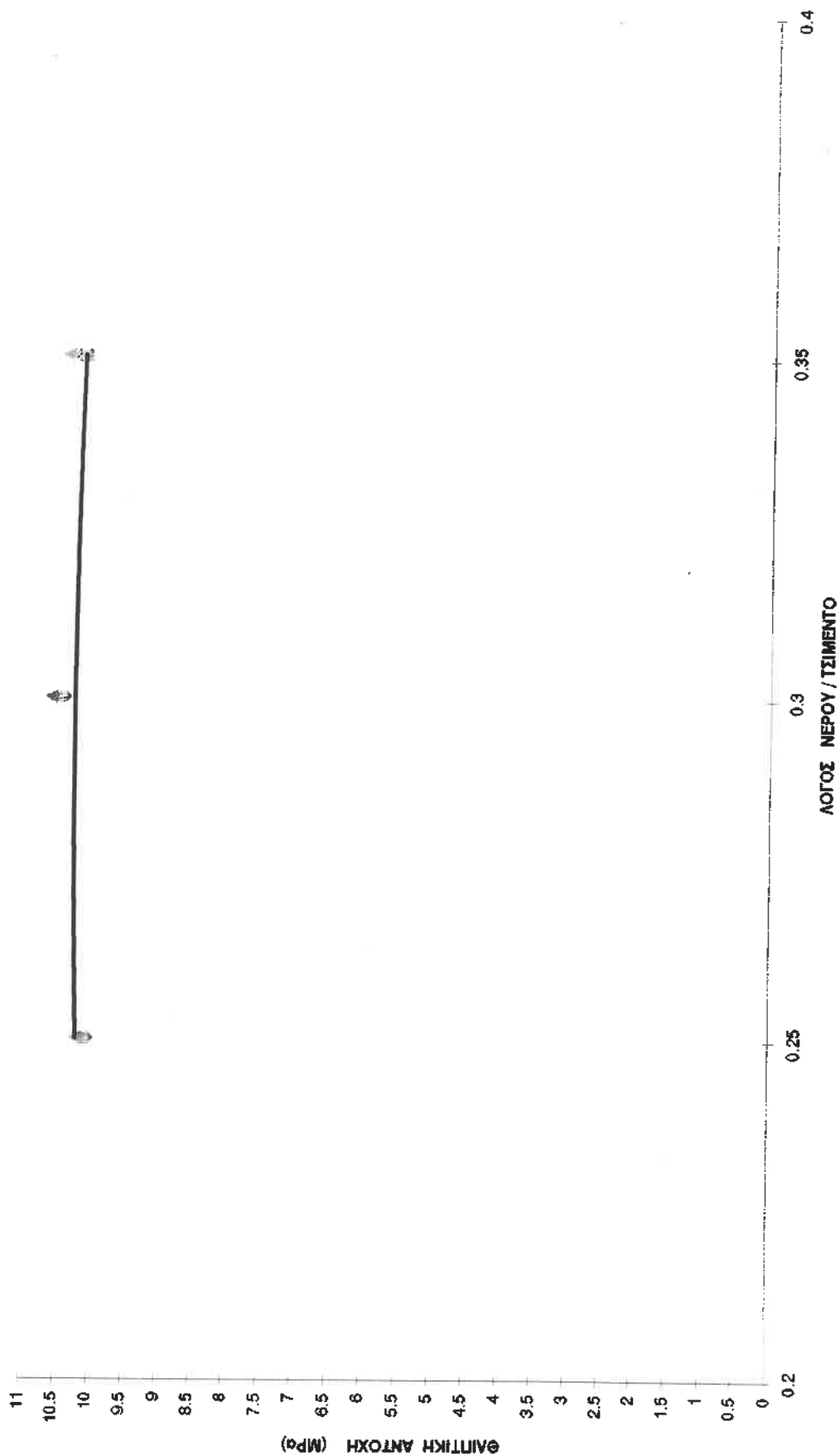


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.78

ΘΑΛΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΒΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΓΙΑ ΛΟΓΟΥΣ $N/T=0.25$, $N/T=0.30$, $N/T=0.35$ 

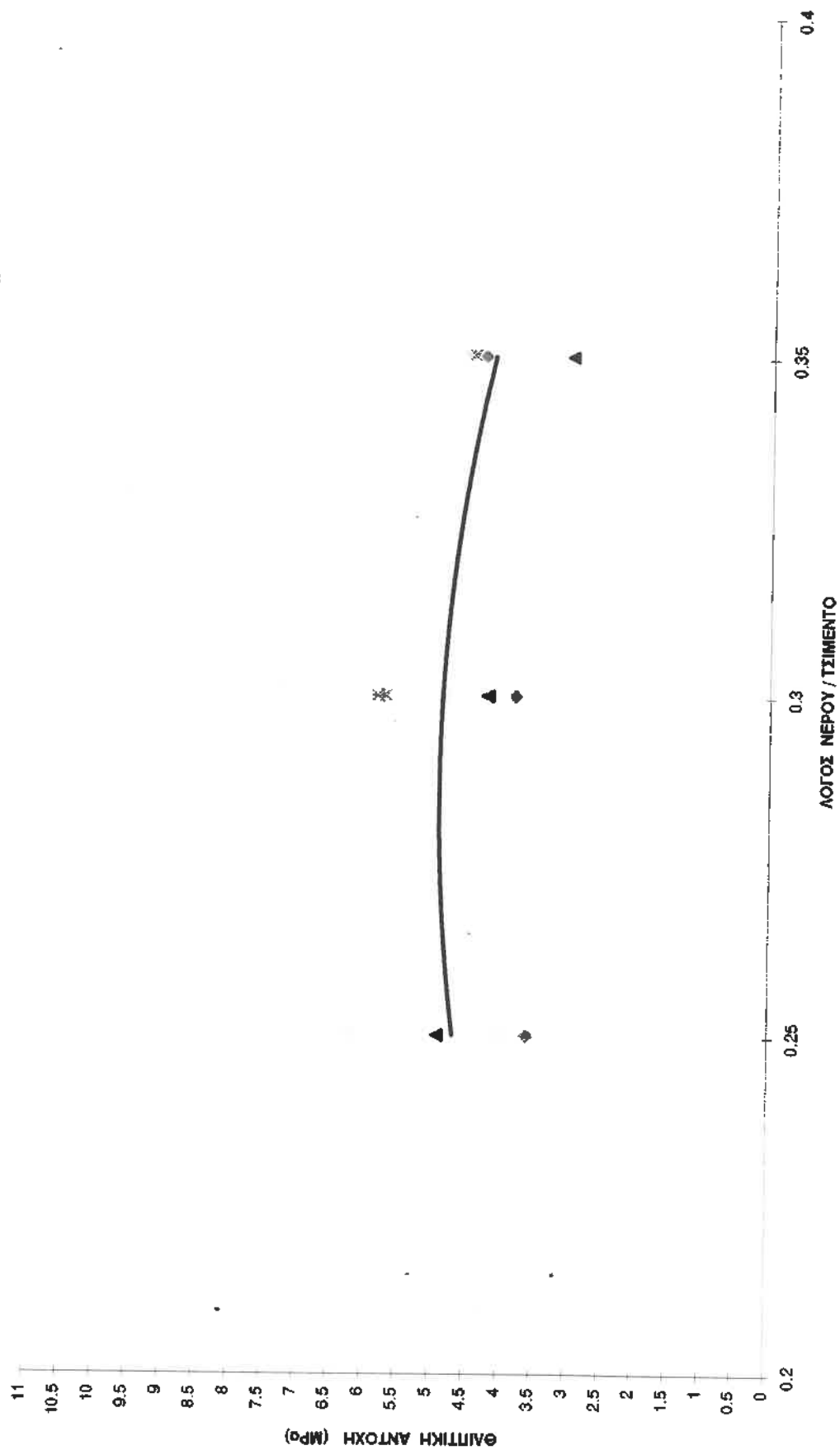
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.8α

ΘΑΛΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΒΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΛΟΓΟ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 5 % / ∞



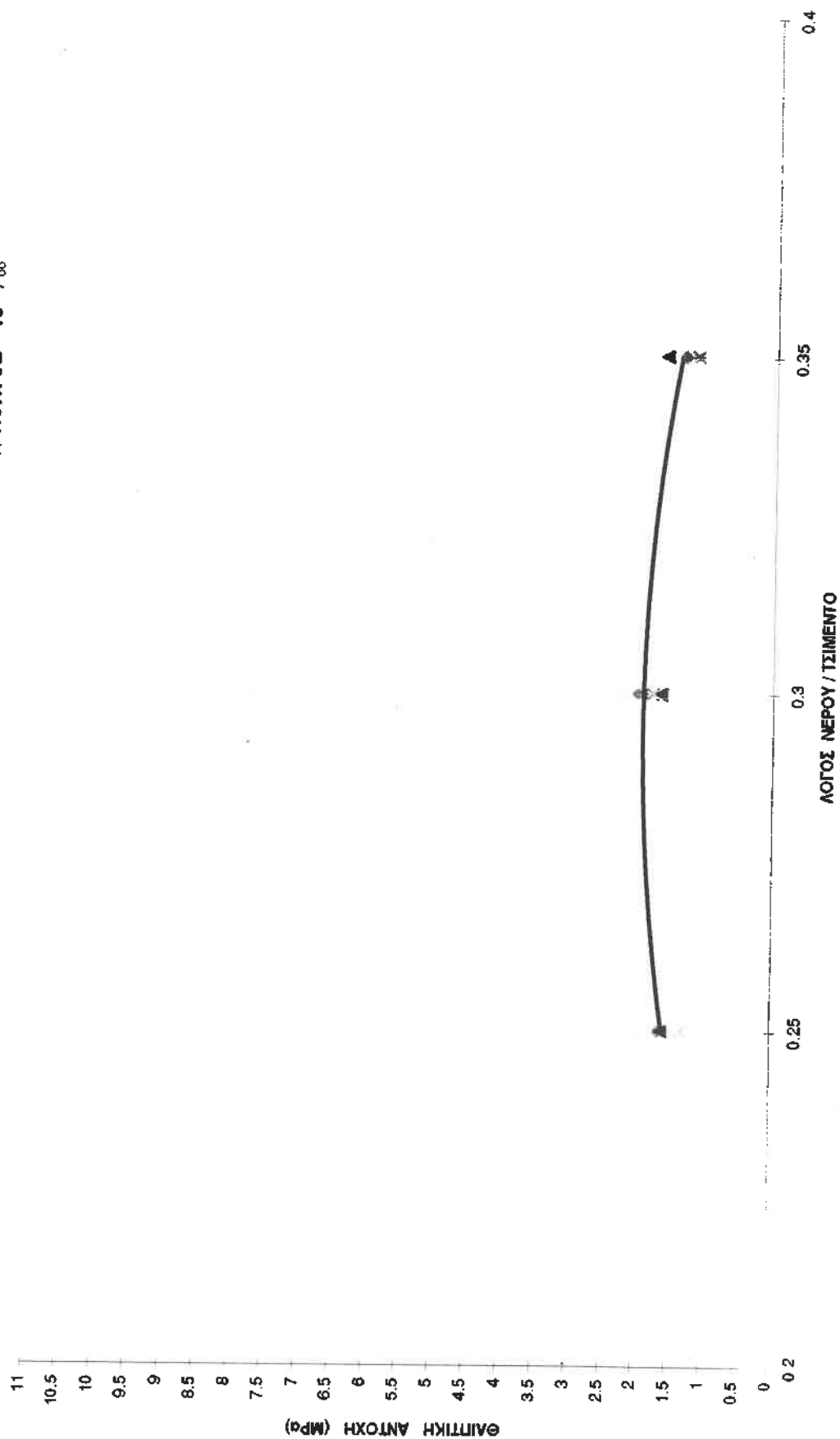
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.8β

ΘΑΛΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΒΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΛΟΓΟ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΥΤΟΣ = $9 \cdot / \infty$



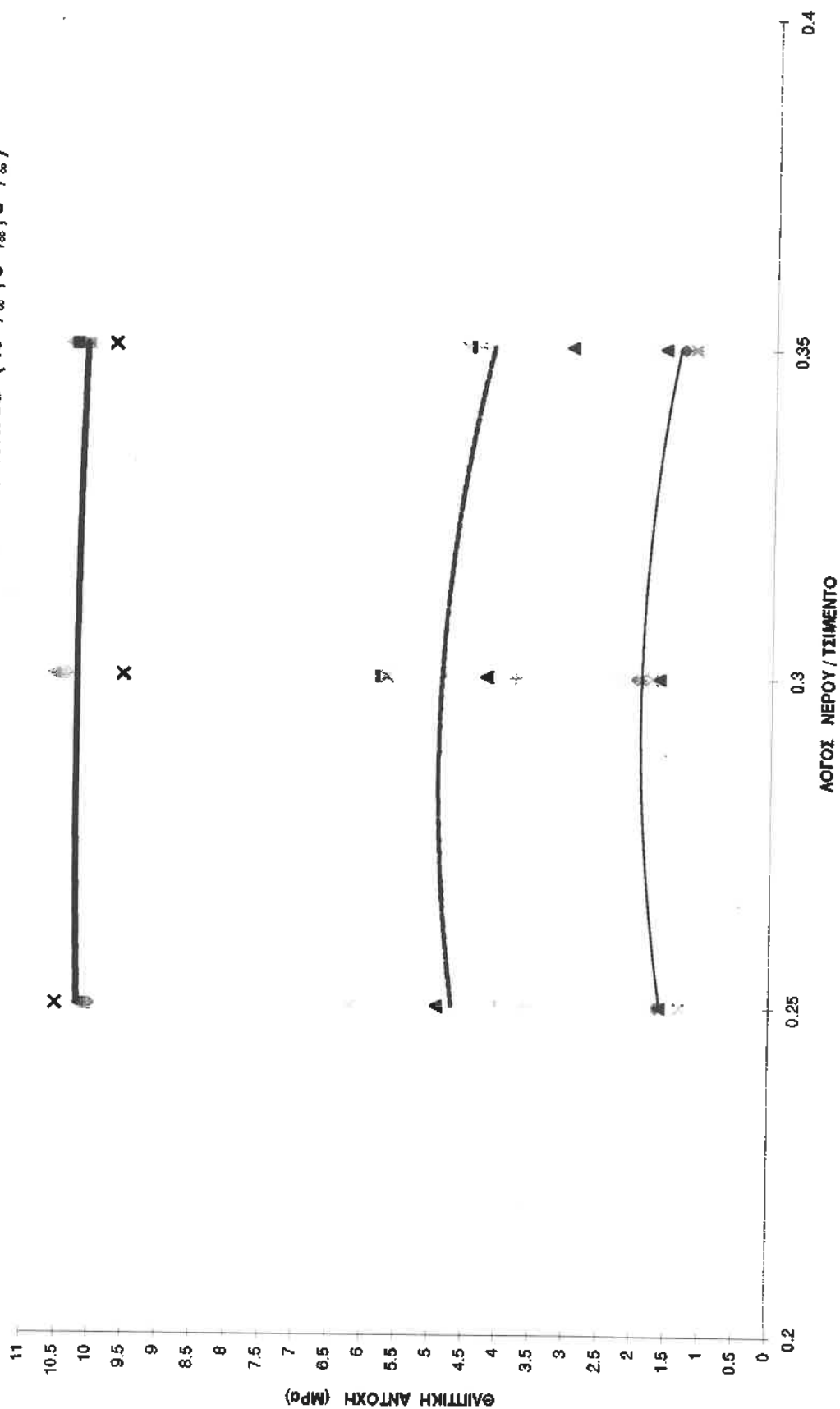
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.8γ

ΘΑΛΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΒΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΛΟΓΟ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ $\approx 15^\circ / \infty$



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.8δ

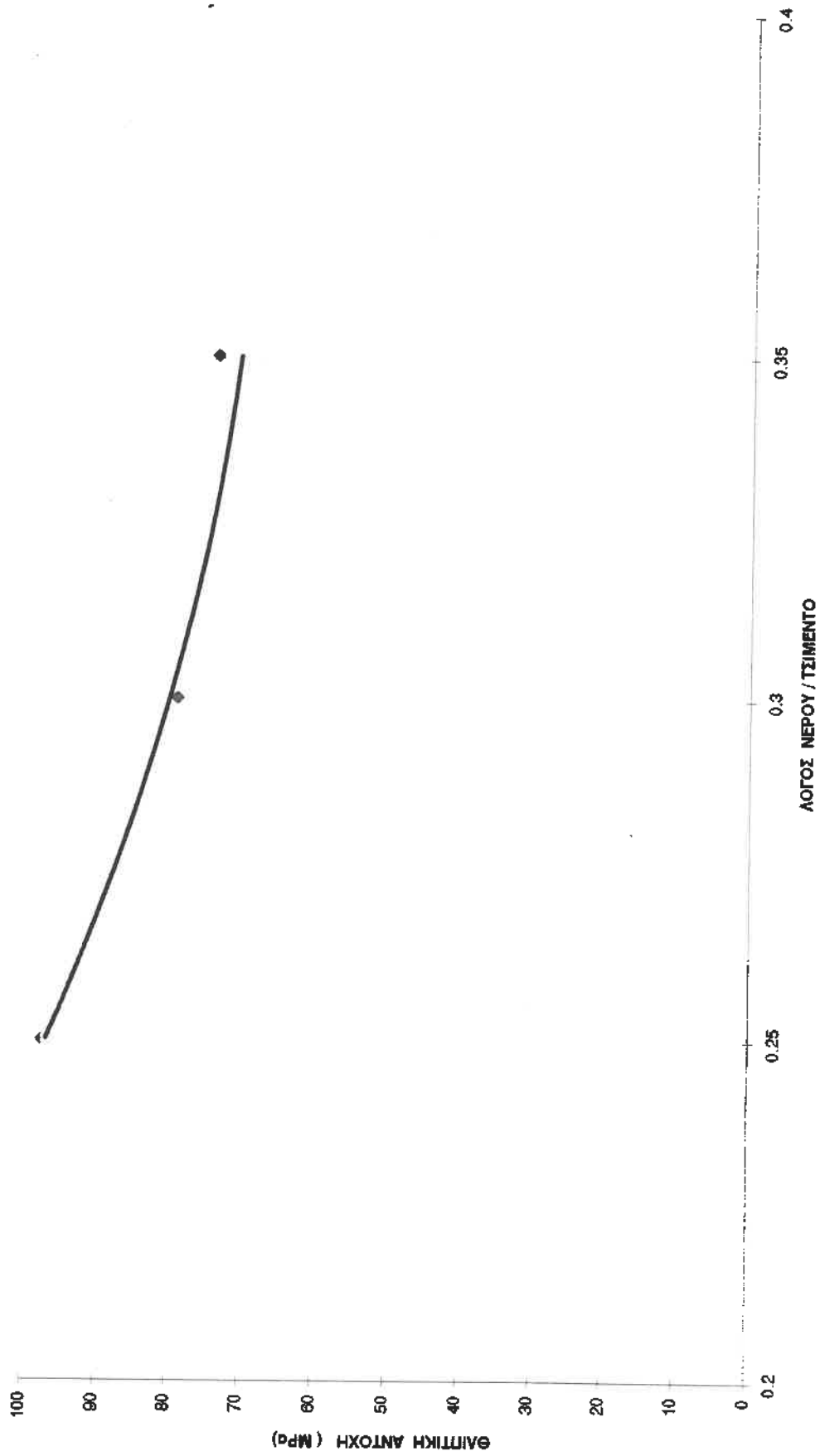
ΘΑΛΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΒΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΛΟΓΟ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = ($15^\circ / \infty$, $9^\circ / \infty$, $5^\circ / \infty$)



M.O

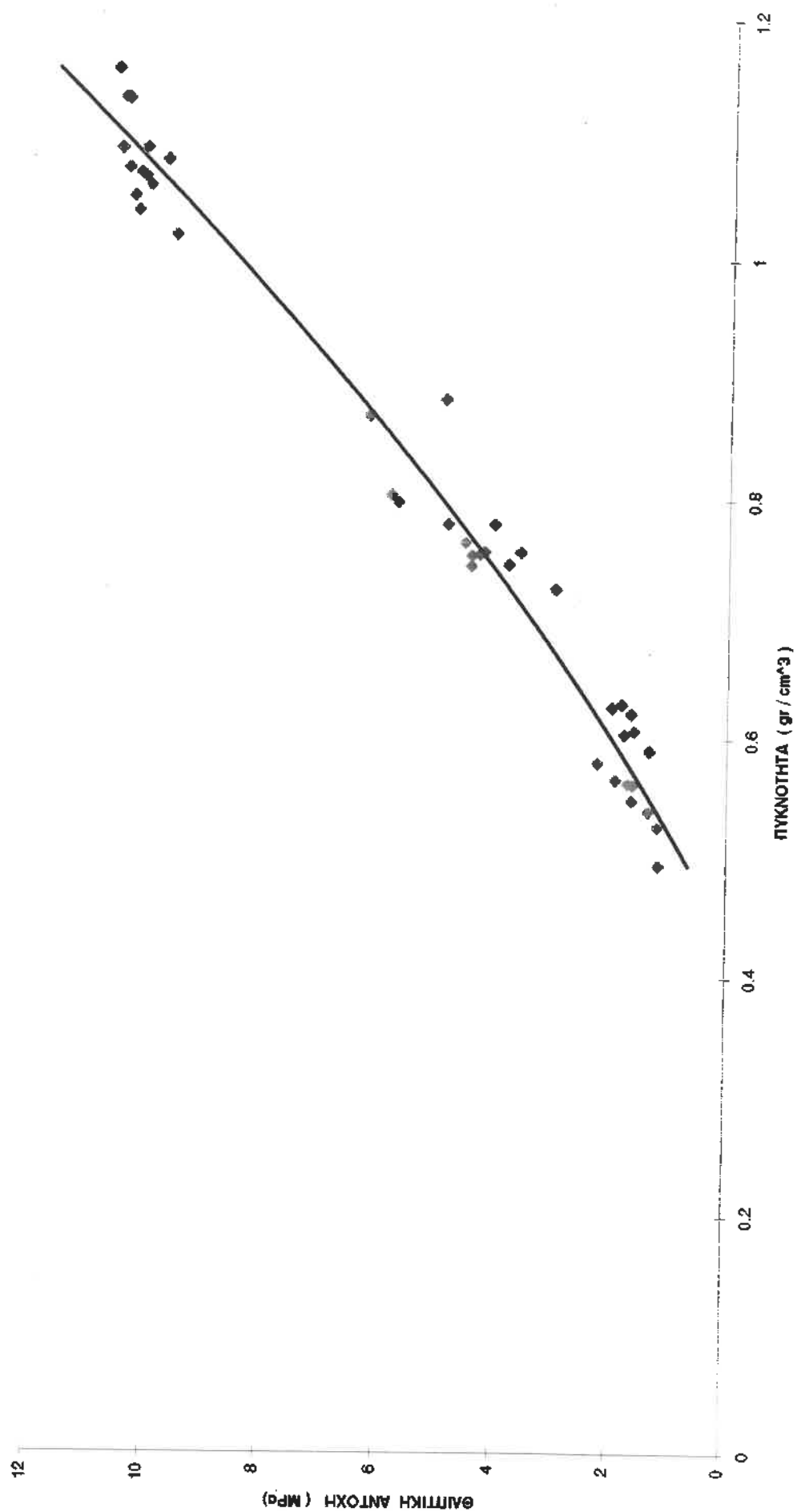
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.8ε

ΕΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΒΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΠΟΛΤΟΥ



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.8στ

ΘΑΛΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΒΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ - ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ



5.5 ΔΟΚΙΜΗ ΑΝΤΙΔΙΑΜΕΤΡΙΚΗΣ ΘΛΙΨΗΣ (ΕΦΕΛΚΥΣΜΟΣ)

Με την δοκιμή της αντιδιαμετρικής θλίψης στα κυλινδρικά δοκίμια του ελαφροσκυροδέματος, προσδιορίστηκε η αντοχή θραύσης του υλικού σε εφελκυσμό.

Η μηχανή θραύσης που χρησιμοποιήθηκε ήταν η ίδια με αυτή που χρησιμοποιήθηκε για την δοκιμή θλίψης των κυβικών δοκιμίων ακμής 7 cm. Να σημειωθεί ότι αυτή η μηχανή δεν παρουσιάζει μεγάλη ακρίβεια για τιμές φορτίου κάτω των 3 kN.

Η τοποθέτηση των δοκιμίων στη μηχανή θραύσης έγινε έτσι ώστε το επιβαλλόμενο φορτίο να ασκείται σε δύο αντιδιαμετρικές γενέτειρες και κατά το ίδιο αξονικό επίπεδο. Θα πρέπει ωστόσο να αναφέρουμε ότι δεν έγινε χρήση των πρισματικών ράβδων οι οποίες παραμβάλλονται μεταξύ του δοκιμίου και των πλακών της μηχανής όπως περιγράφεται στους κανονισμούς.

Πριν την δοκιμή προσδιορίστηκαν το μήκος και η διάμετρος καθενός από τα τρία δοκίμια του κάθε μίγματος. Συνολικά έγιναν 27 δοκιμές θραύσης, 9 για κάθε τιμή του λόγου A / Π από τις οποίες 3 για κάθε τιμή του λόγου N / T.

Η ταχύτητα φόρτισης της μηχανής ήταν σταθερή και ίση με 0.30 kN / s. Μετά την θραύση του δοκιμίου καταγράφηκε το μέγιστο φορτίο και στη συνέχεια προσδιορίστηκε η τάση θραύσης από εφελκυσμό με αντιδιαμετρική θλίψη από την σχέση :

$$\sigma = \frac{2 * P}{\pi * L * d}$$

όπου : L = Το μήκος του δοκιμίου

d = Η διάμετρος του δοκιμίου ίση με 4.57 cm

P = Το φορτίο θραύσης του δοκιμίου.

Στον **ΠΙΝΑΚΑ 4** δίνονται οι τιμές της εφελκυστικής αντοχής των δοκιμίων, οι μέσοι όροι, οι τυπικές αποκλίσεις και οι συντελεστές μεταβλητό-

τητας. Στα μίγματα με λόγο $A/P = 5\%$ λόγω της ομοιογένειας του υλικού παρατηρούνται χαμηλότερες τιμές του συντελεστή μεταβλητότητας κοντά στο 5% . Στα άλλα μίγματα οι συντελεστές μεταβλητότητας είναι υψηλότεροι. Οι μεγάλες τιμές των συντελεστών μεταβλητότητας οφείλονται στη μικρή ακρίβεια της μηχανής που χρησιμοποιήθηκε, αλλά και στο μικρό αριθμό των δοκιμών.

5.5.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ **ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ — ΣΧΟΛΙΑ**

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ 5.9 (α, β, γ, δ)

Στα διαγράμματα α, β, γ δίνεται η μεταβολή της εφελκυστικής αντοχής του υλικού συναρτήσει του λόγου A/P για τις συγκεκριμένες τιμές του λόγου N/T . Είναι εμφανής η μείωση της εφελκυστικής αντοχής όσο ο λόγος A/P αυξάνεται για όλες τις τιμές του λόγου N/T . Στο διάγραμμα δ παρατηρούμε ότι οι τιμές της εφελκυστικής αντοχής για τιμές του λόγου $N/T = 0.25$ και $A/P = 5\%$ είναι ιδιαίτερα αυξημένες, πράγμα το οποίο ίσως οφείλεται στην αυξημένη αντοχή του υλικού λόγο χαμηλότερου λόγου N/T ή της μικρής ακρίβειας της μηχανής θραύσης για την συγκεκριμένη δοκιμή. Ωστόσο λόγο του μικρού αριθμού των δοκιμών δεν μπορούμε να βγάλουμε ασφαλή συμπεράσματα.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ 5.10 (α, β, γ, δ)

Στα διαγράμματα α, β, γ δίνεται η μεταβολή της εφελκυστικής αντοχής του ελαφροσκυροδέματος συναρτήσει του λόγου N/T για σταθερές τιμές του λόγου A/P . Γενικά παρατηρείται μείωση της εφελκυστικής αντοχής με την αύξηση του λόγου N/T και ιδιαίτερα για τα μίγματα με λόγο A/P 9% και 5% τα οποία γενικά παρουσιάζουν πιο ομαλή συμπεριφορά.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.10ε

Στο διάγραμμα αυτό απεικονίζεται η μεταβολή της εφελκυστικής αντοχής του ελαφροσκυροδέματος συναρτήσει της πυκνότητας του. Διαπιστώνουμε έ-

ντονη αύξηση της εφελκυστικής αντοχής με την αύξηση της πυκνότητας του υλικού όπως παρατηρήθηκε και για την θλιπτική αντοχή.

ΠΙΝΑΚΑΣ 4

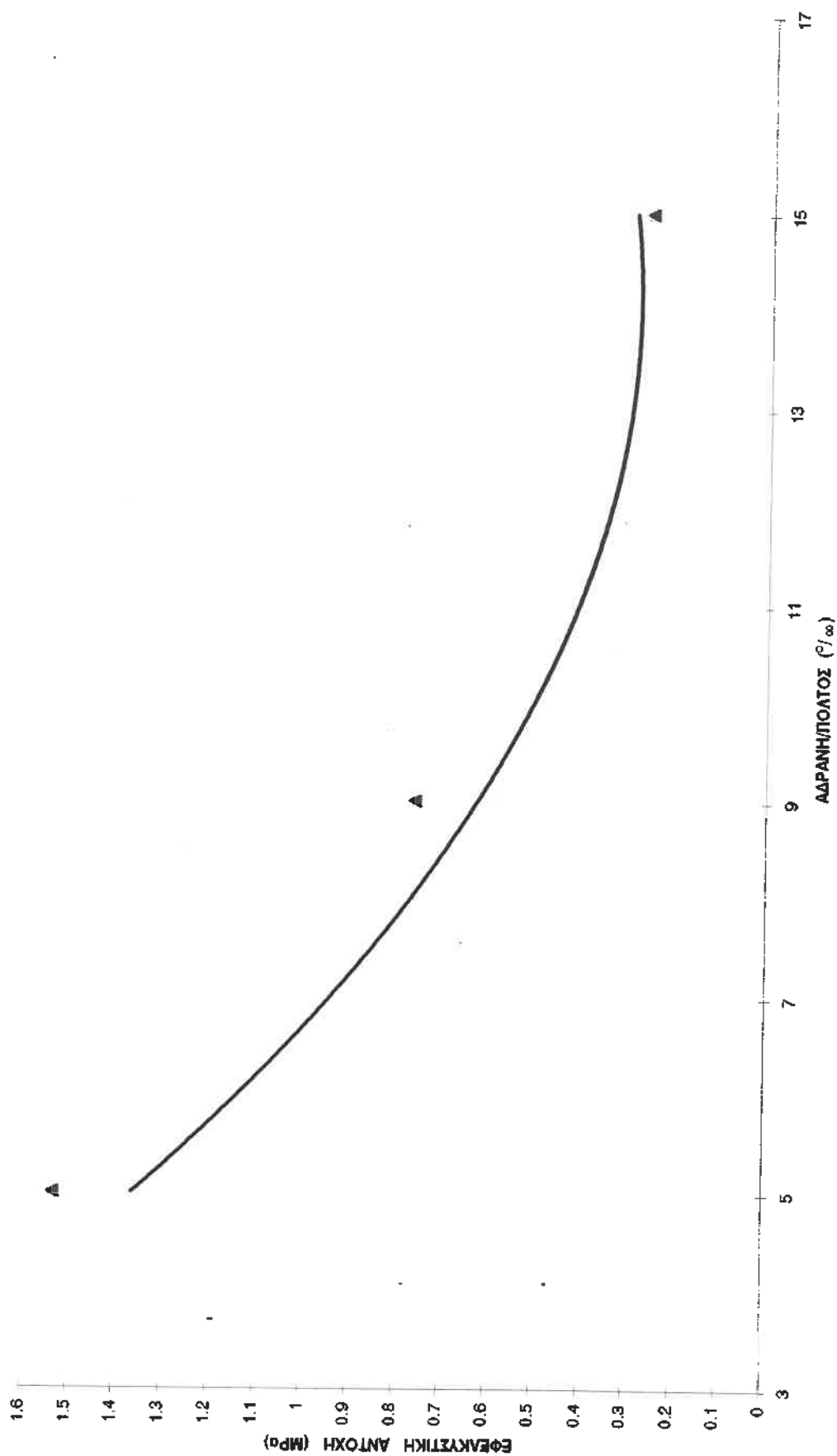
ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ								
A / A	ΛΟΓΟΣ N / T	ΡΕΥΣΤΟ- ΠΟΙΗΤΙΚΟ	ΦΑΙΝΟ. ΒΑΡΟΣ	Μ.Ο	ΑΧΤΟΧΗ ΕΦΕΛΚΥ	Μ.Ο	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙ.	ΣΥΝΤΕΛΕ ΜΕΤΑΒΛΗ.
		%	gr/ cm ^{^3}	gr/cm ^{^3}	MPa	MPa	MPa	%
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 5 ο / οο								
Δ4	0.25	0.9	1.341	1.288	1.316	1.362	0.152	11.15
Δ5			1.262		1.239			
Δ6			1.262		1.532			
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 9 ο / οο								
Δ4	0.25	0.9	0.914	0.937	0.531	0.624	0.120	19.30
Δ5			0.939		0.581			
Δ6			0.957		0.76			
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 1 5 ο / οο								
Δ4	0.25	0.9	0.671	0.663	0.356	0.269	0.053	17.84
Δ5			0.652		0.269			
Δ6			0.665		0.261			
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 5 ο / οο								
Δ4	0.30	0.37	1.042	1.097	0.828	0.871	0.045	5.18
Δ5			1.219		0.918			
Δ6			1.030		0.868			
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 9 ο / οο								
Δ4	0.30	0.37	0.933	0.884	0.566	0.531	0.042	7.84
Δ5			0.865		0.542			
Δ6			0.854		0.485			
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 1 5 ο / οο								
Δ4	0.30	0.37	0.616	0.630	0.205	0.215	0.011	4.88
Δ5			0.665		0.215			
Δ6			0.610		0.226			

ΠΙΝΑΚΑΣ 4

A / A	ΛΟΓΟΣ N / T	ΡΕΥΣΤΟ- ΠΟΙΗΤΙΚΟ	ΦΑΙΝΟ. ΒΑΡΟΣ	M.O	ΑΧΤΟΧΗ ΕΦΕΛΚΥ	M .O	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛ.	ΣΥΝΤΕΛΕ ΜΕΤΑΒΛΗ.
		%	gr/ cm ³	gr/cm ³	MPa	MPa	MPa	%
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 5 ο / οο								
Δ4			1.049		0.778			
Δ5	0.35	0.2	1.079	1.067	0.782	0.800	0.035	4.41
Δ6			1.073		0.841			
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 9 ο / οο								
Δ4			0.786		0.453			
Δ5	0.35	0.2	0.744	0.780	0.4	0.443	0.039	8.89
Δ6			0.811		0.477			
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 15 ο / οο								
Δ4			0.609		0.219			
Δ5	0.35	0.2	0.622	0.626	0.185	0.210	0.022	10.60
Δ6			0.646		0.227			

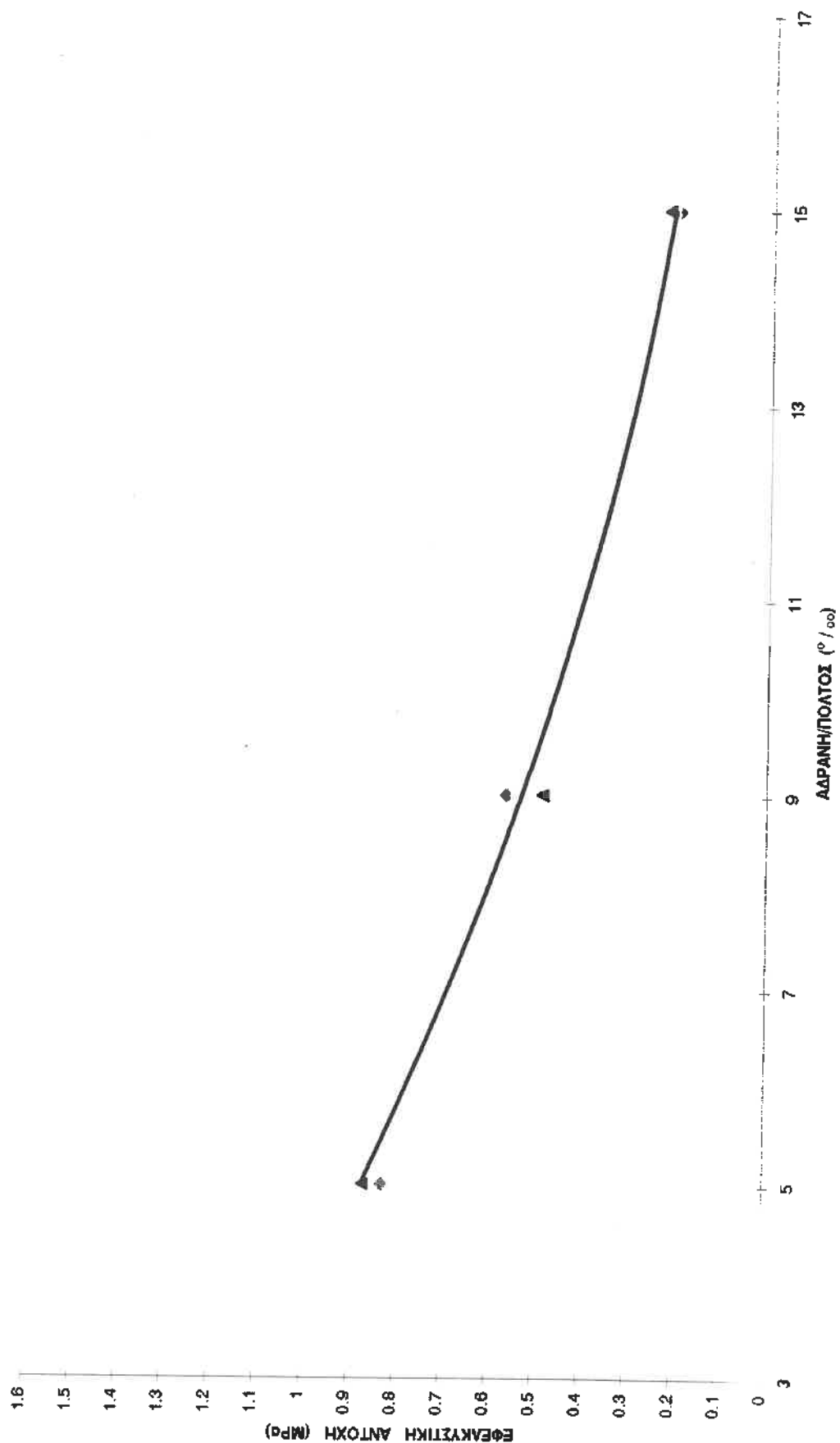
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.9α

ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΛΟΓΟ $N/T=0.25$



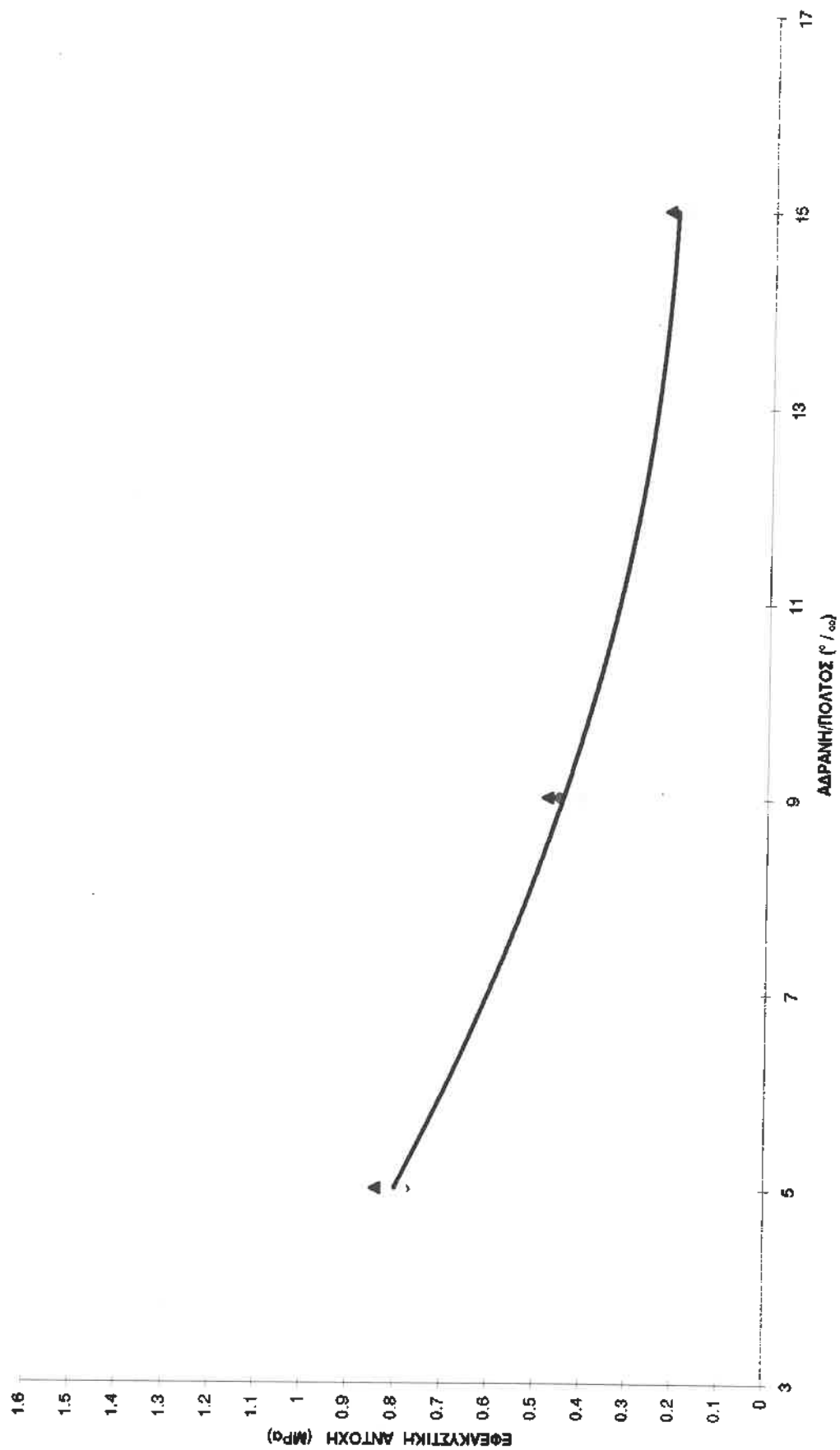
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.9β

ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΛΟΓΟ $N/T = 0.30$

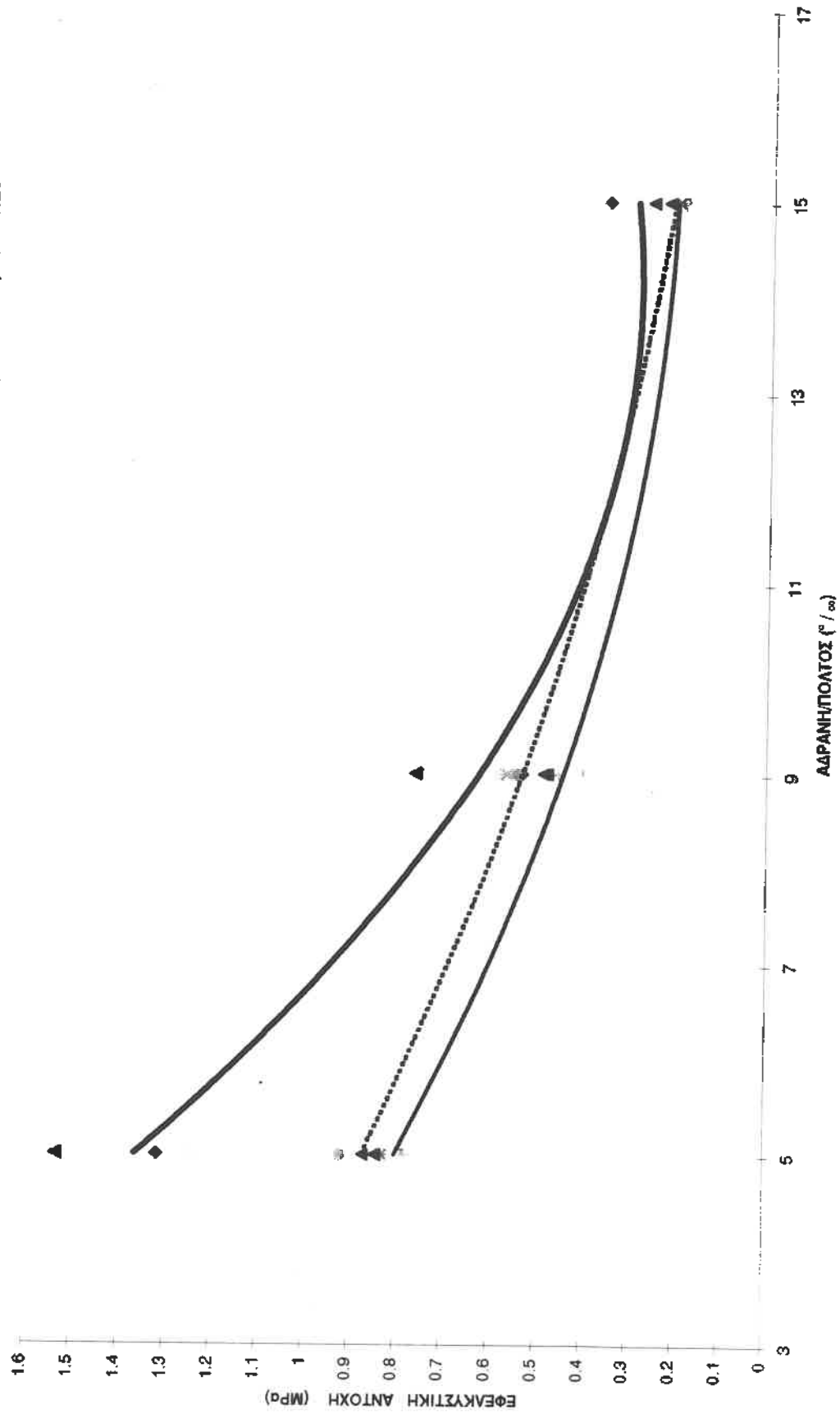


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.9Υ

ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΛΟΓΟ $N/T=0.35$

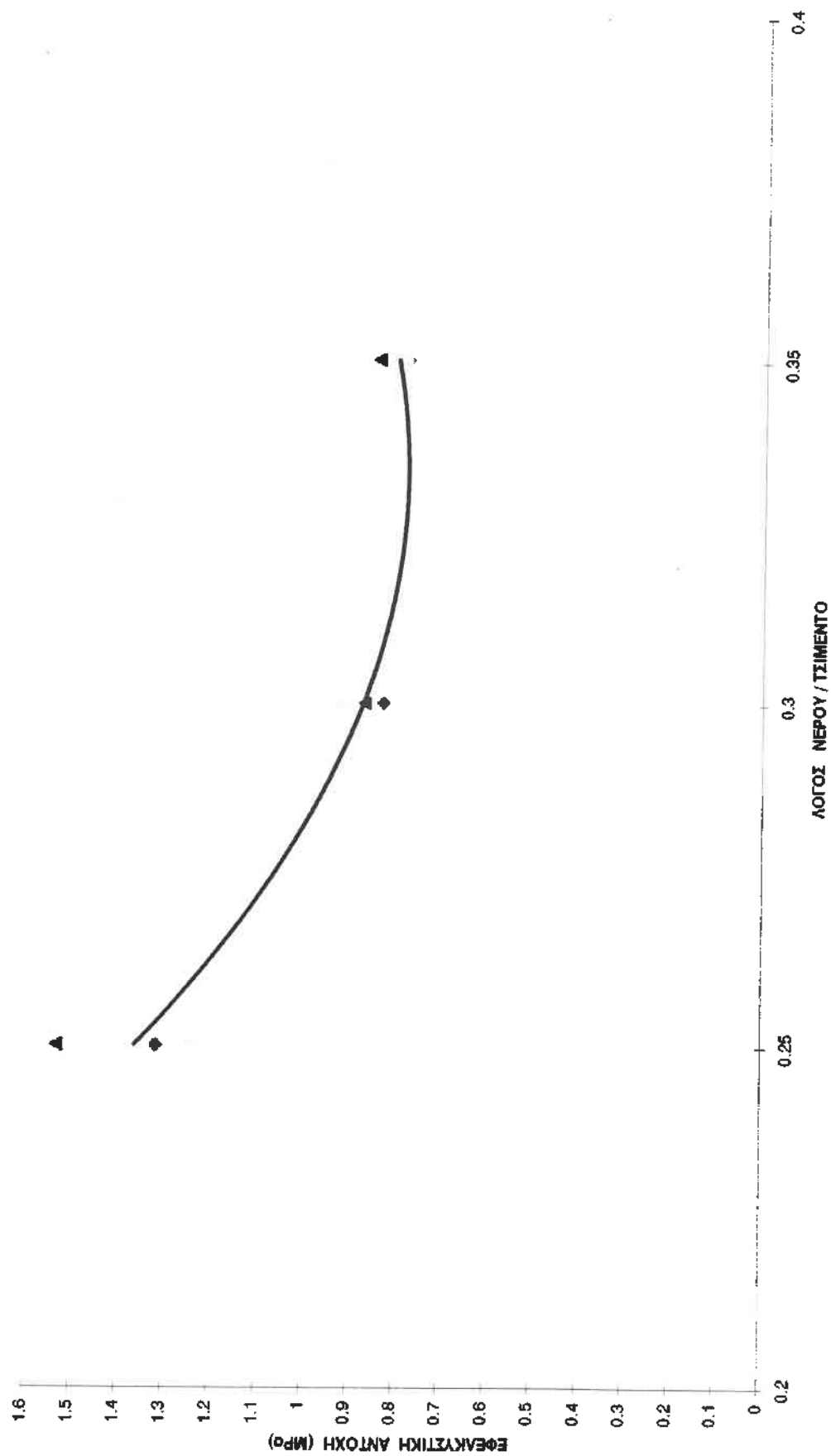


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.95

ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΛΟΓΟ $N/T=0.35$, $N/T=0.30$, $N/T=0.25$ 

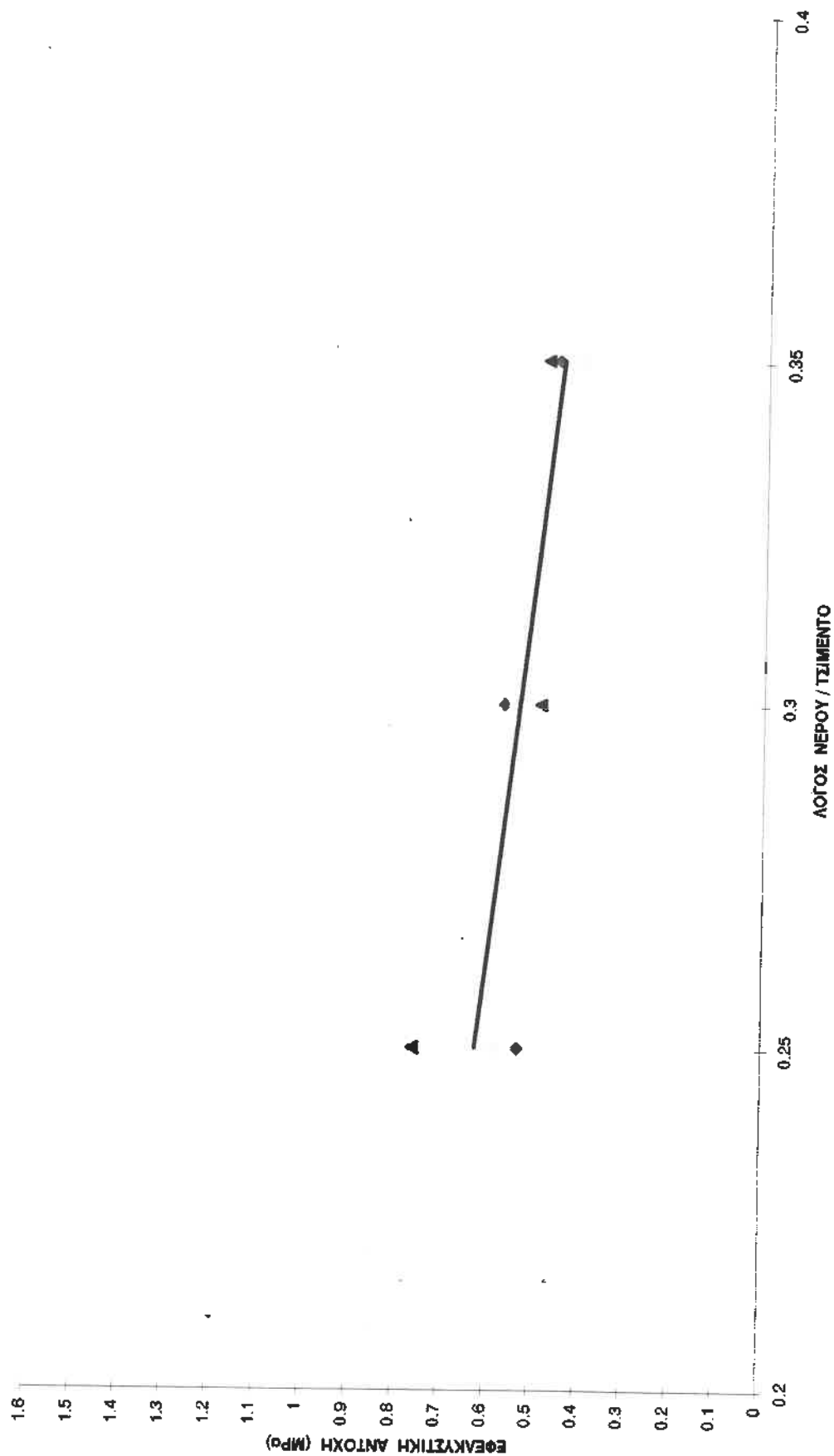
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.10α

ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΛΟΓΟ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = $5^\circ / \infty$



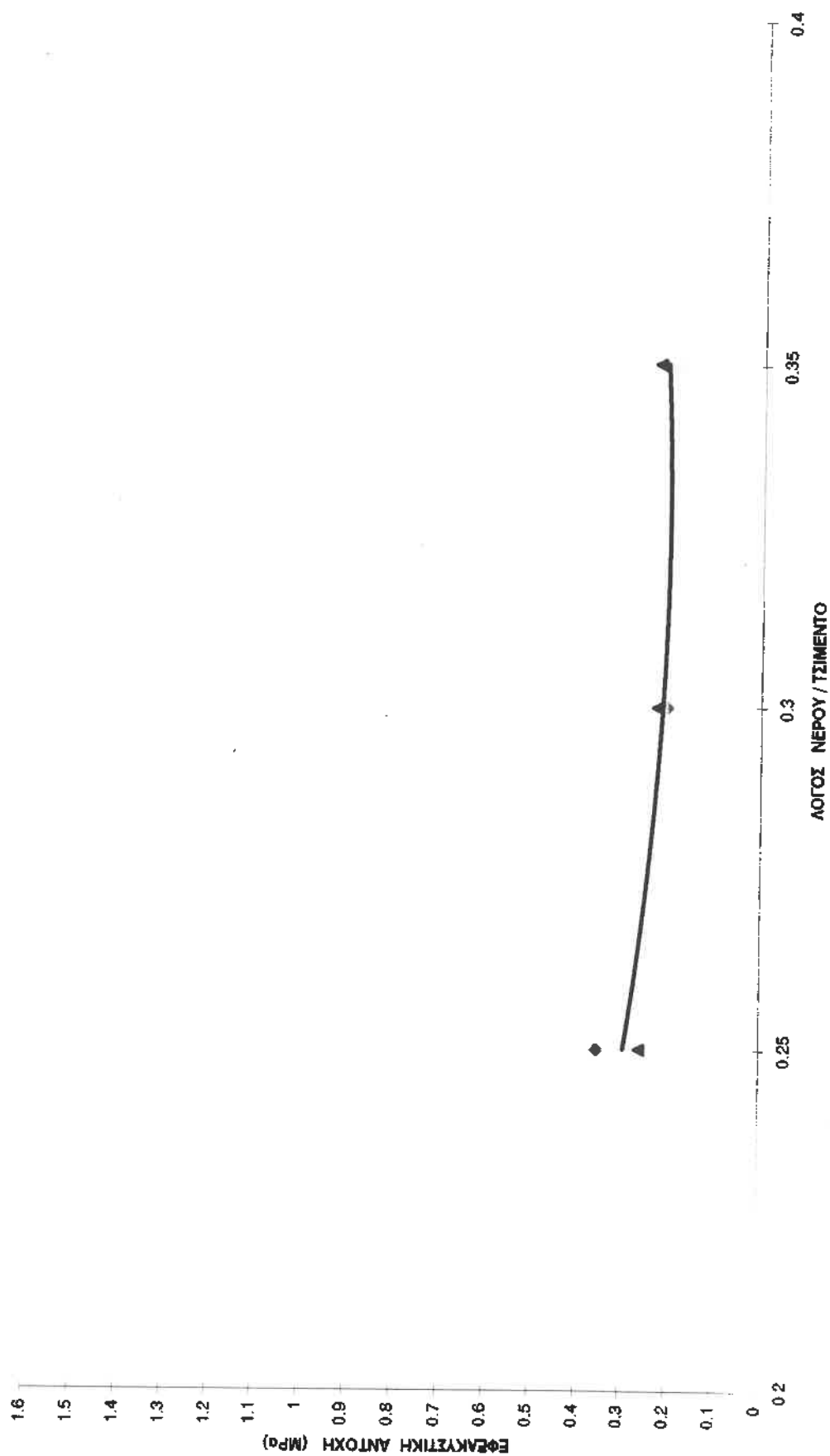
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.10β

ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΛΟΓΟ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = $9^\circ / \infty$

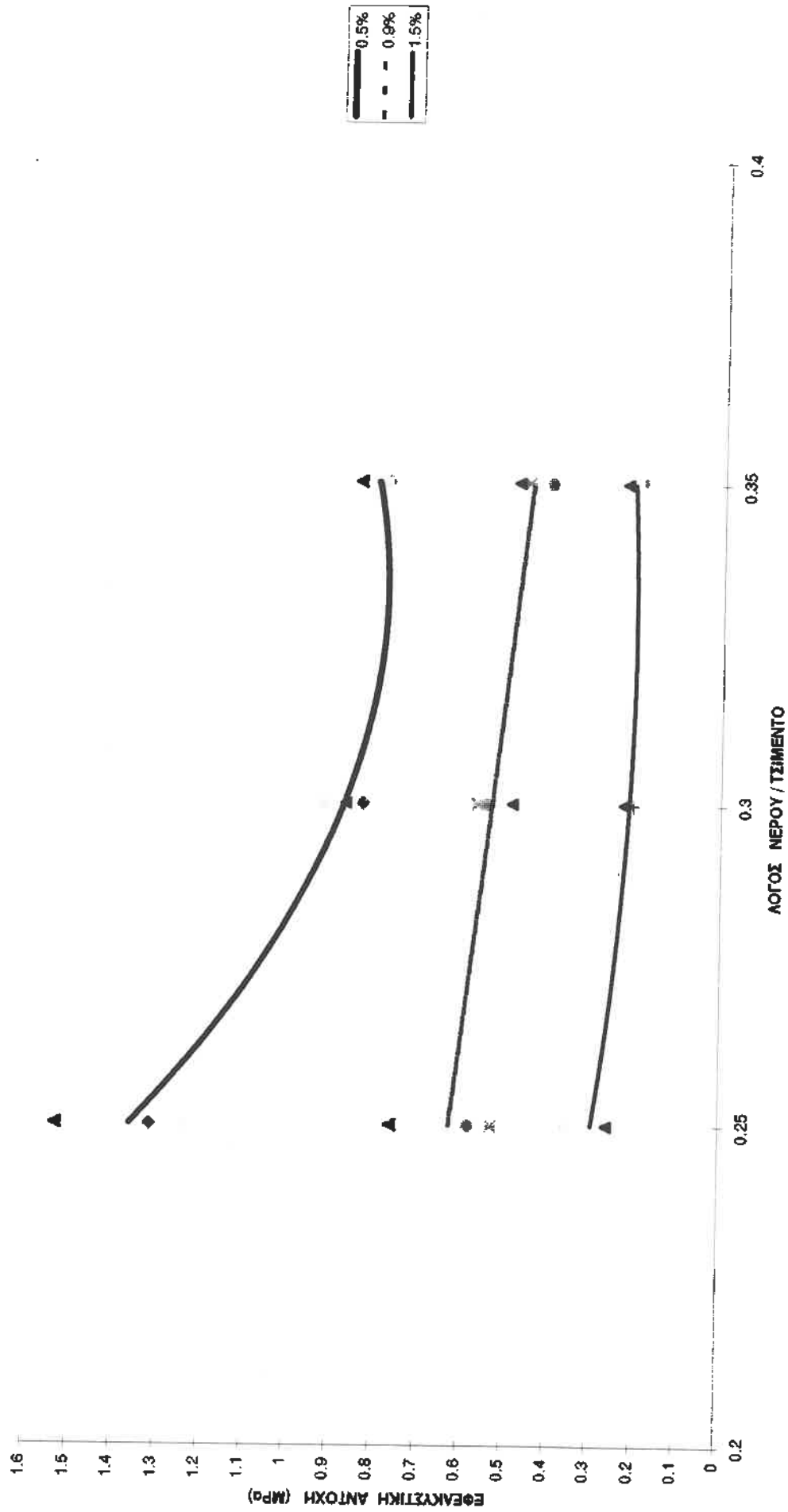


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.10γ

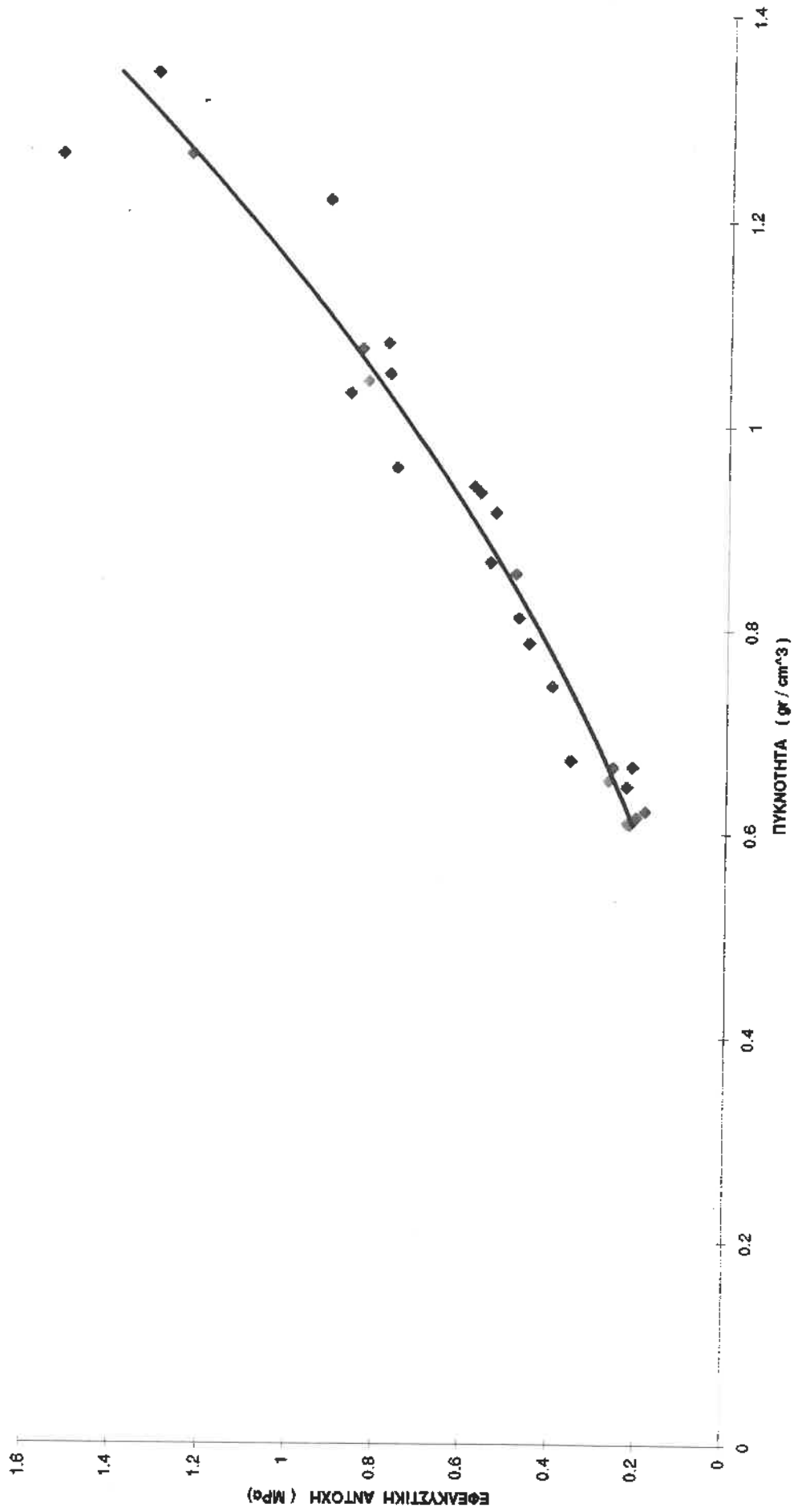
ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΛΟΓΟ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = $15^\circ / \infty$



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.108

ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΛΟΓΟ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = ($5^\circ / \infty$, $9^\circ / \infty$, $15^\circ / \infty$)

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.10ε
ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ - ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ



5.6 ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΤΟΥ ΕΛΑΦΡΟΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Επειδή το ελαφροσκυρόδεμα είναι ένα ψαθυρό υλικό που μπορεί να αναλάβει πολύ μεγαλύτερα θλιπτικά φορτία παρά εφελκυστικά, εφαρμόστηκε για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας η δοκιμή της θλίψης σε αντικατάσταση της δοκιμής του εφελκυσμού.

Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν για τον καθορισμό του μέτρου ελαστικότητας του υλικού ήταν αντιπροσωπευτικά δοκίμια από τα κυλινδρικά που παρασκευάστηκαν από τα μίγματα σχεδιασμού. Ο αριθμός των δοκιμών ήταν 9 για κάθε τιμή του λόγου N/T (0.25, 0.30, 0.35), από τα οποία 3 για κάθε τιμή του λόγου A/Π (5, 9, 15 %).

Για την δοκιμή της θλίψης των κυλινδρικών δοκιμών χρησιμοποιήθηκε η υδραυλική πρέσα MTS του Εργαστηρίου Οδοποιίας. Η μηχανή αυτή διαθέτει σερβομηχανισμό έτσι ώστε να έχει τη δυνατότητα ελέγχου του φορτίου και της παραμόρφωσης. Επίσης είναι συνδεδεμένη με ηλεκτρονικό υπολογιστή ο οποίος δείχνει κάθε στιγμή τις ενδείξεις του φορτίου και των μηχανισιόμετρων. Οι πλάκες της μηχανής, ανάμεσα στις οποίες συνθλίβονται τα δοκίμια είναι επίπεδες, καλά λειασμένες και κατασκευασμένες από σκληρό μέταλλο.

Για να εξασφαλισθεί η επιπεδότητα και η παραλληλία των δύο βάσεων του κάθε δοκιμίου, οι βάσεις καλύφθηκαν με κατάλληλο υλικό. Για το σκοπό αυτό (καπέλωμα) χρησιμοποιήθηκε σιδηρόστοκος. Αρχικά διαστρώθηκε μια μικρή ποσότητα πάνω στις δύο βάσεις του δοκιμίου και στην συνέχεια τοποθετήθηκαν πάνω σ' αυτές δύο φύλλα αλουμινόχαρτου, ένα για κάθε βάση. Επειτα το δοκίμιο τοποθετήθηκε πάνω στην κάτω πλάκα της μηχανής, ώστε ο άξονάς του να είναι κάθετος στο επίπεδο της πλάκας. Στην συνέχεια επιβλήθηκε στο δοκίμιο ένα πολύ μικρό φορτίο έτσι ώστε να απλωθεί ο σιδηρόστοκος και να καλύψει ολόκληρη την επιφάνεια της κάθε βάσης, δημιουργώντας έτσι ένα στρώμα πάχους 1 mm περίπου. Το δοκίμιο παρέμενε στην θέση αυτή για μερικά λεπτά έτσι ώστε να στεγνώσει τελείως ο σιδηρόστοκος.

Την ίδια στιγμή προσαρμόζονταν τα δύο μηχανισιόμετρα πάνω στο δοκί-

μιο σε αντιδιαμετρικές θέσεις. Τα μηκυνσιόμετρα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν δύο τύπου :

α) Τα LVDT τα οποία είναι επαγωγικού τύπου και τα οποία προσαρμόζονταν πάνω στο δοκίμιο με την βοήθεια 4 ειδικών μεταλλικών διατάξεων, 2 για κάθε LVDT, οι οποίες σταθεροποιήθηκαν πάνω στο δοκίμιο σε απόσταση 50 mm με σιδηρόστοκο. Τα μηκυνσιόμετρα αυτά χρησιμοποιήθηκαν μόνο στα δοκίμια με λόγο $N/T=0.25$. Τα μηκυνσιόμετρα αυτά κατέγραφαν τις τιμές της παραμόρφωσης, χωρίς να δίνουν κατευθείαν τιμές ανηγμένης παραμόρφωσης.

β) Τα MTS τα οποία είναι ηλεκτρικής αντίστασης με δυνατότητα να τοποθετούνται στο δοκίμιο αντιδιαμετρικά και να στερεώνονται μέσω ελατηρίων, με μήκος μέτρησης παραμόρφωσης 50 mm. Ο τύπος αυτός των μηκυνσιόμετρων αυτών έδινε κατευθείαν τις τιμές της ανηγμένης παραμόρφωσης του δοκιμίου.

Μετά την σκλήρυνση του σιδηρόστοκου επιβάλλονταν η φόρτιση με σταθερή ταχύτητα 1 kN/s έως την στιγμή της θραύσης του δοκιμίου.

Καθ' όλη την διάρκεια της φόρτισης ο ηλεκτρονικός υπολογιστής κατέγραφε τα αποτελέσματα της δοκιμής. Μετά την επεξεργασία των αποτελεσμάτων της δοκιμής με την βοήθεια του προγράμματος EXCEL προέκυψαν τα διαγράμματα τάσεων — παραμορφώσεων που ακολουθούν.

Η τιμή του μέτρου ελαστικότητας κάθε δοκιμίου προκύπτει από το πηλίκο της τάσης προς την παραμόρφωση που αντιστοιχούν στο 1/3 του φορτίου θραύσης. Στον **ΠΙΝΑΚΑ 5** που ακολουθεί δίνεται η τιμή του μέτρου ελαστικότητας κάθε δοκιμίου, ο μέσος όρος, η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής μεταβλητότητας.

Παρατηρούμε ότι τα μίγματα με λόγο $A/\Pi=5\%$ έχουν τους χαμηλότερους συντελεστές μεταλητότητας, παρουσιάζουν δηλαδή μεγαλύτερη ομοιομορφία απ' ότι τα μίγματα με μεγαλύτερο λόγο A/Π .

Επίσης από το φορτίο θραύσης κάθε δοκιμίου υπολογίσθηκε η αντοχή των κυλινδρικών δοκιμίων σε θλίψη. Η διάμετρος κάθε δοκιμίου είναι $d=4.57$ cm και το εμβαδά της βάσης του είναι $E = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 16.403$ cm². Στον **ΠΙΝΑΚΑ 6** δίνεται η τιμή της θλιπτικής αντοχής κάθε δοκιμίου, ο μέσος

όρος, η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής μεταβλητότητας.

Τα μίγματα με λόγο $A/\Pi=5\%$ έχουν χαμηλότερους συντελεστές μεταβλητότητας άρα και καλύτερη ομοιογένεια. Ωστόσο οι τιμές τους δεν είναι ιδιαίτερα ικανοποιητικές λόγω του ότι στα κυλινδρικά δοκίμια το φαινόμενο της κάθισης του τσιμεντοπολτού ήταν έντονο, με αποτέλεσμα τα δοκίμια πολλές φορές να αστοχούν στο άνω τμήμα τους.

5.6.1 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΤΑΣΕΩΝ — ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

Παρατηρώντας τα διαγράμματα τάσεων — παραμορφώσεων των 3 δοκιμών της ίδιας κατηγορίας, δηλαδή με τον ίδιο λόγο N/T και τον ίδιο λόγο A/Π , βλέπουμε ότι η μορφή των καμπύλων είναι περίπου η ίδια. Αρχικά για μικρές τιμές της τάσης και της ανηγμένης παραμόρφωσης οι καμπύλες σχεδόν συμπίπτουν, αλλά όσο αυξάνεται η τάση οι καμπύλες αποκλίνουν. Το γεγονός αυτό που παρατηρείται επίσης και στην περίπτωση του κοινού σκυροδέματος, αποδίδεται στην εγγενή διαφοροποίηση των ρηγματώσεων που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια της φόρτισης και στην επιρροή που αυτές έχουν στις μετρήσεις των παραμορφώσεων. Στα διαγράμματα 5.11(α, β, γ), 5.12(α, β, γ), 5.13(α, β, γ) φαίνεται επίσης το εύρος της θλιπτικής αντοχής.

5.6.2 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΤΟΥ ΜΕΤΡΟΥ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ — ΣΧΟΛΙΑ

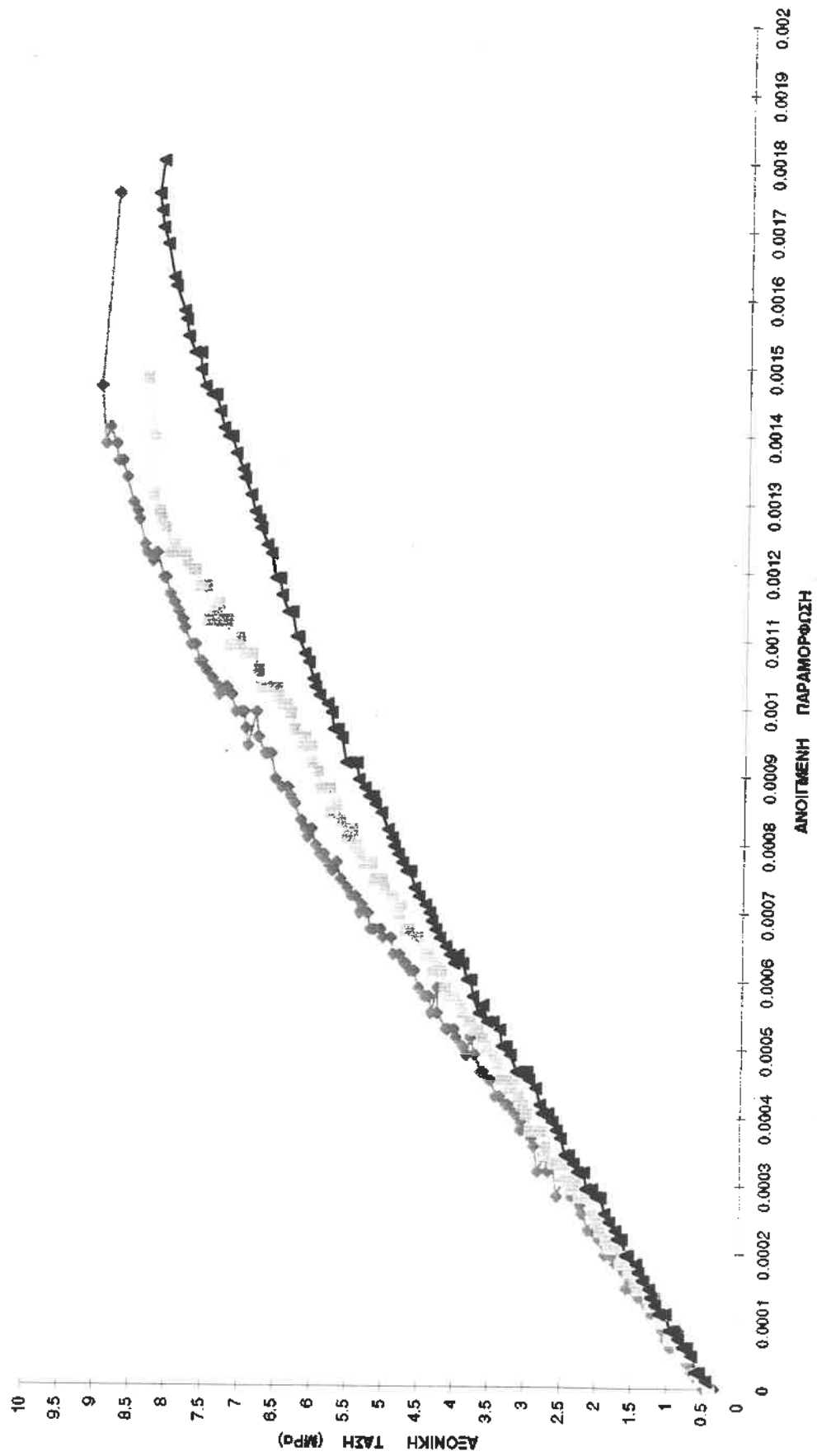
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.14 ($\alpha, \beta, \gamma, \delta$)

Στα διαγράμματα αυτά φαίνεται η έντονη μείωση του μέτρου ελαστικότητας καθώς αυξάνεται ο λόγος A/Π , για συγκεκριμένες τιμές του λόγου N/T . Οι καμπύλες έχουν περίπου την ίδια μορφή πράγμα το οποίο σημαίνει ότι η τιμή του μέτρου ελαστικότητας εξαρτάται κατά κύριο λόγο από την τιμή του λόγου A/Π και λιγότερο από την τιμή του λόγου N/T . Αυτό είναι φυσικό γιατί η δομή του υλικού εξαρτάται κυρίως από την τιμή του λόγου A/Π .

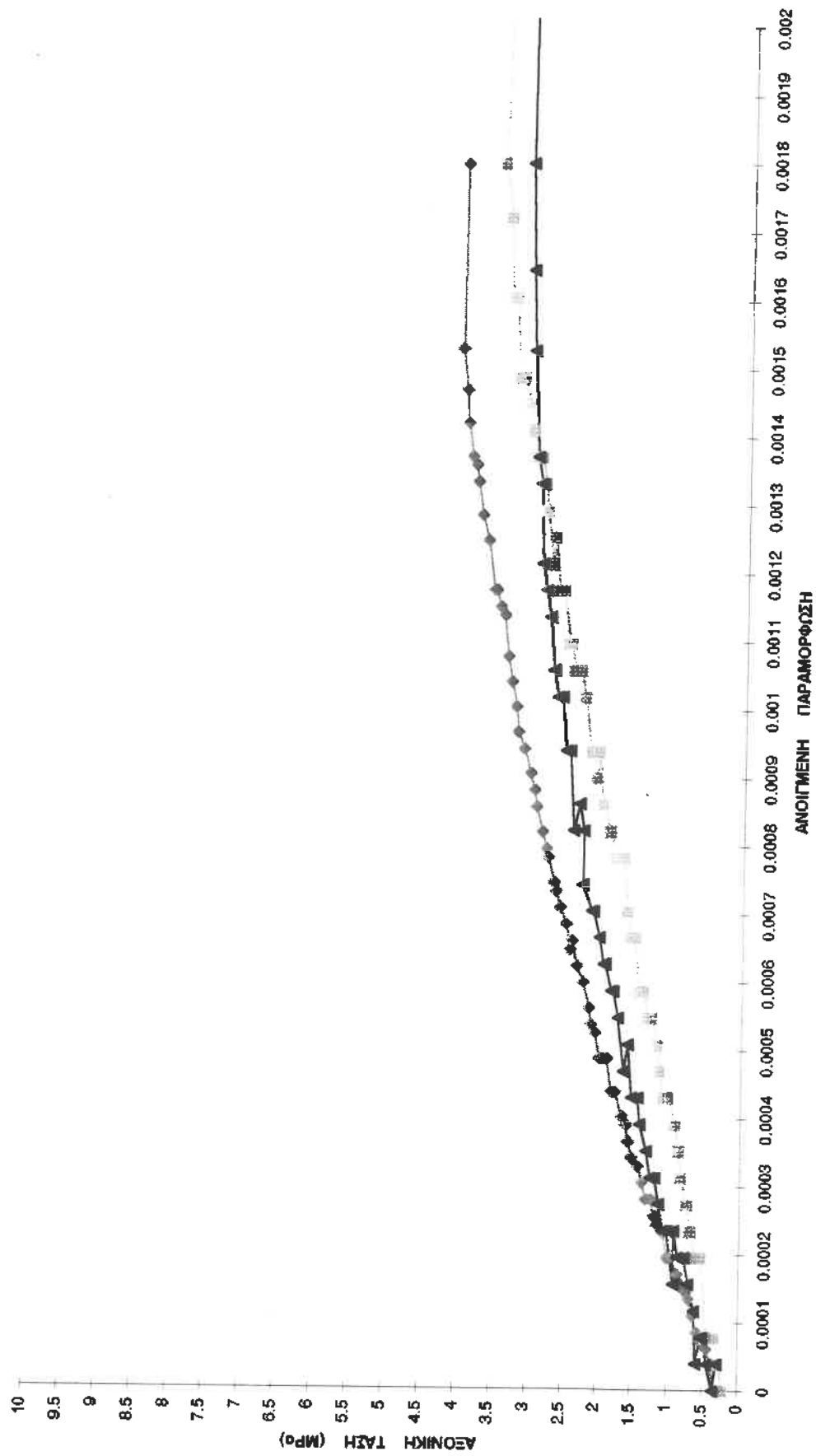
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ 5.15 (α, β, γ, δ)

Η μεταβολή του μέτρου ελαστικότητας του υλικού συναρτήσει του λόγου N/T , για κάθε κατηγορία ανάλογα με τον λόγο A/Π , δίνεται στα διαγράμματα α, β, γ. Παρατηρείται μια μικρή μείωση του μέτρου ελαστικότητας όσο αυξάνεται ο λόγος N/T πράγμα το οποίο οφείλεται στην μείωση της αντοχής του υλικού για μεγάλους λόγους N/T . Στην περίπτωση των δοκιμών με λόγο $N/T=0.25$ και $A/\Pi=15\%$ το μέτρο ελαστικότητας προκύπτει μικρότερο από αυτό των αντίστοιχων δοκιμών με ίδιο λόγο A/Π αλλά μεγαλύτερους λόγους N/T . Το γεγονός αυτό αποδίδεται στην ανομοιομορφία του υλικού και στην αδυναμία καλής συμπίκνωσης του συγκεκριμένου μίγματος.

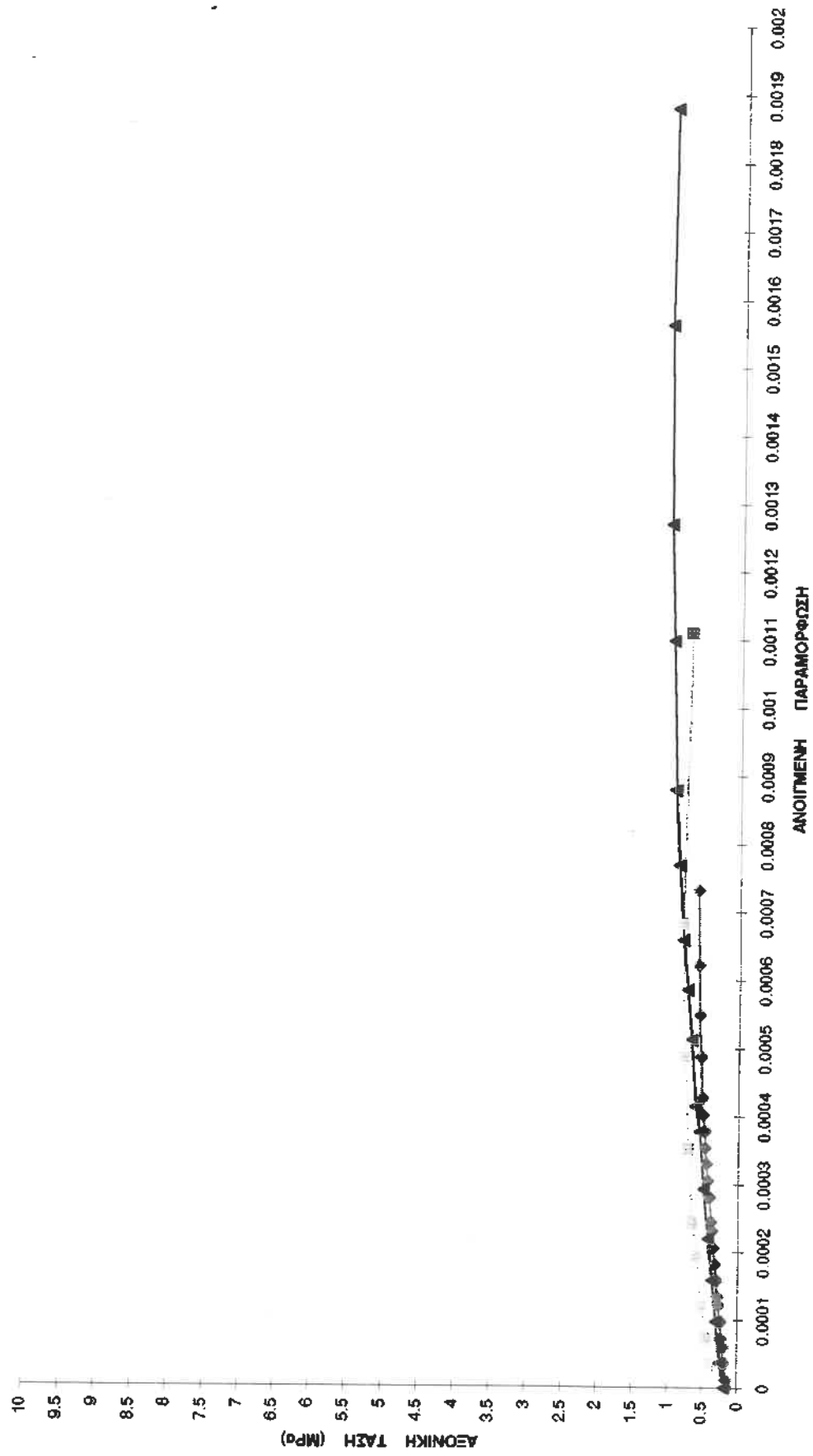
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.11α

Δ1-Δ2-Δ3 ($N/T=0.25$ - $A/\Pi=5^\circ / \infty$)

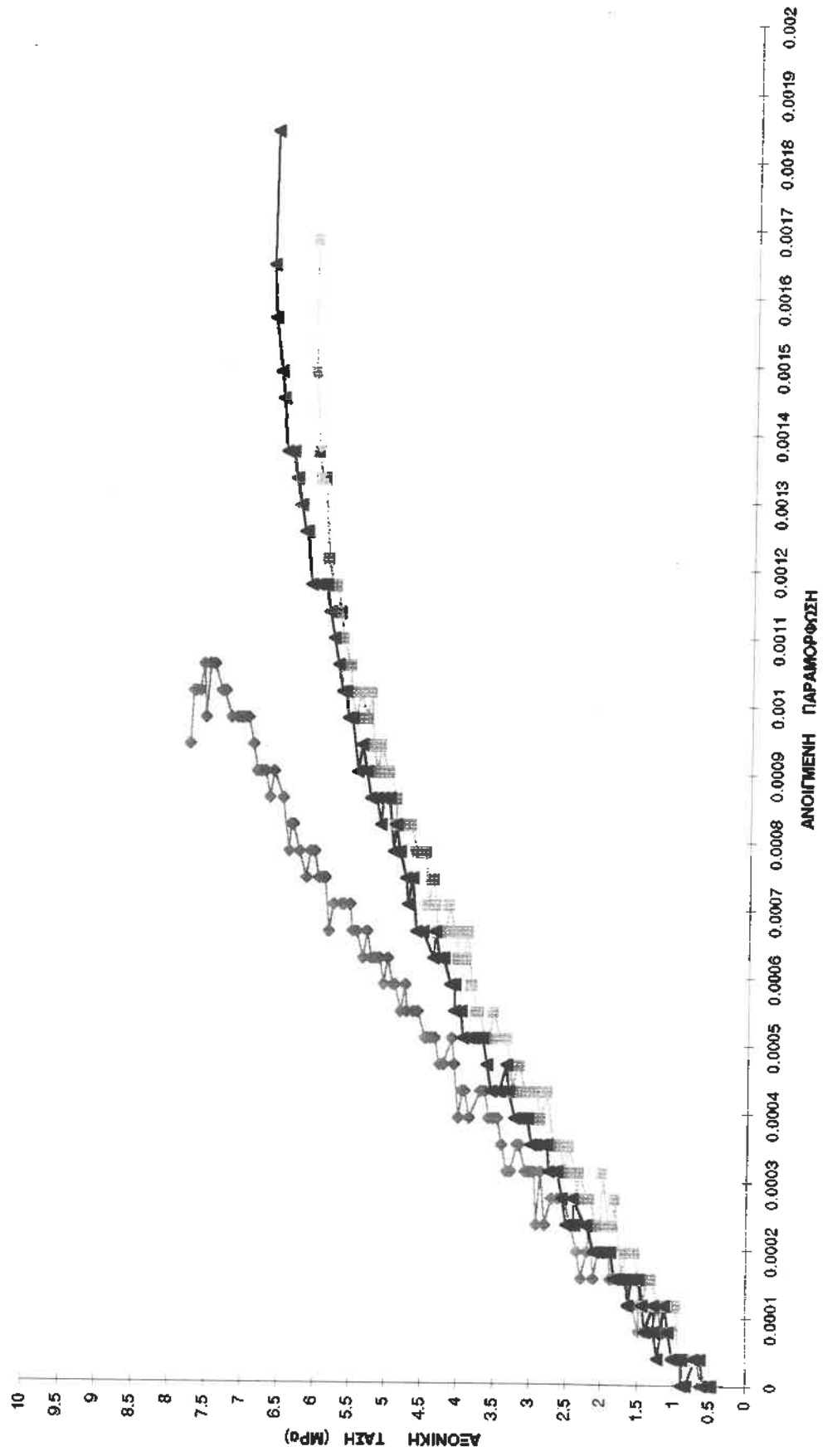
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.11β

Δ4-Δ5-Δ6 ($N/T=0.25$ - $A/\Pi=9^\circ/\infty$)

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.11Υ

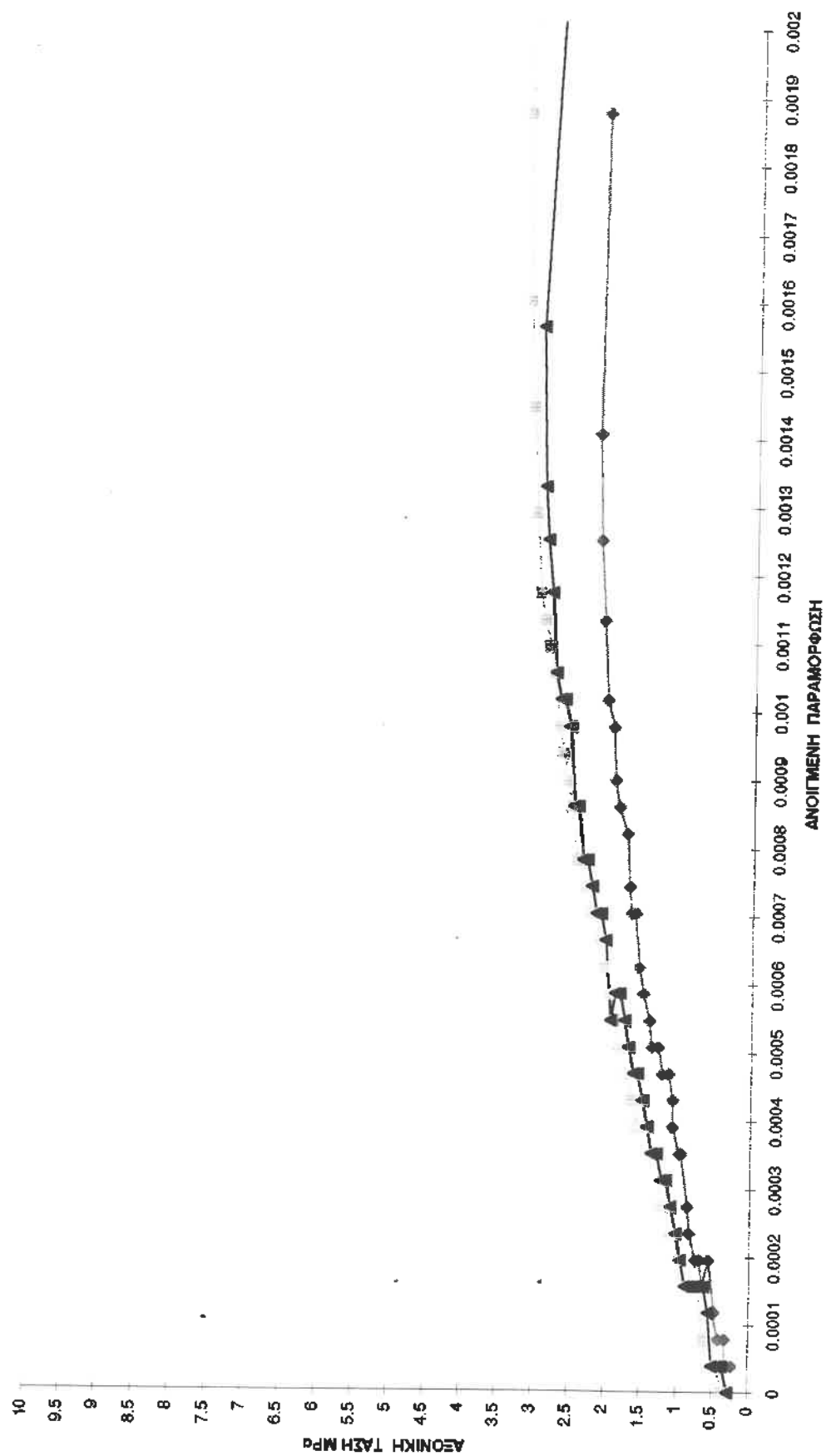
Δ7-Δ8-Δ9 ($N/T=0.25$ - $A/\Pi=15^\circ/\infty$)

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.12α

 $\Delta 10-\Delta 11-\Delta 12 \quad (N/T=0,30 - A/\Pi=5^\circ / \infty)$


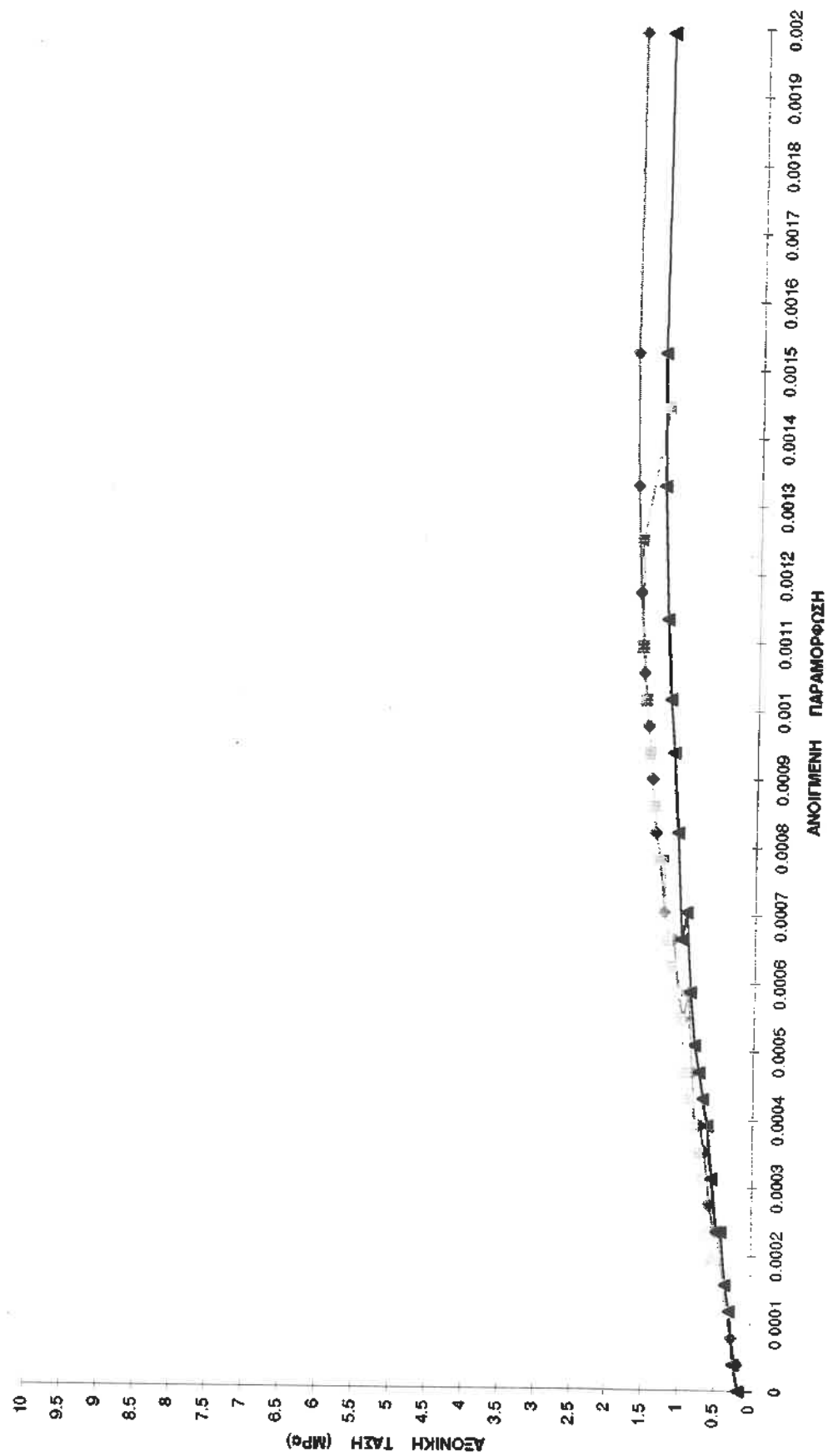
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.12β

Δ13-Δ14-Δ15 ($N/\Gamma=0,30$ - $A/\Gamma=9^\circ / \infty$)

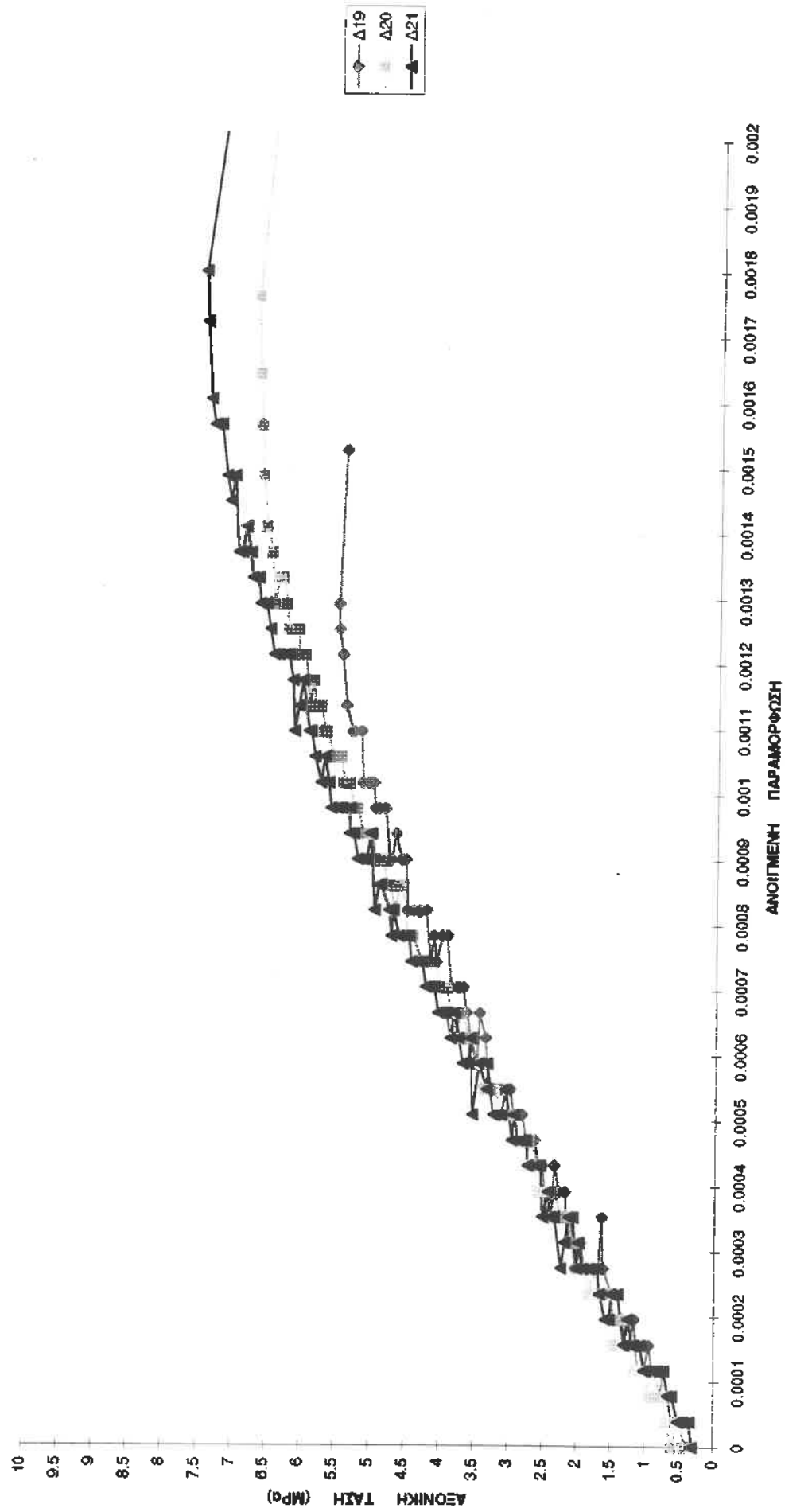


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.12γ

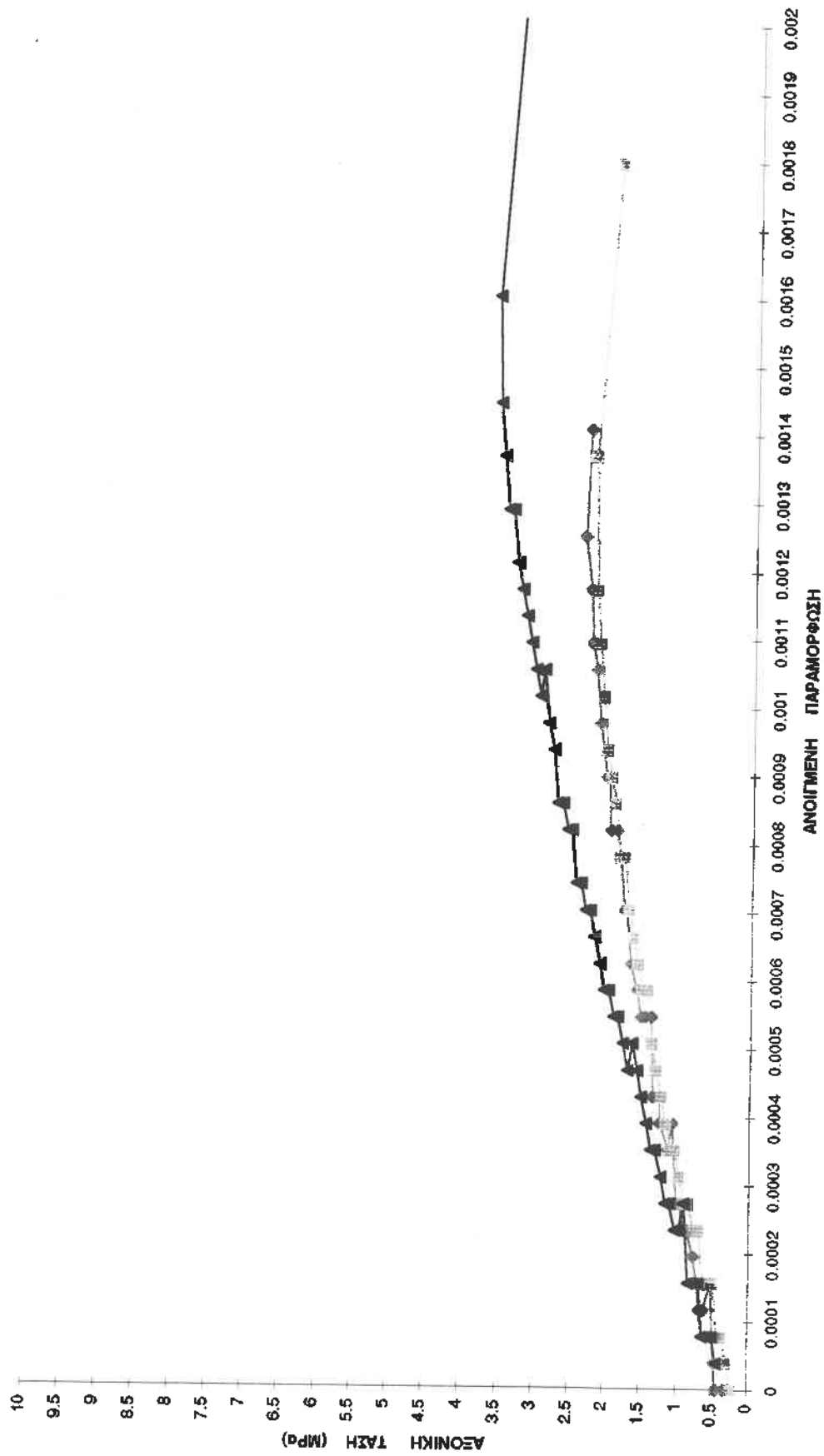
Δ16-Δ17-Δ18 ($N/T=0,30$ - $A/P=15^\circ / \infty$)



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.13α

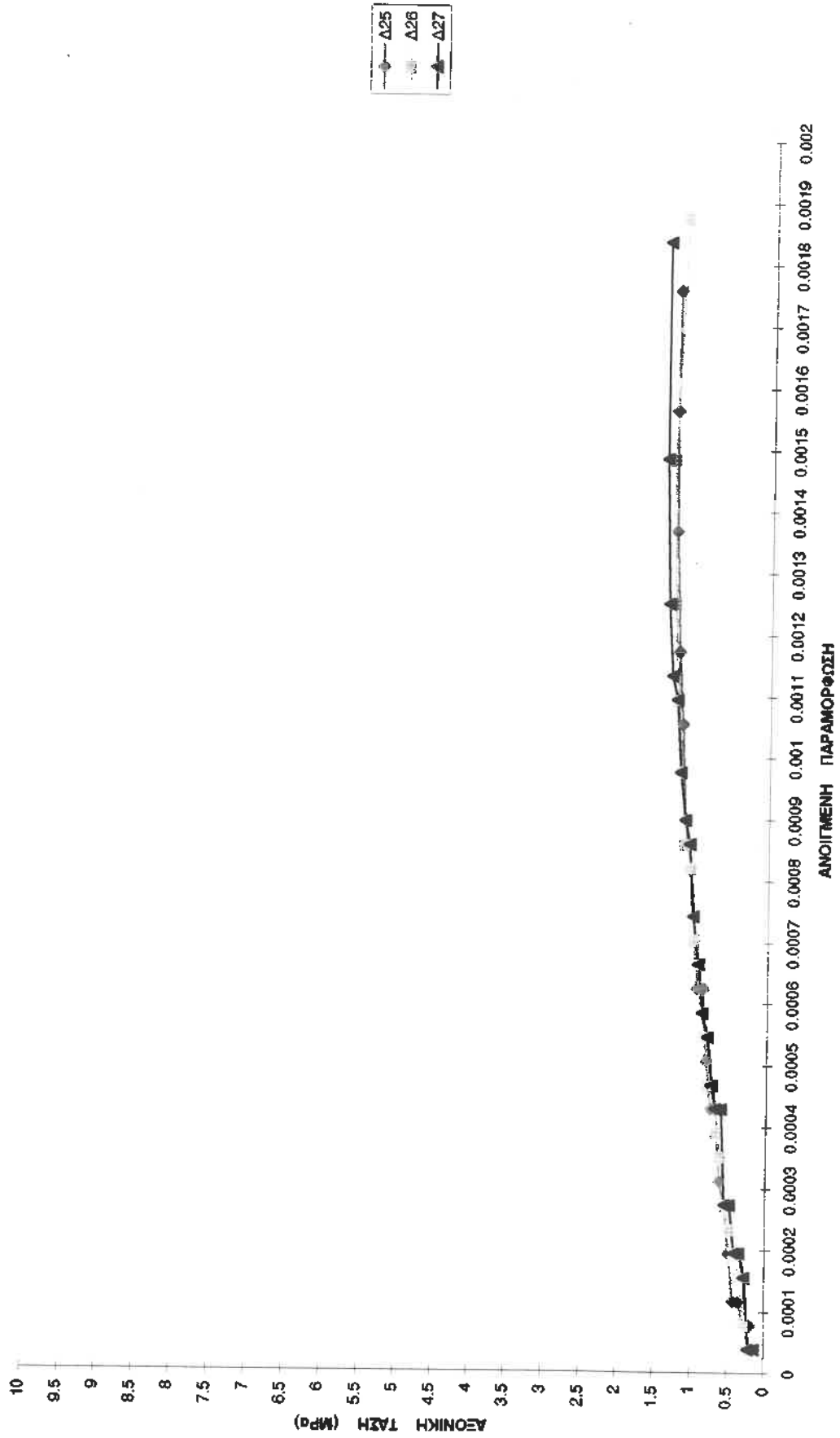
 $\Delta 19-\Delta 20-\Delta 21 \quad (N/T=0.35 - A/\Pi=5^\circ / \infty)$


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.13β

Δ22-Δ23-Δ24 ($N/T=0.35$ - $A/\Pi=9^\circ / \infty$)

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.13γ

$\Delta 25-\Delta 26-\Delta 27$ ($N/T=0.35$ - $A/\Pi=15^\circ / \infty$)



ΠΙΝΑΚΑΣ 5

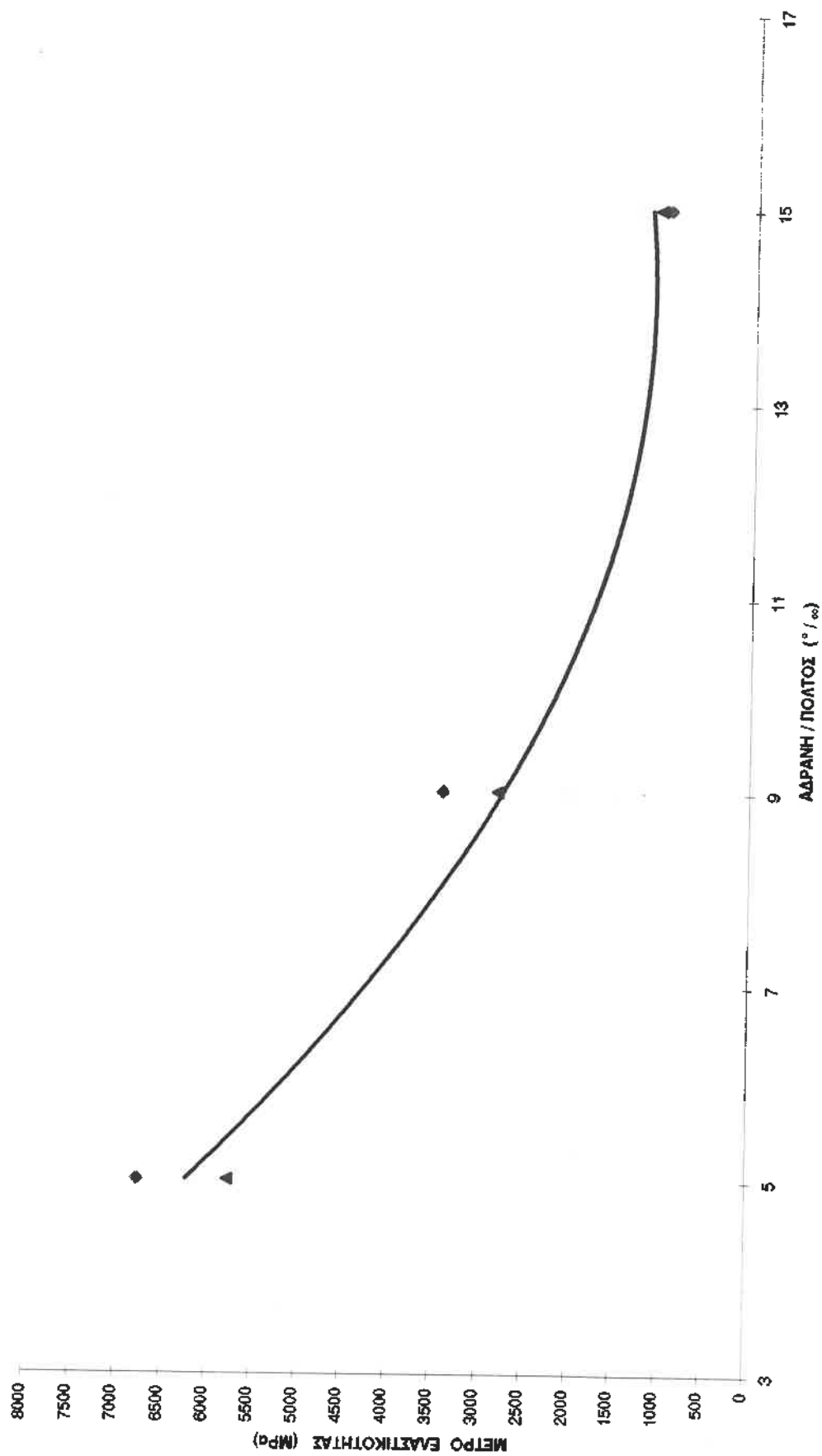
ΜΕΤΡΑ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ								
Α / Α	ΛΟΓΟΣ N / T	ΡΕΥΣΤΟ- ΠΟΙΗΤΙΚΟ	ΦΑΙΝΟ. ΒΑΡΟΣ	Μ.Ο	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤ/ΤΑΣ	Μ.Ο	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛ	ΣΥΝΤΕΛΕ ΜΕΤΑΒΛΗ
		%	gr/cm ³	gr/cm ³	MPa	MPa	MPa	%
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 5 ο / οο								
Δ1			1.401		6768			
Δ2	0.25	0.9	1.434	1.353	6151	6228	506	8.12
Δ3			1.224		5765			
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 9 ο / οο								
Δ1			0.979		3414			
Δ2	0.25	0.9	0.836	0.875	2016	2745	700	25.54
Δ3			0.809		2805			
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 15 ο / οο								
Δ1			0.602		983			
Δ2	0.25	0.9	0.644	0.628	1278	1185	150	13.42
Δ3			0.639		1086			
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 5 ο / οο								
Δ1			1.255		5906			
Δ2	0.30	0.37	1.082	1.162	-	5937	43	0.73
Δ3			1.148		5.967			
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 9 ο / οο								
Δ1			0.823		2087			
Δ2	0.30	0.37	0.817	0.820	2875	2586	434	16.77
Δ3			0.821		2795			
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 15 ο / οο								
Δ1			0.626		1582			
Δ2	0.30	0.37	0.613	0.613	1724	1533	220	14.36
Δ3			0.601		1292			

ΠΙΝΑΚΑΣ 5

A / A	ΛΟΓΟΣ N / T	ΡΕΥΣΤΟ- ΠΟΙΗΤΙΚΟ	ΦΑΙΝΟ. ΒΑΡΟΣ	M.O	ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤ/ΤΑΣ	M.O	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙ	ΣΥΝΤΕΛΕ ΜΕΤΑΒΛΗ
		%	gr/cm ³	gr/cm ³	MPa	MPa	MPa	%
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 5 o / ∞								
Δ1			1.074		5469			
Δ2	0.35	0.2	1.067	1.081	5186	5430	227	4.18
Δ3			1.102		5635			
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 9 o / ∞								
Δ1			0.783		1786			
Δ2	0.35	0.2	0.764	0.784	2310	2288	489	21.39
Δ3			0.803		2766			
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 15 o / ∞								
Δ1			0.607		1684			
Δ2	0.35	0.2	0.599	0.605	1302	1485	192	12.95
Δ3			0.608		1465			

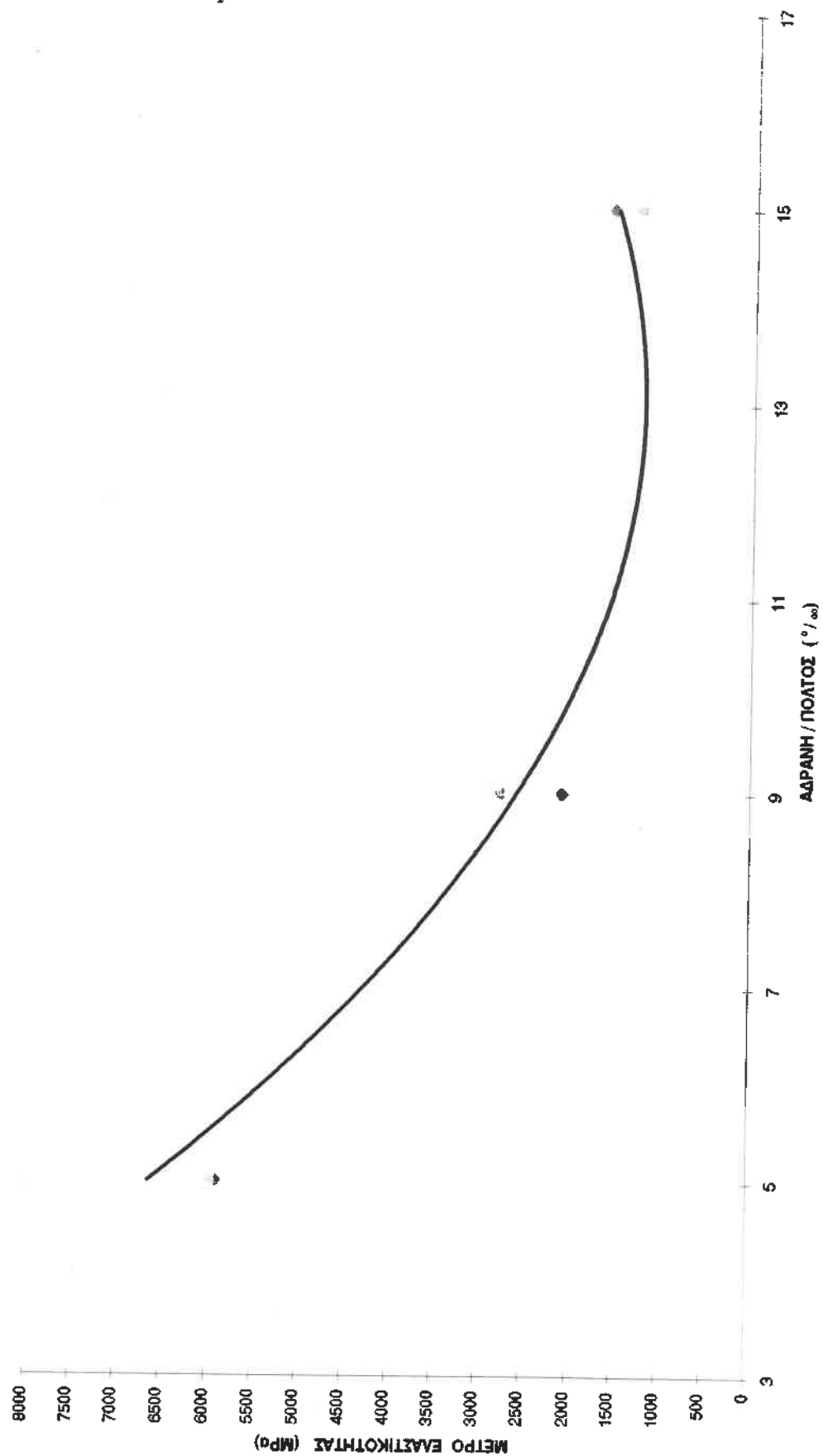
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.14α

ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΛΟΓΟ ΝΕΡΟ / ΤΣΙΜΕΝΤΟ=0.25



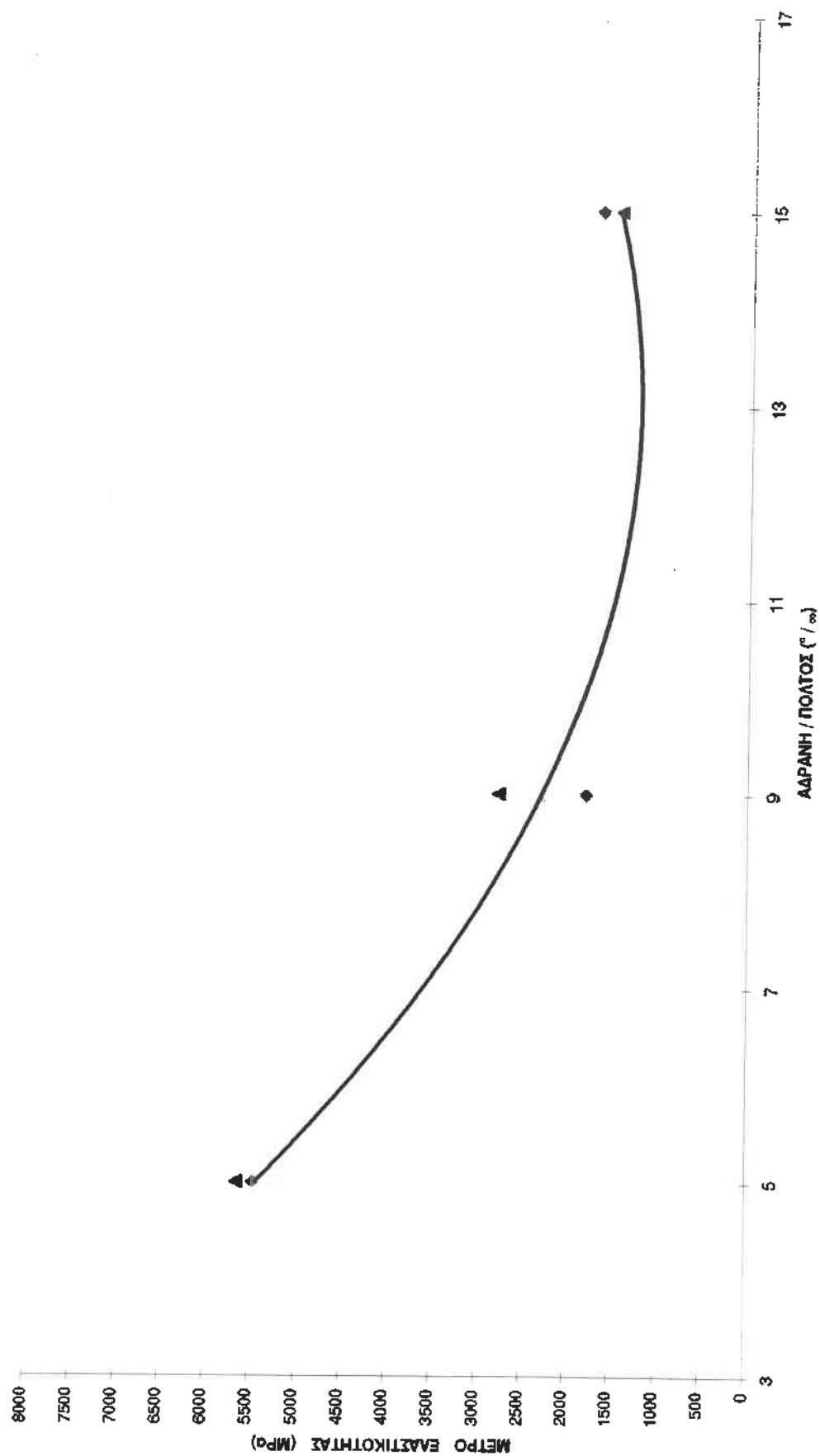
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.14β

ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΛΟΓΟ ΝΕΡΟ / ΤΣΙΜΕΝΤΟ=0.30



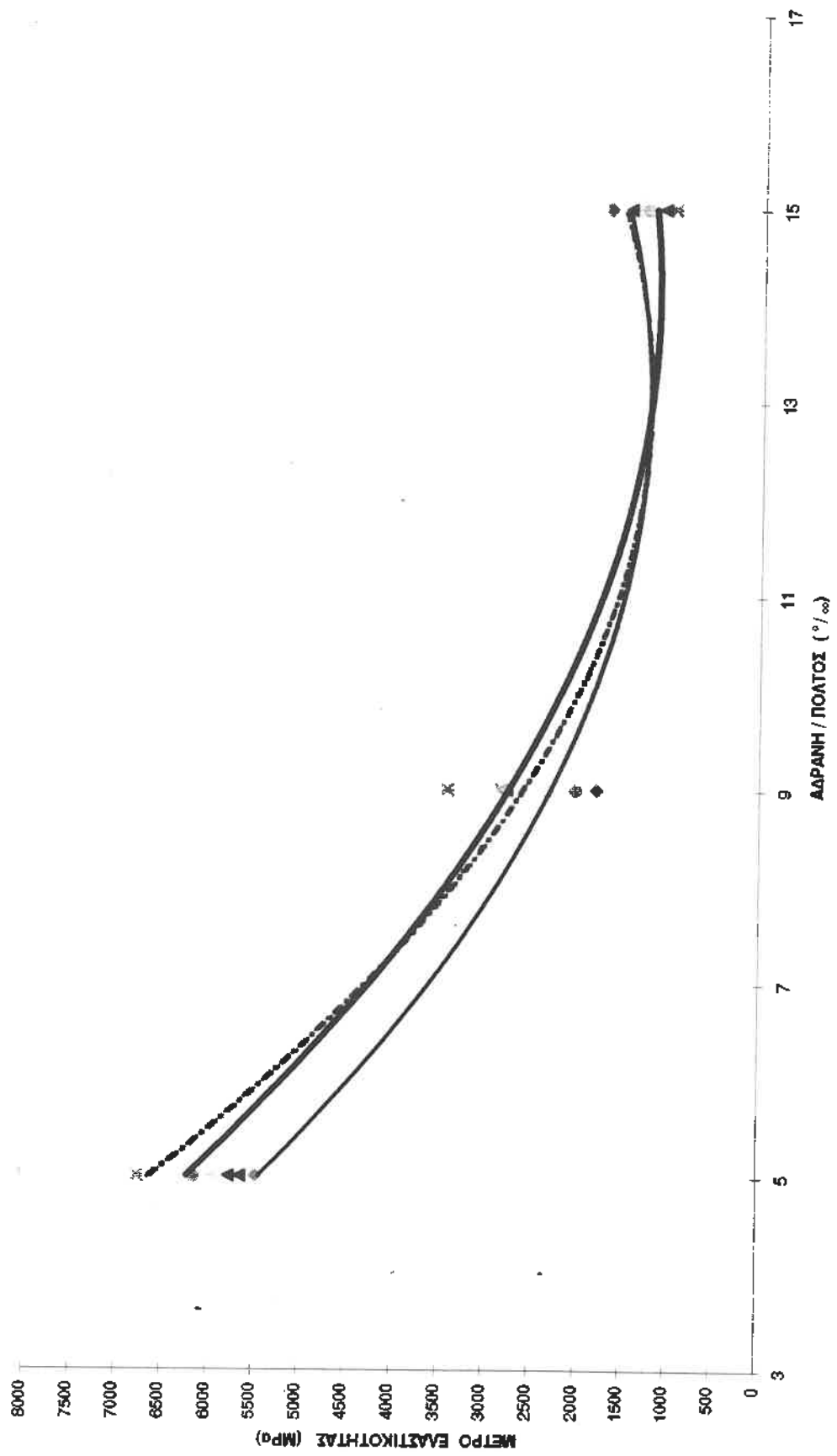
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.14γ

ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΛΟΓΟ ΝΕΡΟΥ / ΤΣΙΜΕΝΤΟ=0.35



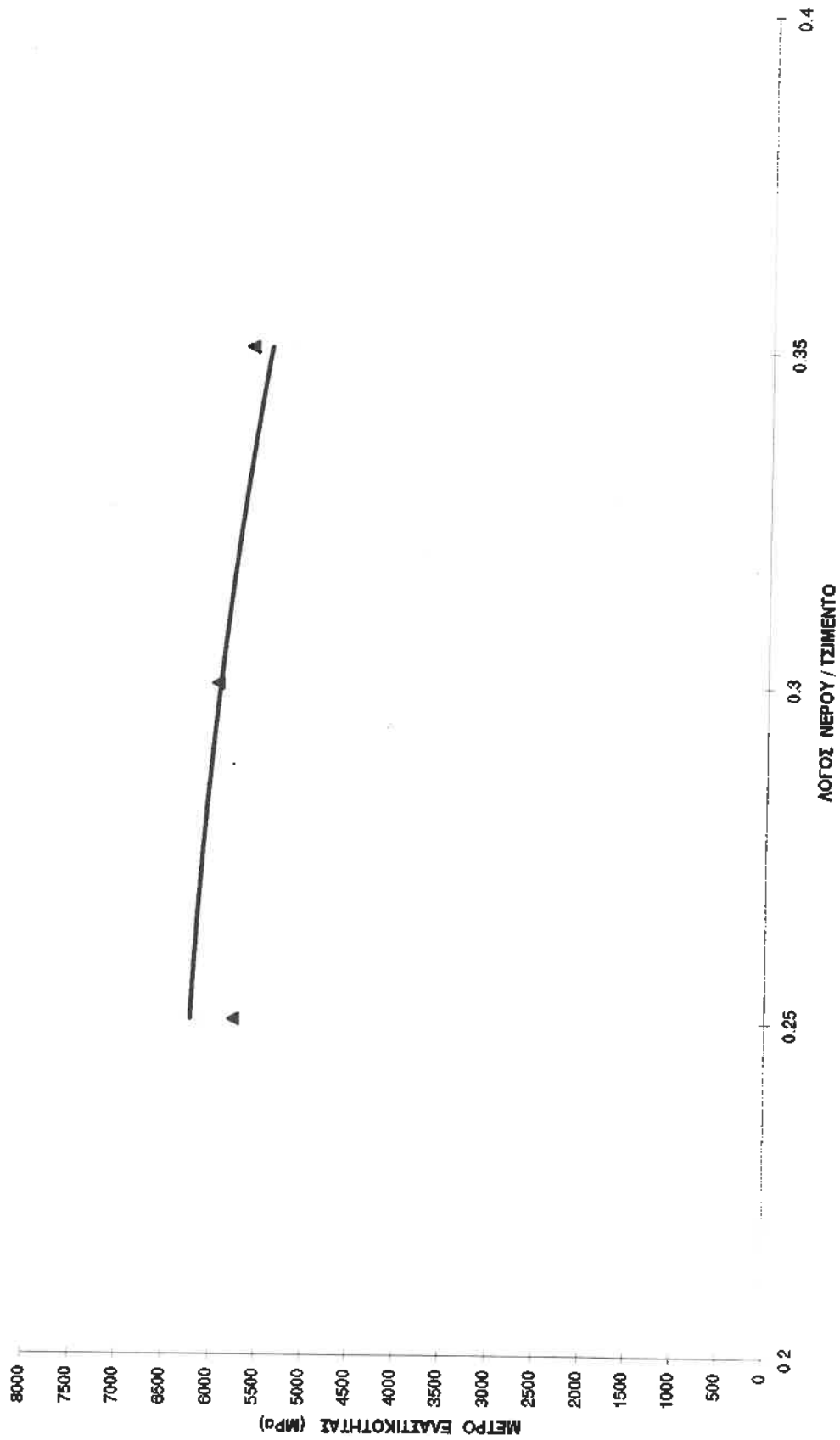
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.145

ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΛΟΓΟ ΝΕΡΟ / ΤΣΙΜΕΝΤΟ = (0.25 , 0.30 , 0.35)



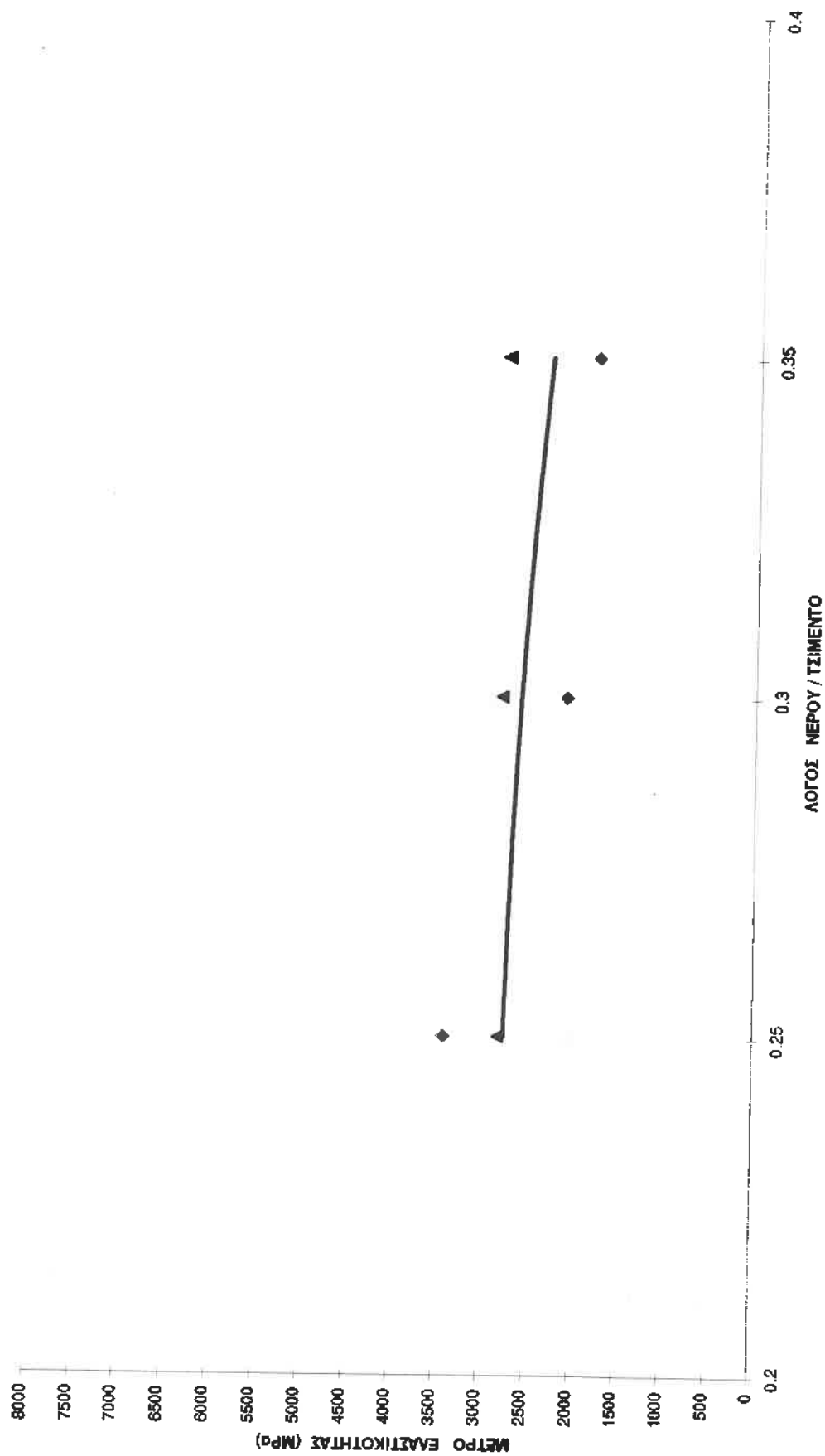
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.15α

ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΛΟΓΟ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 5° / ∞



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.15β

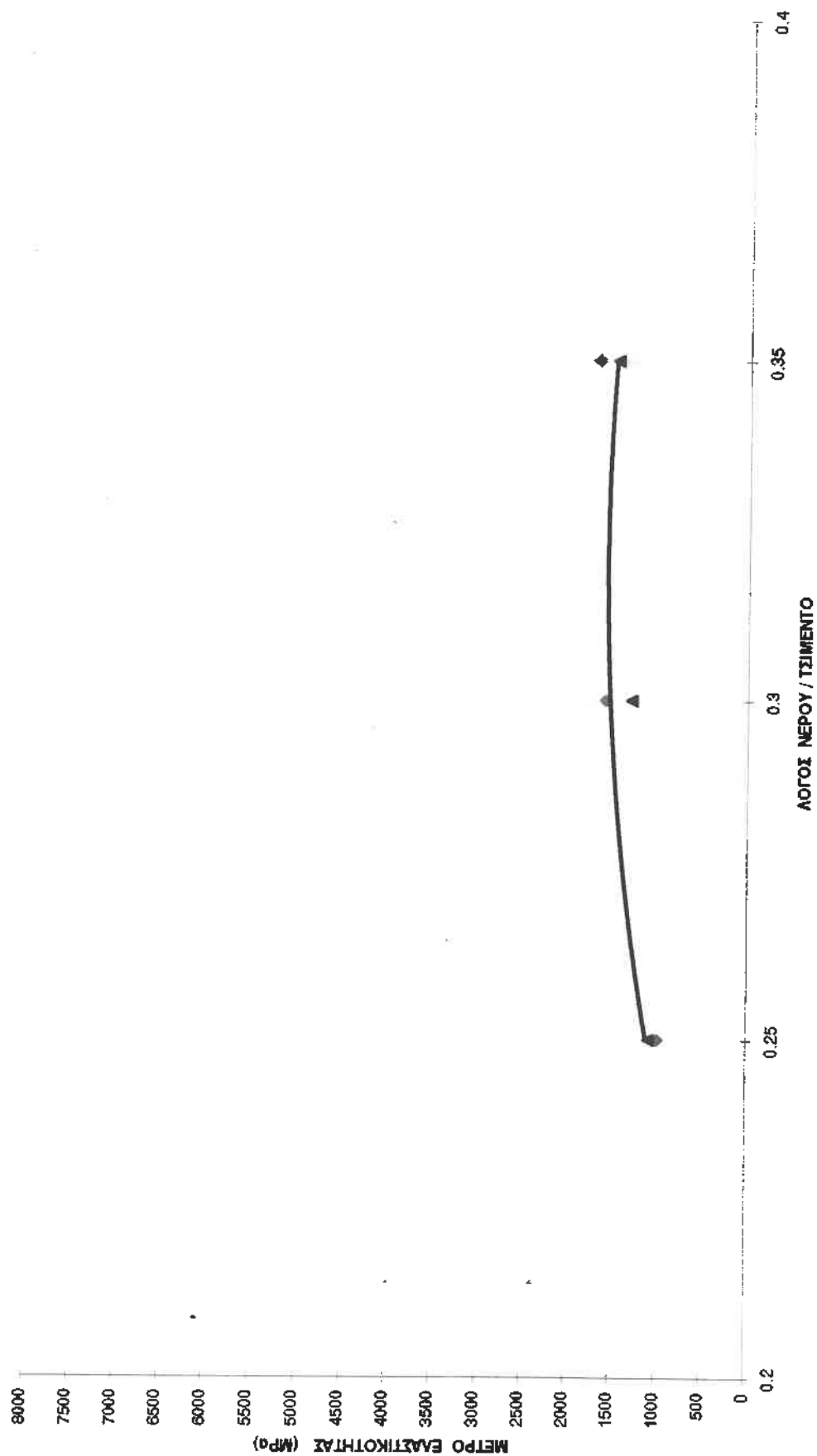
ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΛΟΓΟ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = $9^\circ / \infty$



— MO

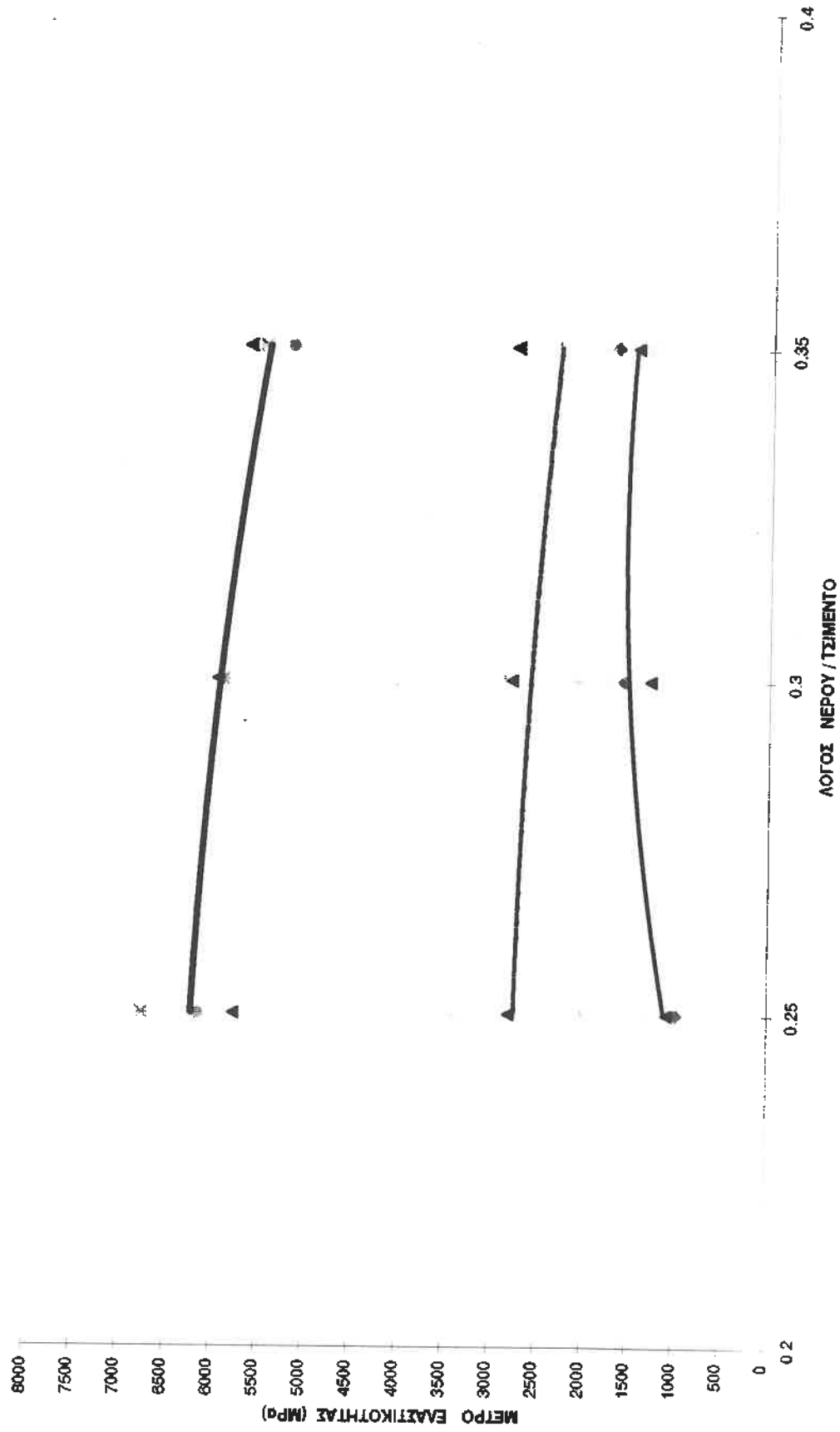
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.15Υ

ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΛΟΓΟ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 15° / ∞



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.153

ΜΕΤΡΟ ΕΛΑΣΤΙΚΟΤΗΤΑΣ ΓΙΑ ΛΟΓΟ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = $(5^\circ / \infty, 9^\circ / \infty, 15^\circ / \infty)$



ΠΙΝΑΚΑΣ 3

ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ ΘΛΙΨΗ								
Α / Α	ΛΟΓΟΣ N / T	ΡΕΥΣΤΟ- ΠΟΙΗΤΙΚΟ	ΦΑΙΝΟ. ΒΑΡΟΣ	M.O	ΑΝΤΟΧΗ ΘΛΙΨΗΣ	M.O	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛ.	ΣΥΝΤΕΛ. ΜΕΤΑΒΛΗ.
		%	gr / cm ³	gr / cm ³	MPa	MPa	MPa	%
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 5 ο / οο								
Δ1			1.401		9.024			
Δ2	0.25	0.9	1.434	1.353	8.369	8.548	0.417	4.88
Δ3			1.224		8.25			
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 9 ο / οο								
Δ1			0.979		4.021			
Δ2	0.25	0.9	0.836	0.875	3.468	3.523	0.473	13.44
Δ3			0.809		3.079			
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 15 ο / οο								
Δ1			0.602		0.59			
Δ2	0.25	0.9	0.644	0.628	0.804	0.808	0.220	27.23
Δ3			0.639		1.03			
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 5 ο / οο								
Δ1			1.255		7.774			
Δ2	0.3	0.37	1.082	1.162	6.099	6.857	0.849	12.38
Δ3			1.148		6.697			
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 9 ο / οο								
Δ1			0.823		2.183			
Δ2	0.3	0.37	0.817	0.820	3.178	2.775	0.524	18.87
Δ3			0.821		2.963			
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 15 ο / οο								
Δ1			0.626		1.722			
Δ2	0.3	0.37	0.613	0.613	1.618	1.561	0.196	12.58
Δ3			0.601		1.342			

ΠΙΝΑΚΑΣ 3

A / A	ΛΟΓΟΣ N / T	ΡΕΥΣΤΟ- ΠΟΙΗΤΙΚΟ	ΦΑΙΝΟ. ΒΑΡΟΣ	M.O	ΑΝΤΟΧΗ ΘΛΙΨΗΣ	M.O	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙ.	ΣΥΝΤΕΛΕ. ΜΕΤΑΒΛΗ.
		%	gr / cm ³	gr / cm ³	MPa	MPa	MPa	%
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 5 ο / οο								
Δ1			1.074		5.501			
Δ2	0.35	0.2	1.067	1.081	6.697	6.558	0.994	15.16
Δ3			1.102		7.475			
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 9 ο / οο								
Δ1			0.783		2.362			
Δ2	0.35	0.2	0.764	0.784	2.218	2.718	0.744	27.38
Δ3			0.803		3.573			
ΛΟΓΟΣ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 15 ο / οο								
Δ1			0.607		1.304			
Δ2	0.35	0.2	0.599	0.605	1.328	1.354	0.066	4.87
Δ3			0.608		1.428			

5.6.3 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΘΛΙΠΤΙΚΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ **ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ**

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ 5.16 (α, β, γ, δ)

Στα διαγράμματα αυτά δίνεται η μεταβολή της θλιπτικής αντοχής των κυλινδρικών δοκιμίων συναρτήσει του λόγου A/P για σταθερές τιμές του λόγου N/T . Με την αύξηση του λόγου A/P μειώνεται η ποσότητα του τσιμεντοπολτού στο μίγμα και άρα η αντοχή του υλικού.

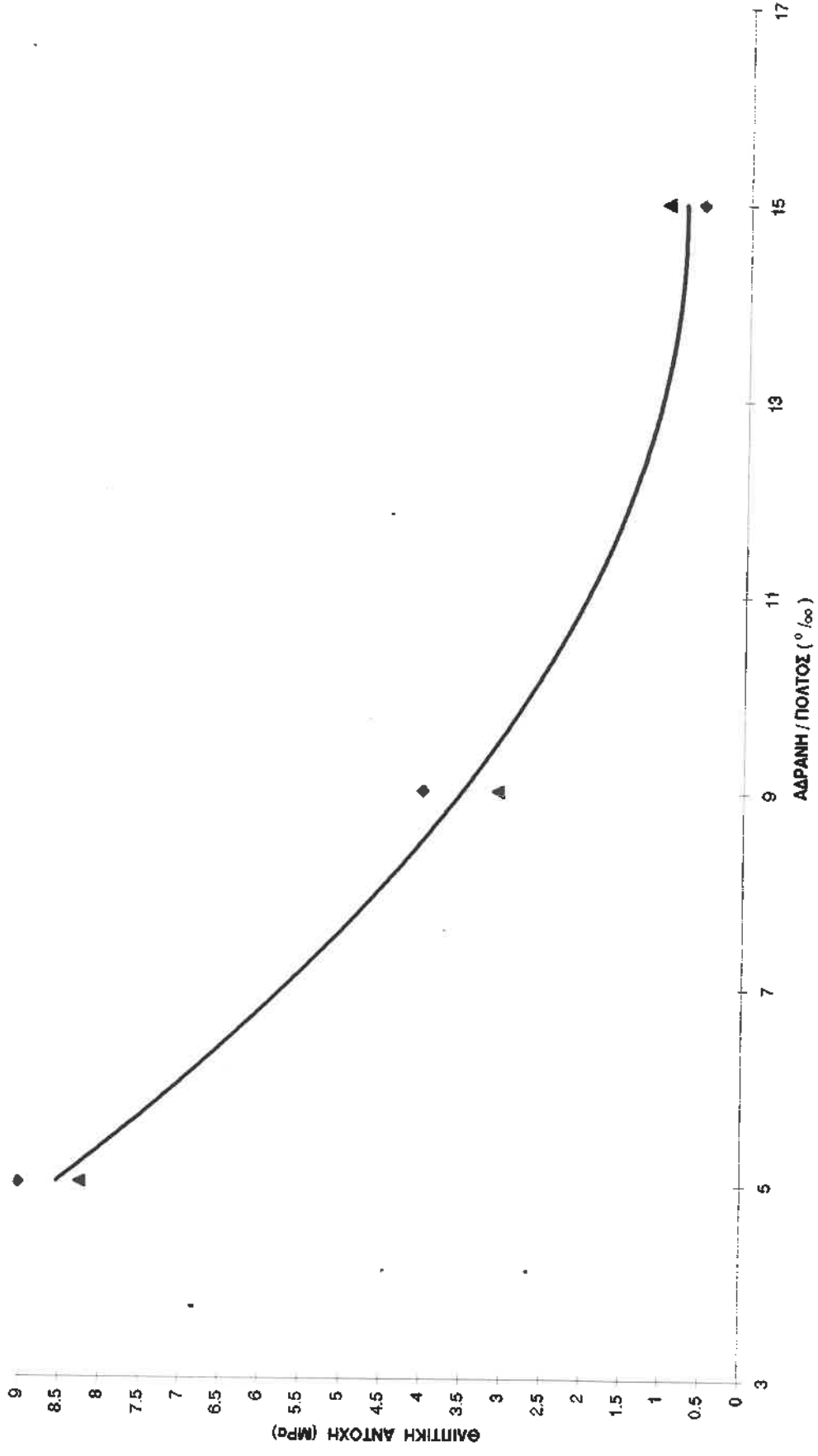
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ 5.17 (α, β, γ, δ)

Στα διαγράμματα αυτά δίνεται η μεταβολή της θλιπτικής αντοχής των κυλινδρικών δοκιμίων συναρτήσει του λόγου N/T για σταθερές τιμές του λόγου A/P . Παρατηρείται μια μείωση της τιμής της θλιπτικής αντοχής με την αύξηση του λόγου N/T πράγμα το οποίο παρατηρείται και στο κοινό σκυρόδεμα. Στην περίπτωση του μίγματος με λόγο $A/P=15\%$ και λόγο $N/T=0.25$ οι τιμές της θλιπτικής αντοχής είναι μειωμένες σε σχέση με τα μίγματα ίδιου λόγου A/P και μεγαλύτερου λόγου N/T , πράγμα το οποίο οφείλεται είτε στην μερική ενυδάτωση του τσιμέντου, είτε στην κακή συμπίκνωση των δοκιμίων.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.17ε

Στο διάγραμμα αυτό δίνεται η μεταβολή της θλιπτικής αντοχής του ελαφροσκυροδέματος συναρτήσει της πυκνότητας του. Το διάγραμμα αυτό περιέχει όλες της τιμές πυκνότητας όλων των δοκιμίων ανεξάρτητα από τους λόγους A/P και N/T . Όπως και στα κυβικά δοκίμια η αύξηση της πυκνότητας οδηγεί σε μεγάλη αύξηση της θλιπτικής αντοχής του υλικού.

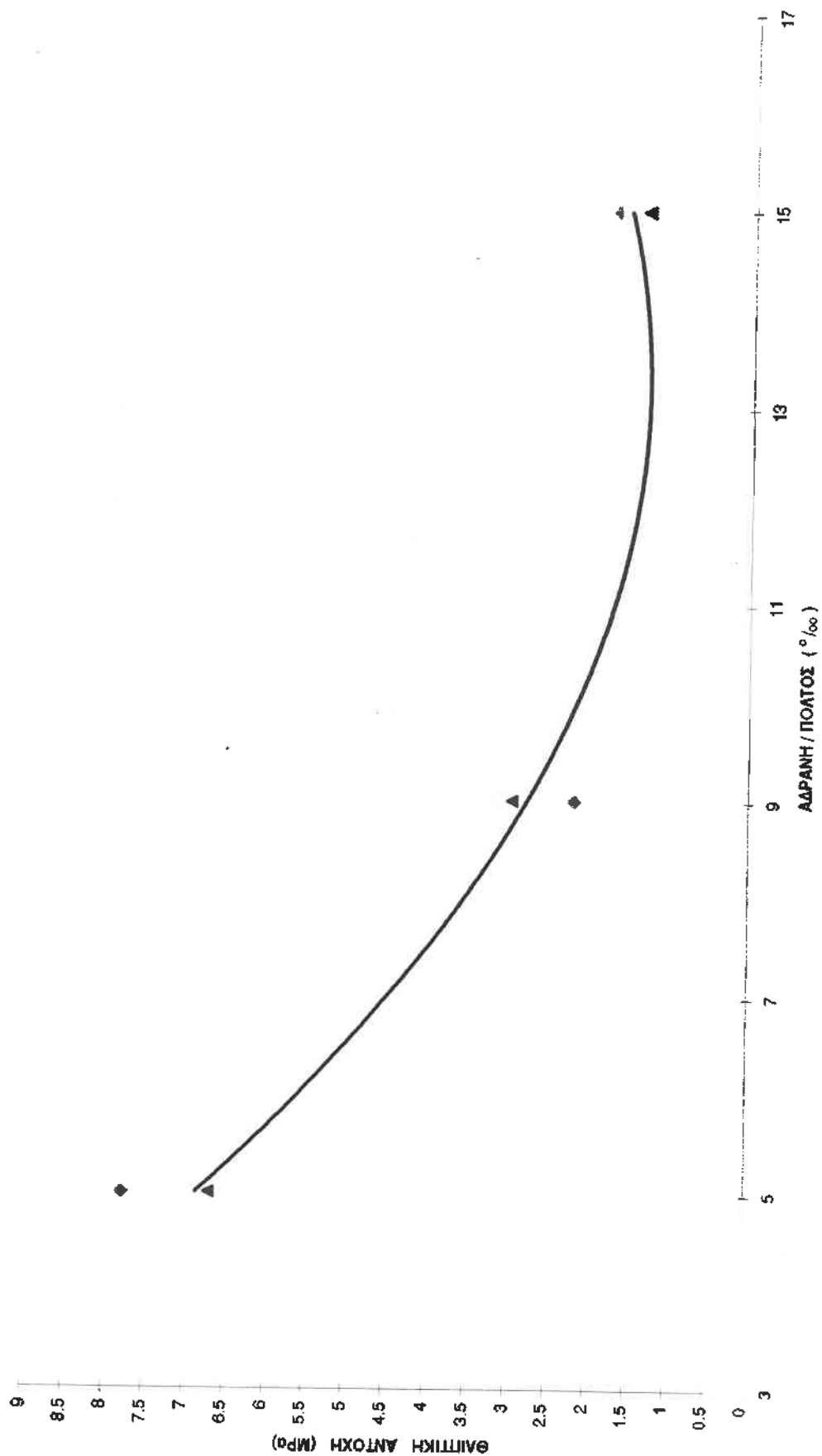
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.16α
ΕΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΛΟΓΟ $N/T=0.25$



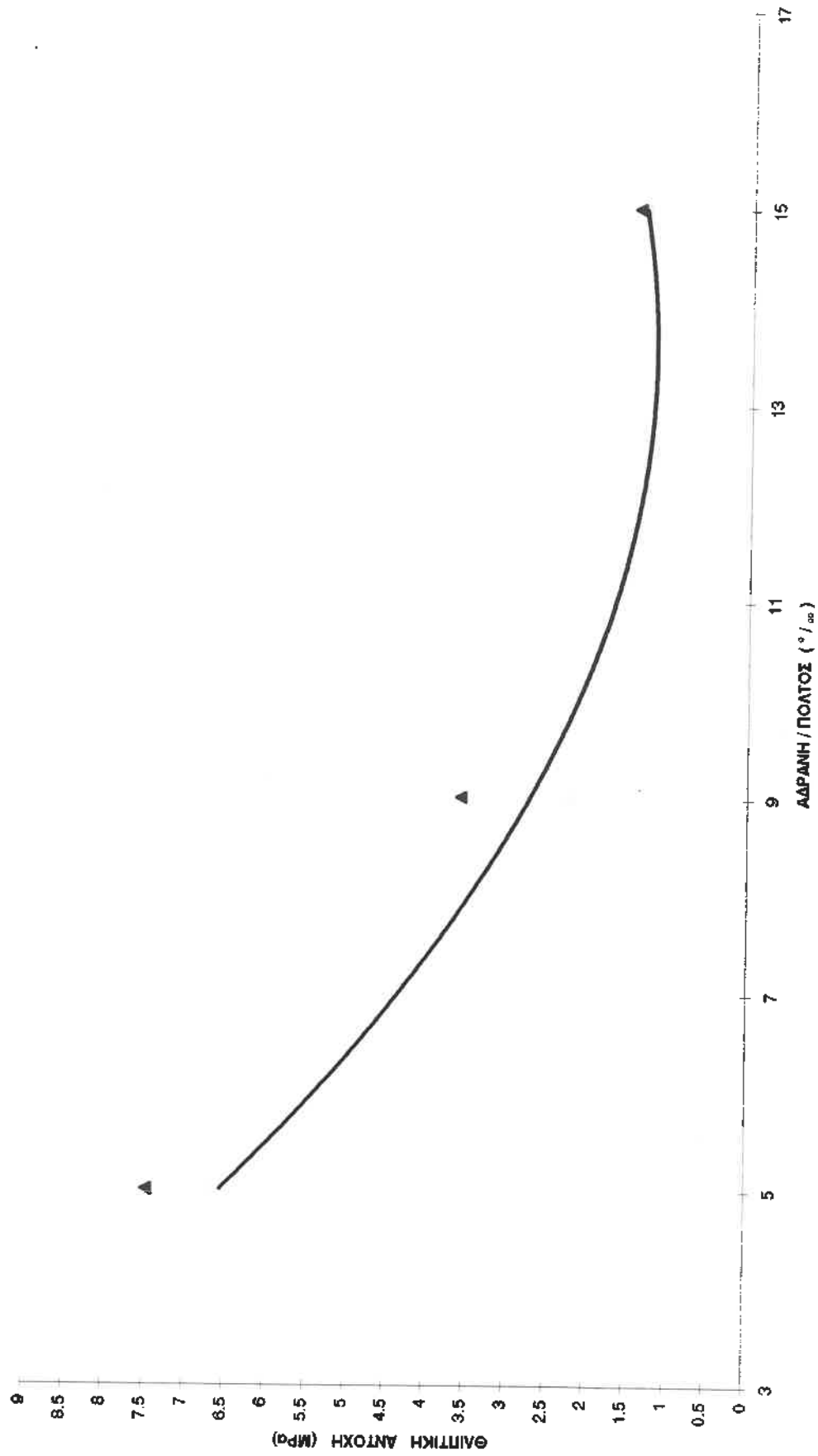
M.O.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.16β

ΘΑΛΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΛΟΓΟ $N/T=0.30$

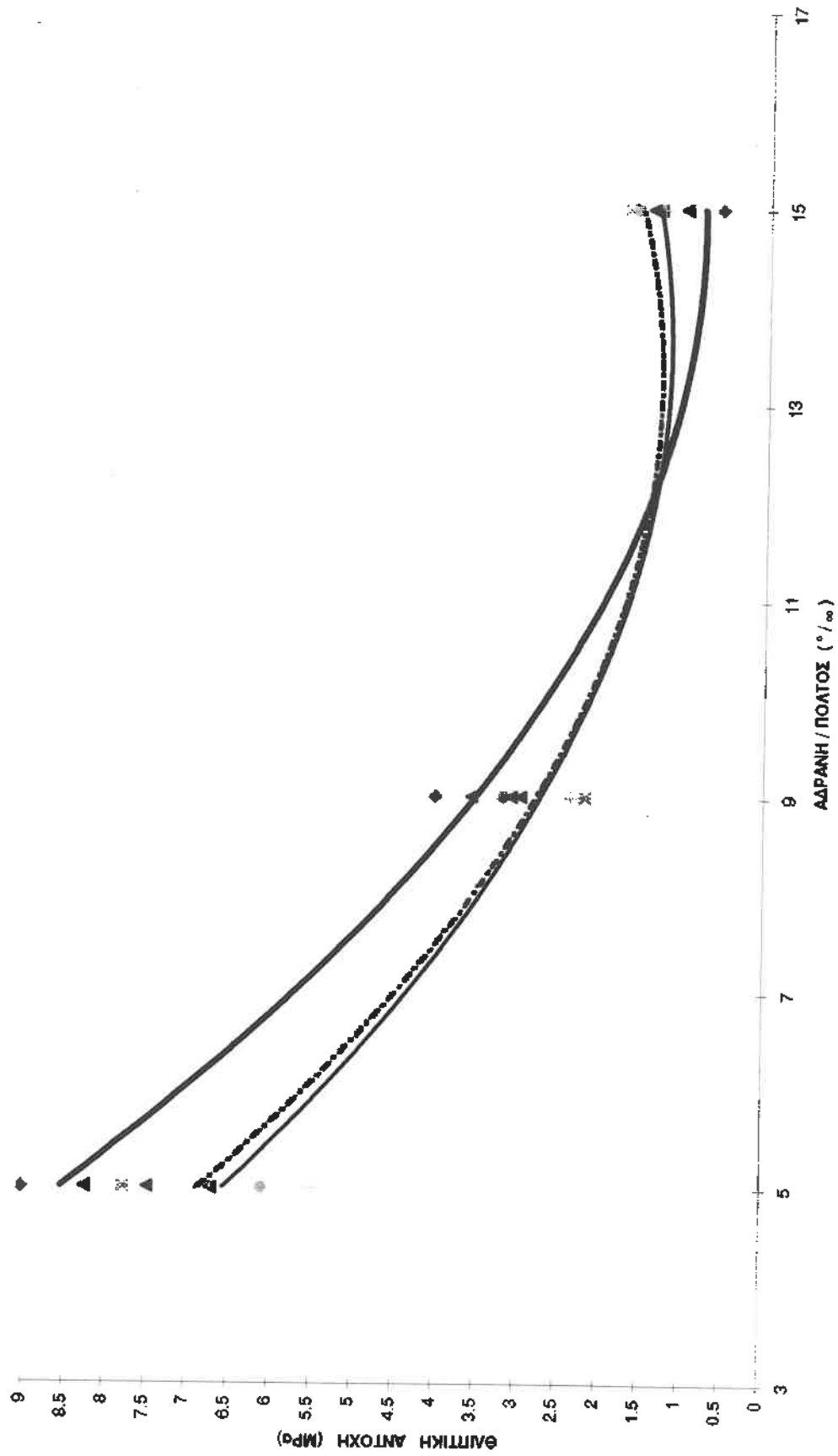


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.16γ

ΘΑΛΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΛΟΓΟ $N/T = 0.35$ 

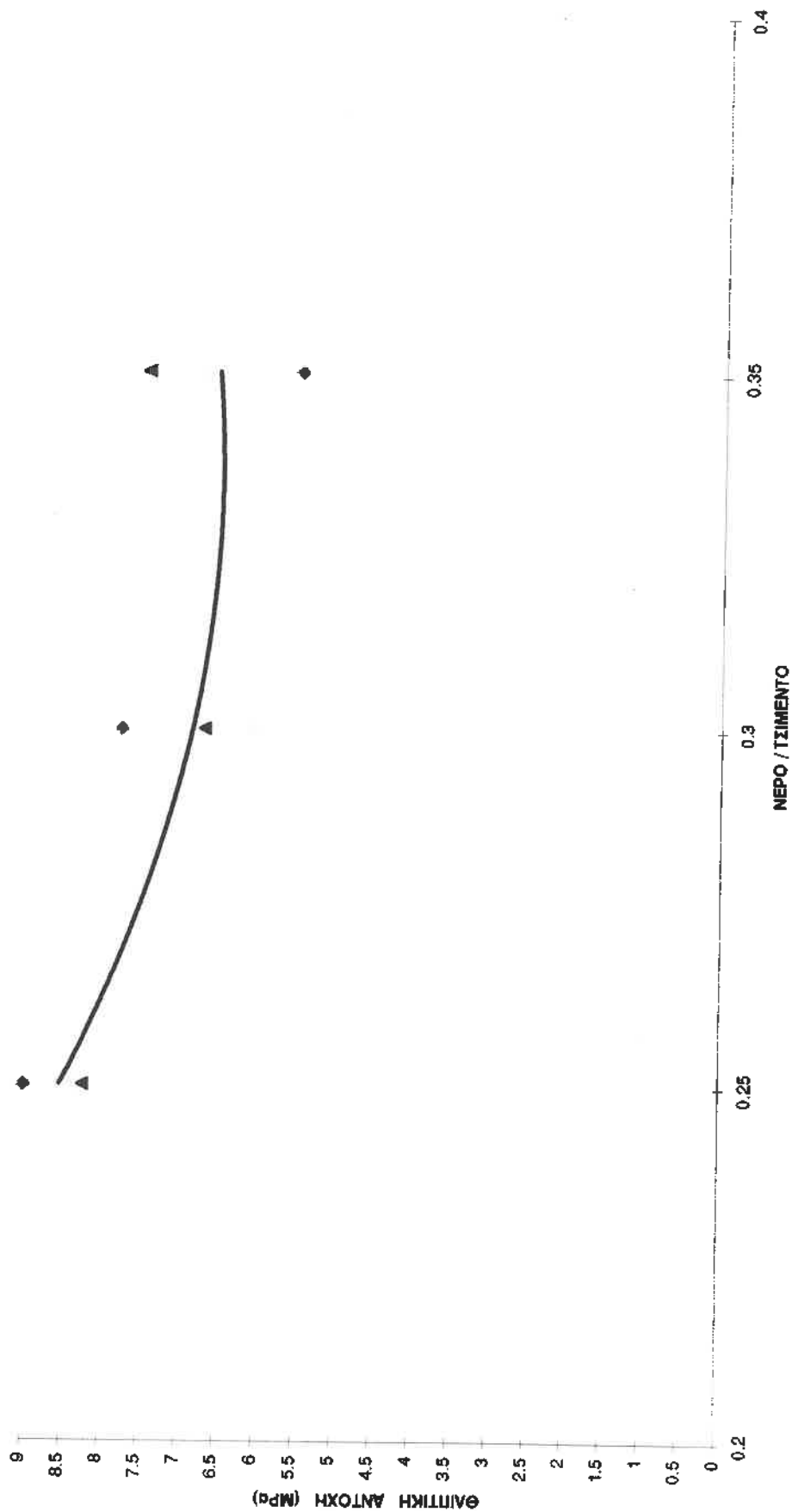
M.O

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.17δ

ΘΑΛΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΛΟΓΟ $N/T = (0.25, 0.30, 0.35)$ 

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.17α

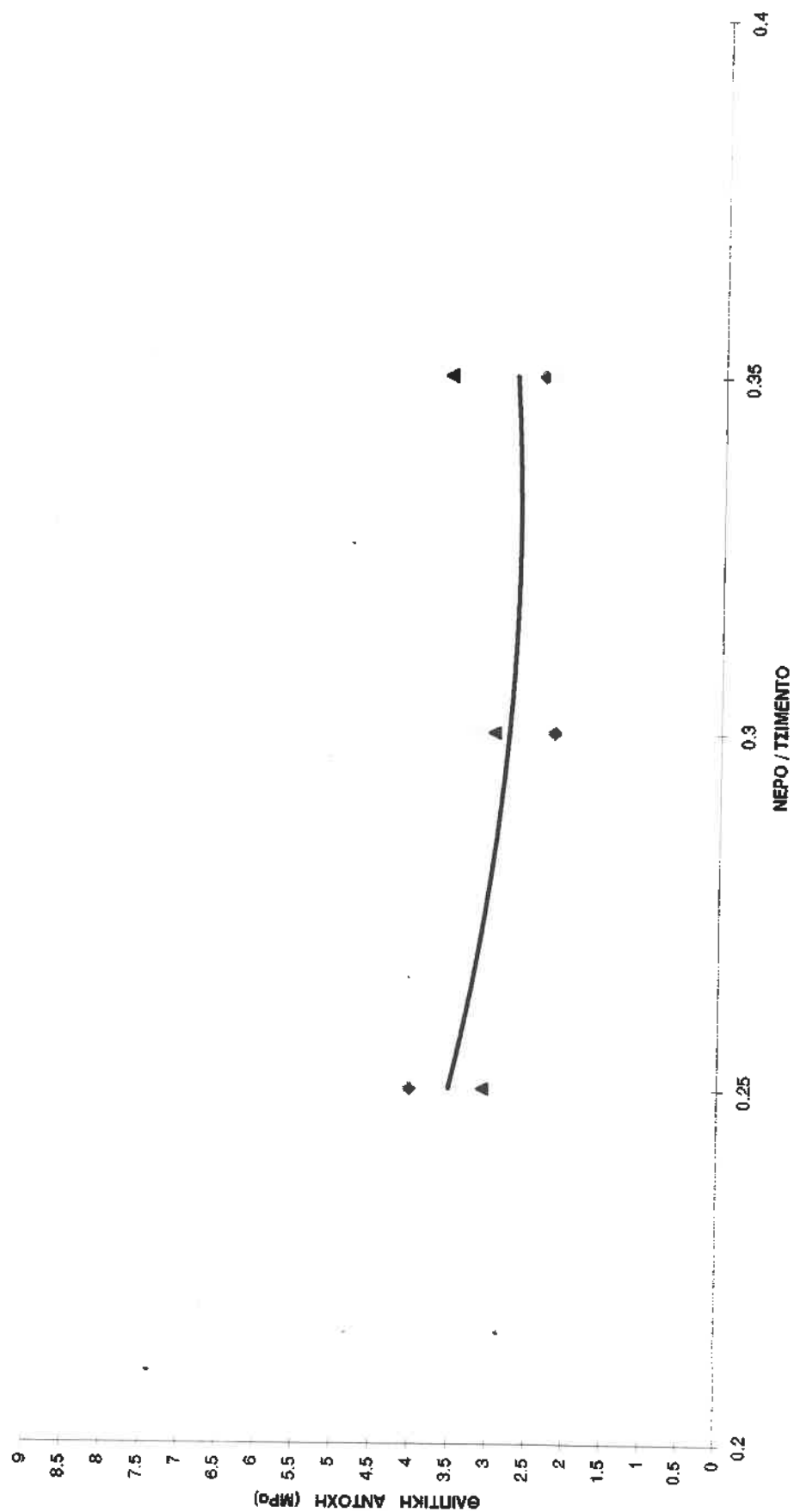
ΘΑΛΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΛΟΓΟ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ=5^ο / ∞



M.O

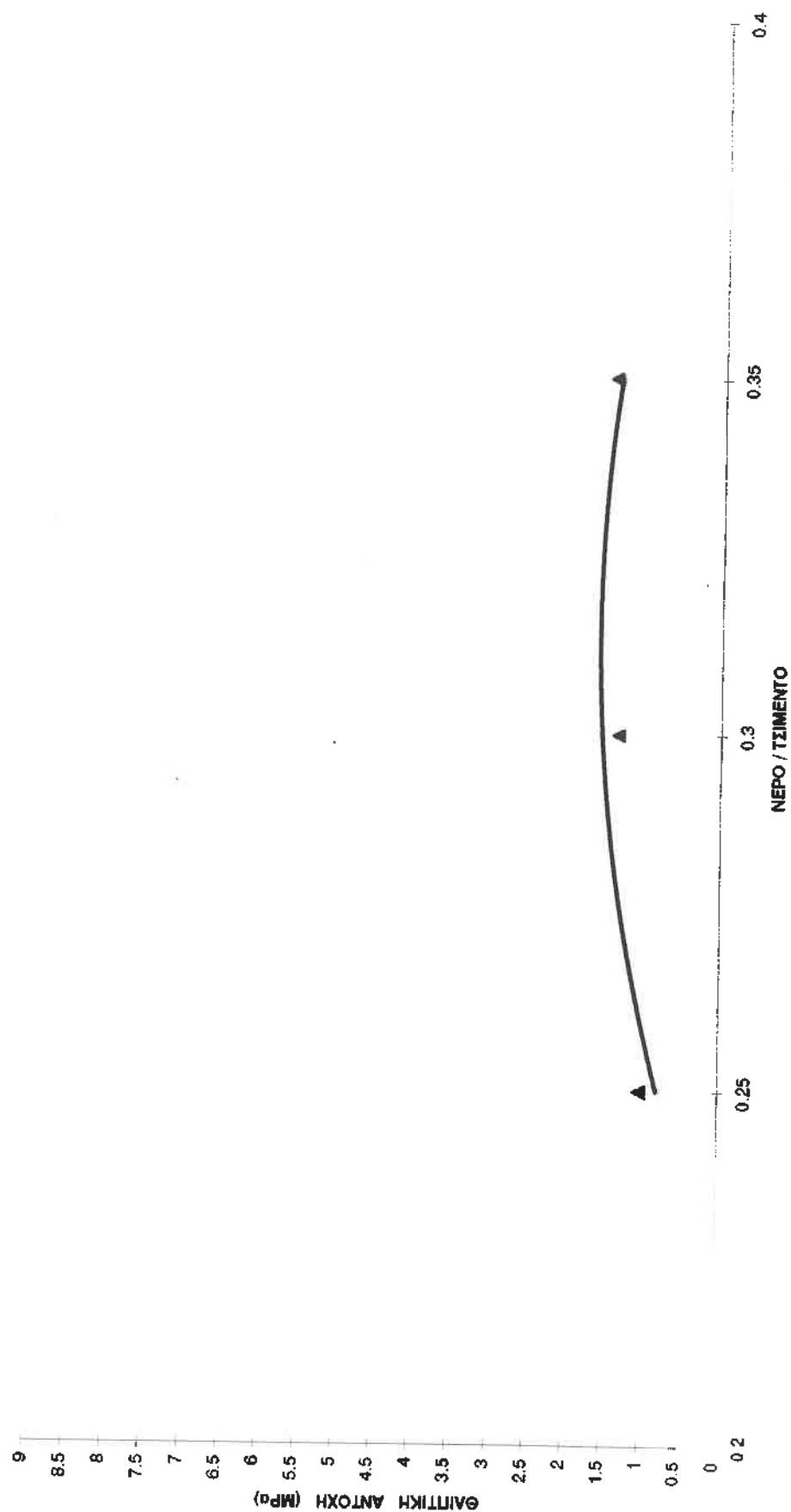
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.17β

ΘΑΛΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΛΟΓΟ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ=9° / ∞



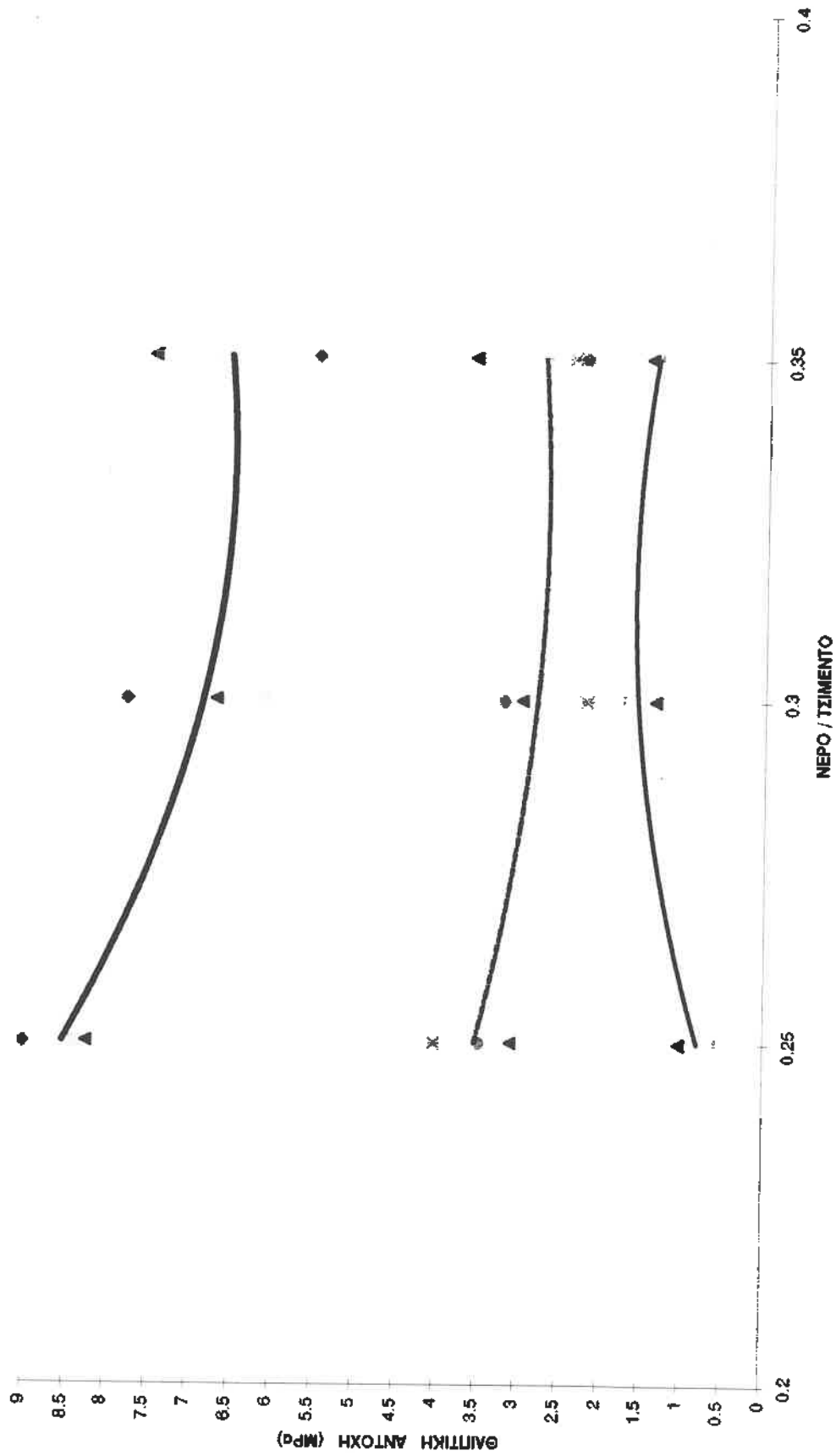
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.17γ

ΘΑΛΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΛΟΓΟ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = 15% / ∞



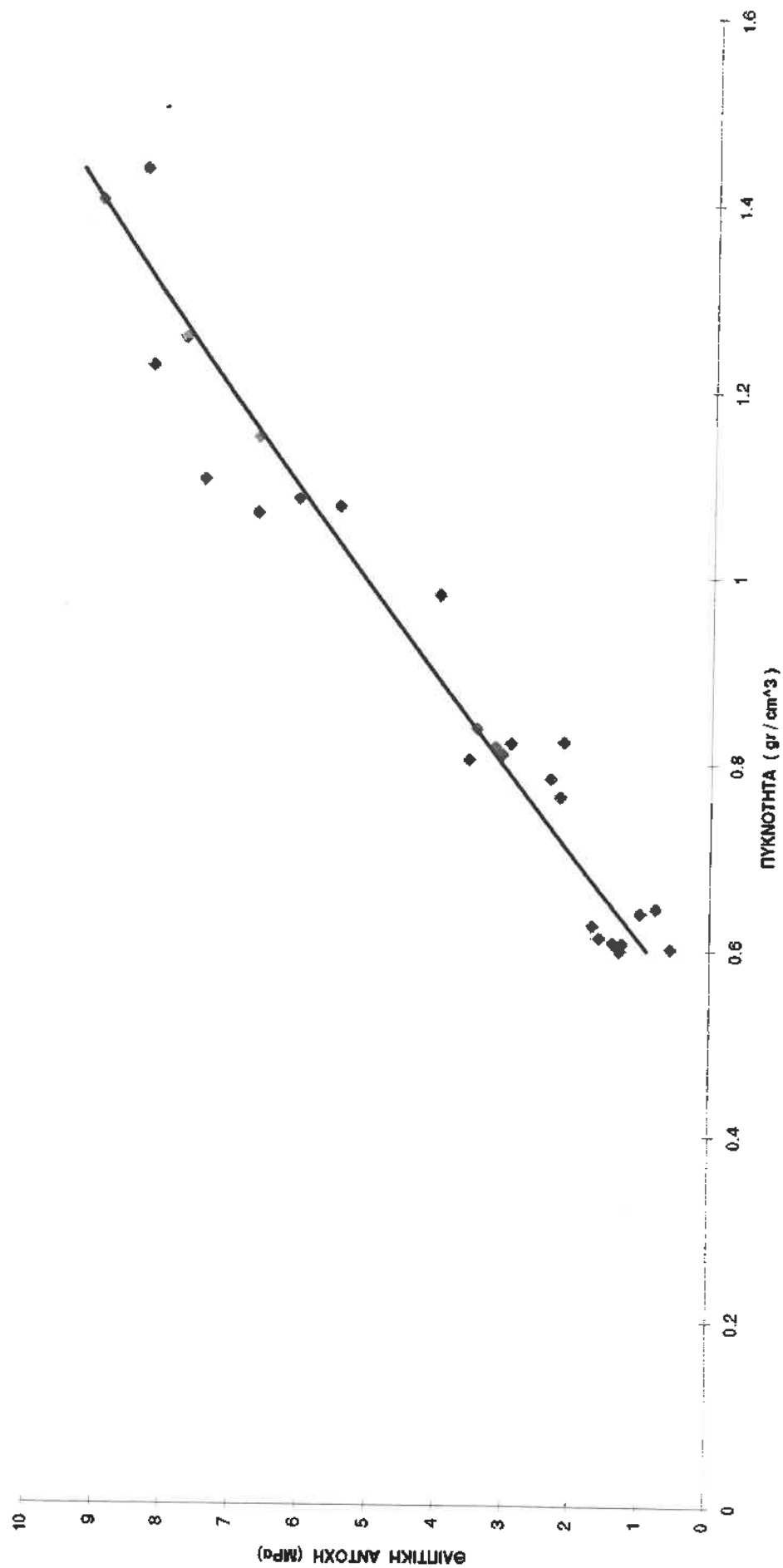
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.178

ΘΑΛΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΜΕ ΛΟΓΟ ΑΔΡΑΝΗ / ΠΟΛΤΟΣ = $(5^\circ / \infty, 9^\circ / \infty, 15^\circ / \infty)$



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.17ε

ΕΛΙΠΤΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ - ΠΥΚΝΟΤΗΤΑ



5.7 ΛΟΓΟΙ ΑΝΤΟΧΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης των κυβικών και κυλινδρικών δοκιμίων, καθώς και τα αποτελέσματα της δοκιμής αντιδιαμετρικής θλίψης (εφελκυσμού) των κυλινδρικών δοκιμίων υπολογίστηκαν οι τιμές των λόγων των αντοχών:

- α) θλιπτικής κυλίνδρου / θλιπτικής κύβου
- β) εφελκυστικής κυλίνδρου / θλιπτικής κύβου
- γ) εφελκυστικής κυλίνδρου / θλιπτικής κυλίνδρου

Οι λόγοι αυτοί υπολογίστηκαν έτσι ώστε να έχουμε την δυνατότητα, γνωρίζοντας την τιμή ενός μεγέθους να μπορούμε να προσδιορίσουμε περίπου την τιμή κάποιου άλλου. Πρέπει ωστόσο να τονιστεί ότι οι τιμές των παραπάνω λόγων είναι ενδεικτικές μόνο, εξαιτίας του μικρού αριθμού των δοκιμών και της ακρίβειας των μετρήσεων. Έτσι προκύπτει ένα εύρος τιμών για κάθε έναν απ' τους παραπάνω λόγους αντοχών, που μπορεί να μας οδηγήσει σε κάποια γενικά συμπεράσματα, αλλά όχι σε υπολογισμούς ακριβείας.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.18α

Στο διάγραμμα αυτό δίνεται η μεταβολή του λόγου των θλιπτικών αντοχών κυλίνδρου / κύβου συναρτήσει του λόγου A/P για κάθε τιμή του λόγου N/T . Το εύρος τιμών των λόγων φαίνεται να είναι σταθερό και κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.55 — 0.85.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.18β

Στο διάγραμμα αυτό δίνεται η μεταβολή του λόγου των θλιπτικών αντοχών κυλίνδρου / κύβου συναρτήσει του λόγου N/T για κάθε τιμή του λόγου A/P . Το εύρος των τιμών είναι μεταξύ 0.55 — 0.85. Παρατηρούμε ότι το μίγμα με λόγο $A/P=15\%$ δίνει αντιφατικά αποτελέσματα σε σχέση με τα άλλα μίγματα πράγμα αναμενόμενο εξαιτίας της ανομοιομορφίας που παρουσιάζει ο συγκεκριμένος τύπος μίγματος.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.19α

Στο διάγραμμα αυτό παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου των αντοχών εφελκυστικής κυλίνδρου / θλιπτικής κύβου συναρτήσει του λόγου A / Π για κάθε τιμή του λόγου N / T . Παρατηρούμε μία μικρή αύξηση της τιμής του λόγου των αντοχών με την αύξηση του ποσοστού των αδρανών στο υλικό. Ωστόσο το εύρος των τιμών του λόγου των αντοχών είναι περίπου μεταξύ των τιμών 0.08 — 0.14.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.19β

Στο διάγραμμα αυτό παρουσιάζεται η μεταβολή του λόγου των αντοχών εφελκυστικής κυλίνδρου / θλιπτικής κύβου συναρτήσει του λόγου N / T για κάθε τιμή του λόγου A / Π . Παρατηρούμε μία μικρή μείωση της τιμής του λόγου των αντοχών με την αύξηση του λόγου N / T . Το μίγμα με λόγο $A / \Pi = 15\%$ παρουσιάζει μεγάλη ανομοιομορφία τιμών πράγμα το οποίο σημαίνει ότι ο λόγος N / T δεν επηρεάζει την συμπεριφορά του, λόγω της έντονης ανομοιομορφίας της μάζας του. Το εύρος των τιμών του παραπάνω λόγου αντοχών κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.08 — 0.14.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.20α

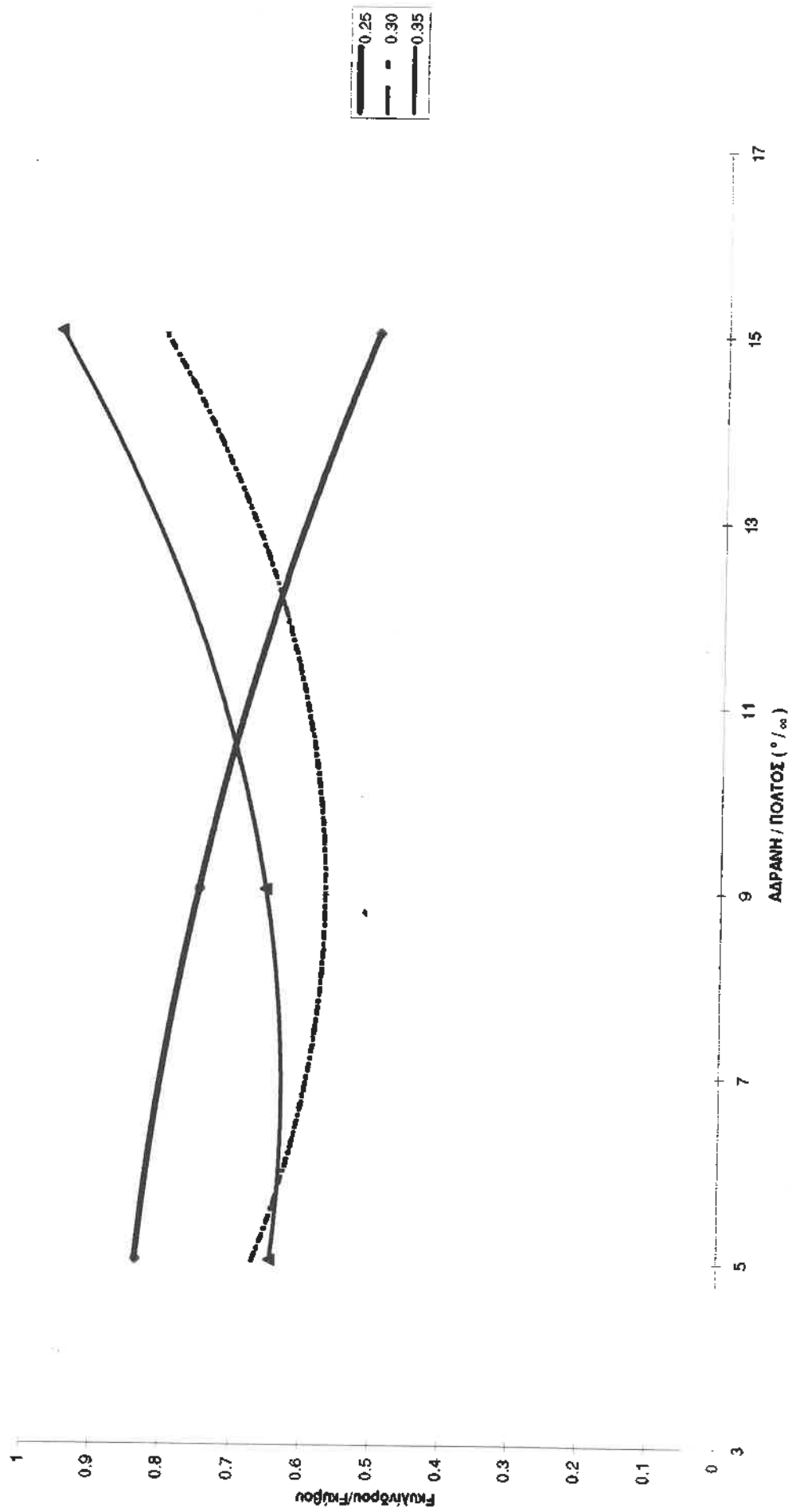
Στο διάγραμμα αυτό δίνεται το εύρος τιμών του λόγου της εφελκυστικής / θλιπτικής αντοχής των κυλινδρικών δοκιμίων συναρτήσει του λόγου A / Π για κάθε τιμή του λόγου N / T . Οι τιμές του παραπάνω λόγου είναι μεταξύ των τιμών 0.12 — 0.18. Στο κοινό σκυρόδεμα γνωρίζουμε ότι ο λόγος της θλιπτικής / εφελκυστικής αντοχής είναι περίπου ίσος με 10 ενώ στο συγκεκριμένο ελαφροσκυρόδεμα είναι περίπου ίσος με 7.

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.20β

Στο διάγραμμα αυτό δίνεται η μεταβολή του λόγου της εφελκυστικής / θλιπτικής αντοχής των κυλινδρικών δοκιμίων συναρτήσει του λόγου N / T για κάθε τιμή του λόγου A / Π . Το εύρος των τιμών του λόγου είναι μεταξύ 0.12 και 0.18. Η τιμή του λόγου των αντοχών για το μίγμα με $A / \Pi = 15\%$ και λόγο $N / T = 0.25$ είναι εκτός του διαστήματος τιμών, κάτι που οφείλεται στην ανομοιομορφία του υλικού αλλά και στον μικρό αριθμό των δοκιμίων.

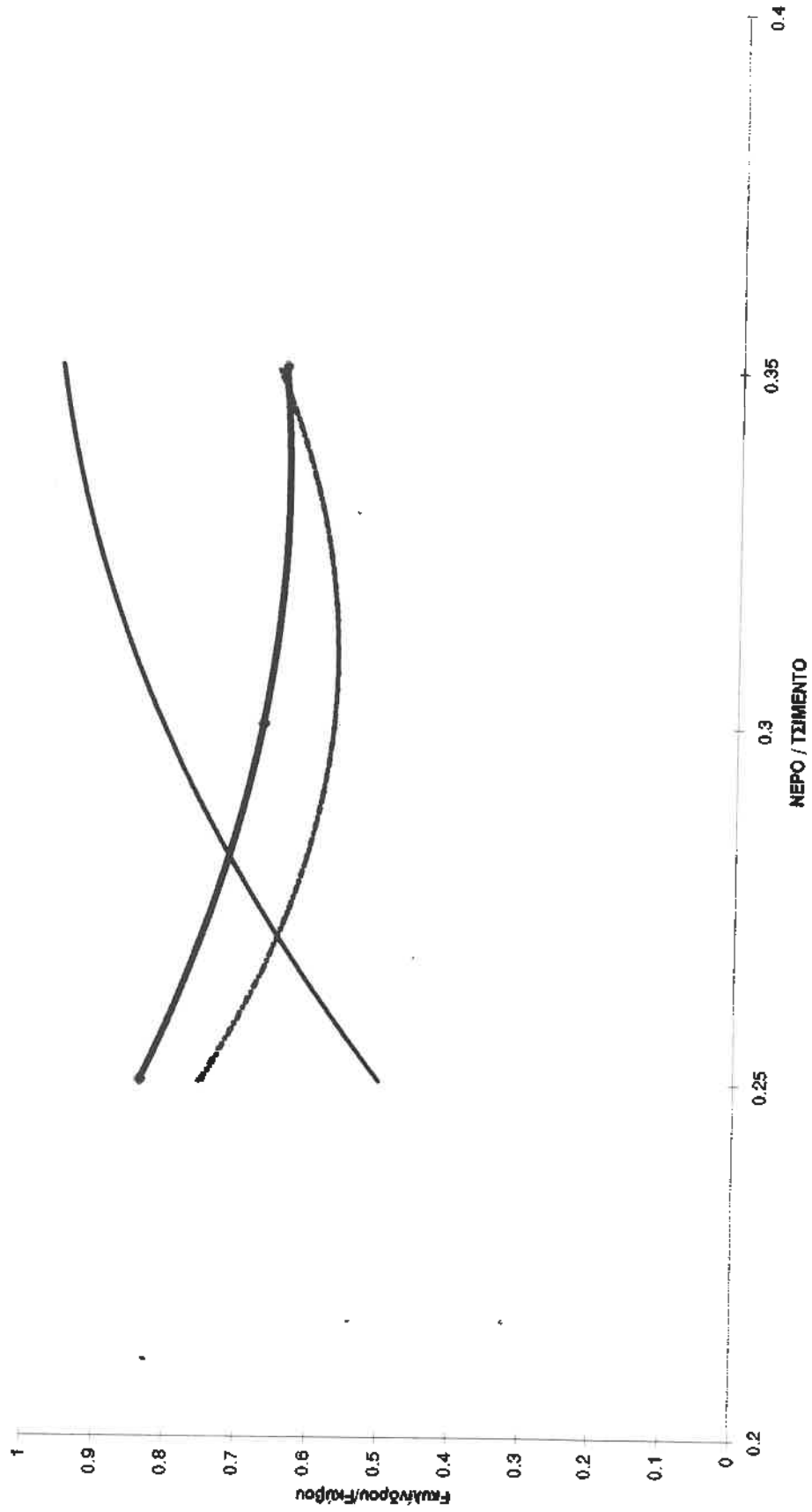
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.18α

ΛΟΓΟΣ ΘΑΛΠΤΙΚΩΝ ΑΝΤΟΧΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ / ΚΥΒΟΥ ΓΙΑ ΛΟΓΟ $N/T = (0.25, 0.30, 0.35)$



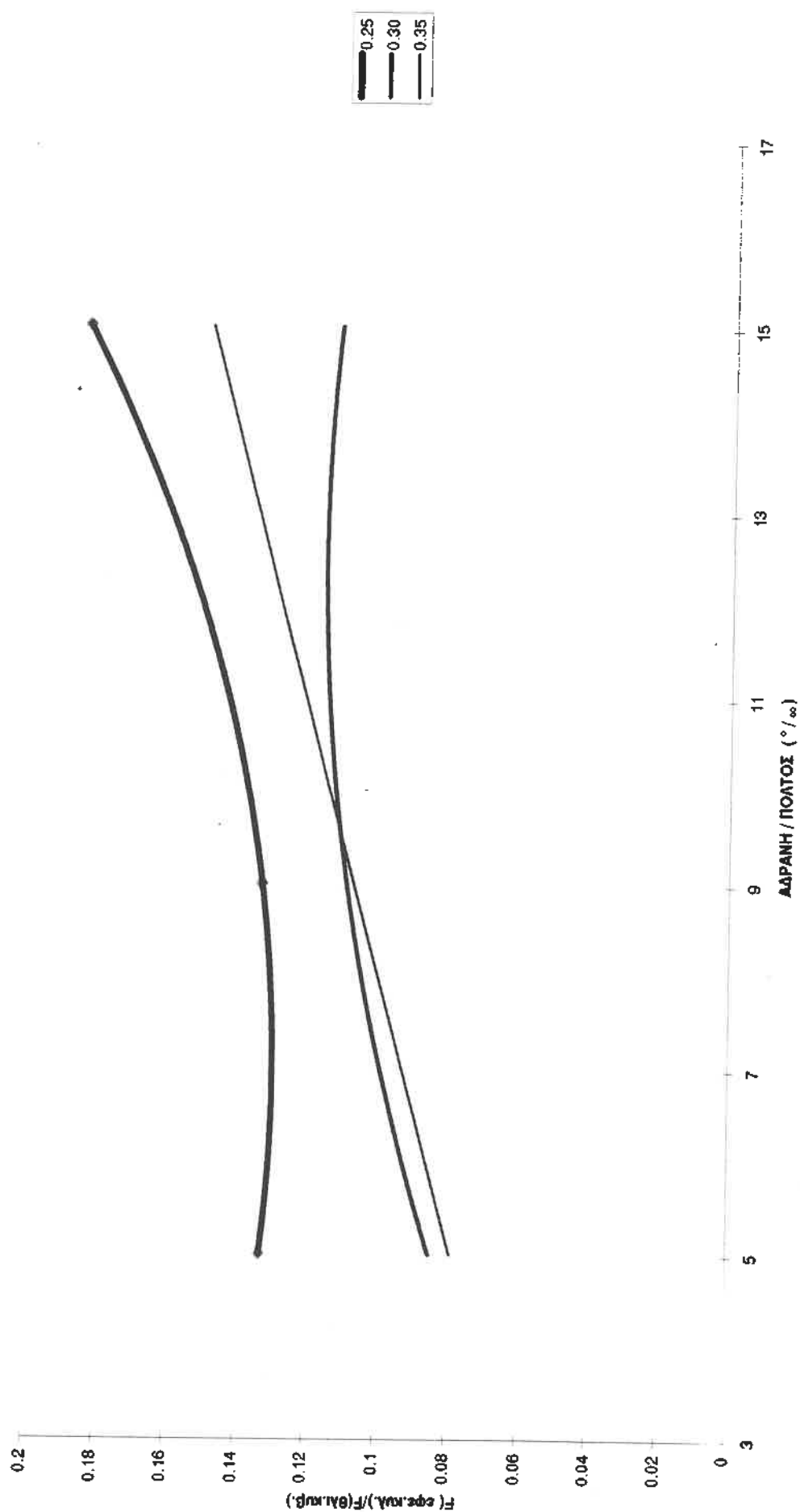
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.18β

ΛΟΓΟΣ ΘΑΛΙΠΤΙΚΩΝ ΑΝΤΟΧΩΝ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ / ΚΥΒΟΥ ΓΙΑ ΛΟΓΟ $A/\Pi = (5^\circ / \infty, 9^\circ / \infty, 15^\circ / \infty)$



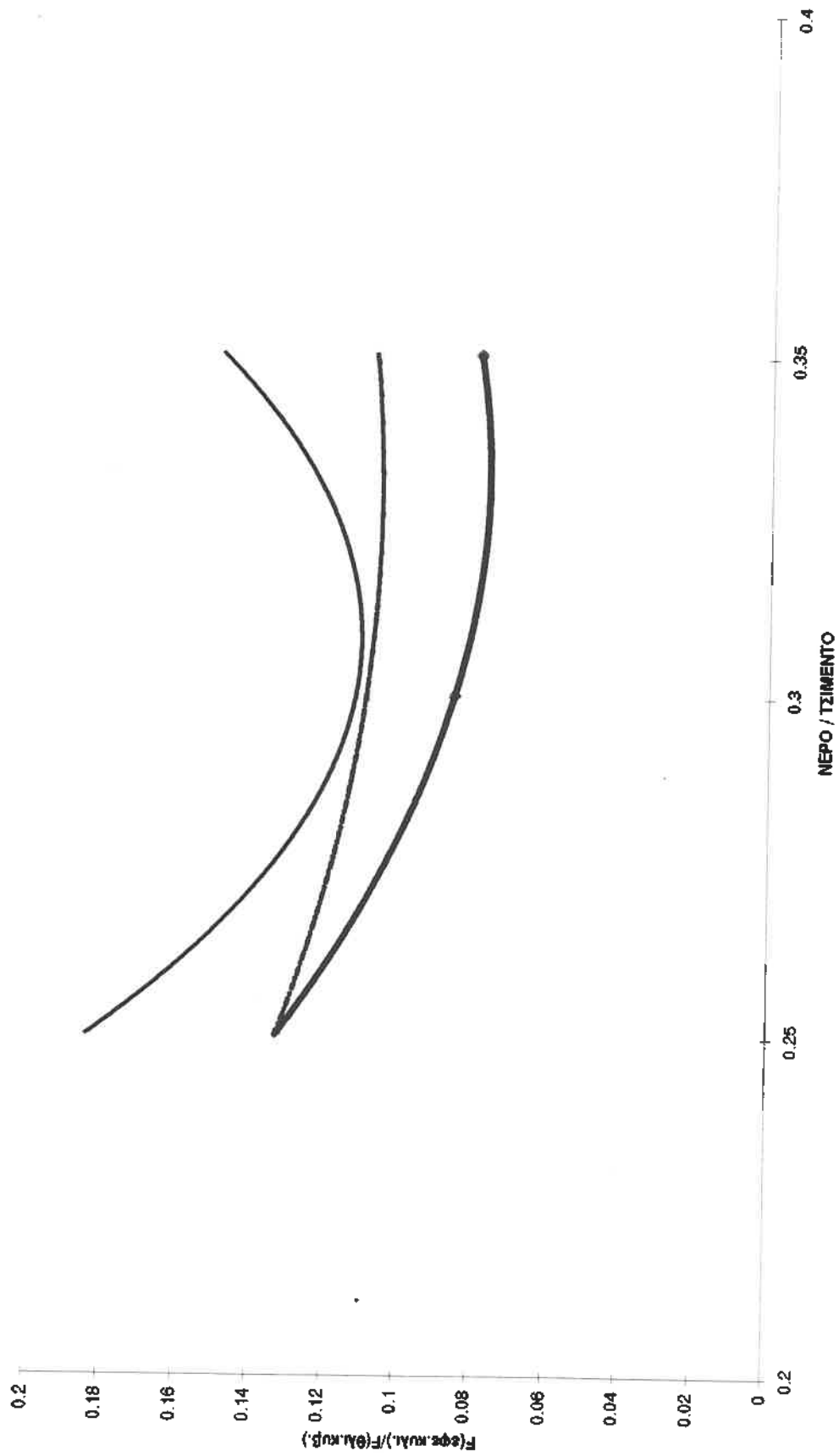
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.19α

ΛΟΓΟΣ ΑΝΤΟΧΩΝ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ / ΟΛΙΠΤΙΚΗΣ ΚΥΒΟΥ ΓΙΑ ΛΟΓΟ $N/T = (0.25, 0.30, 0.35)$



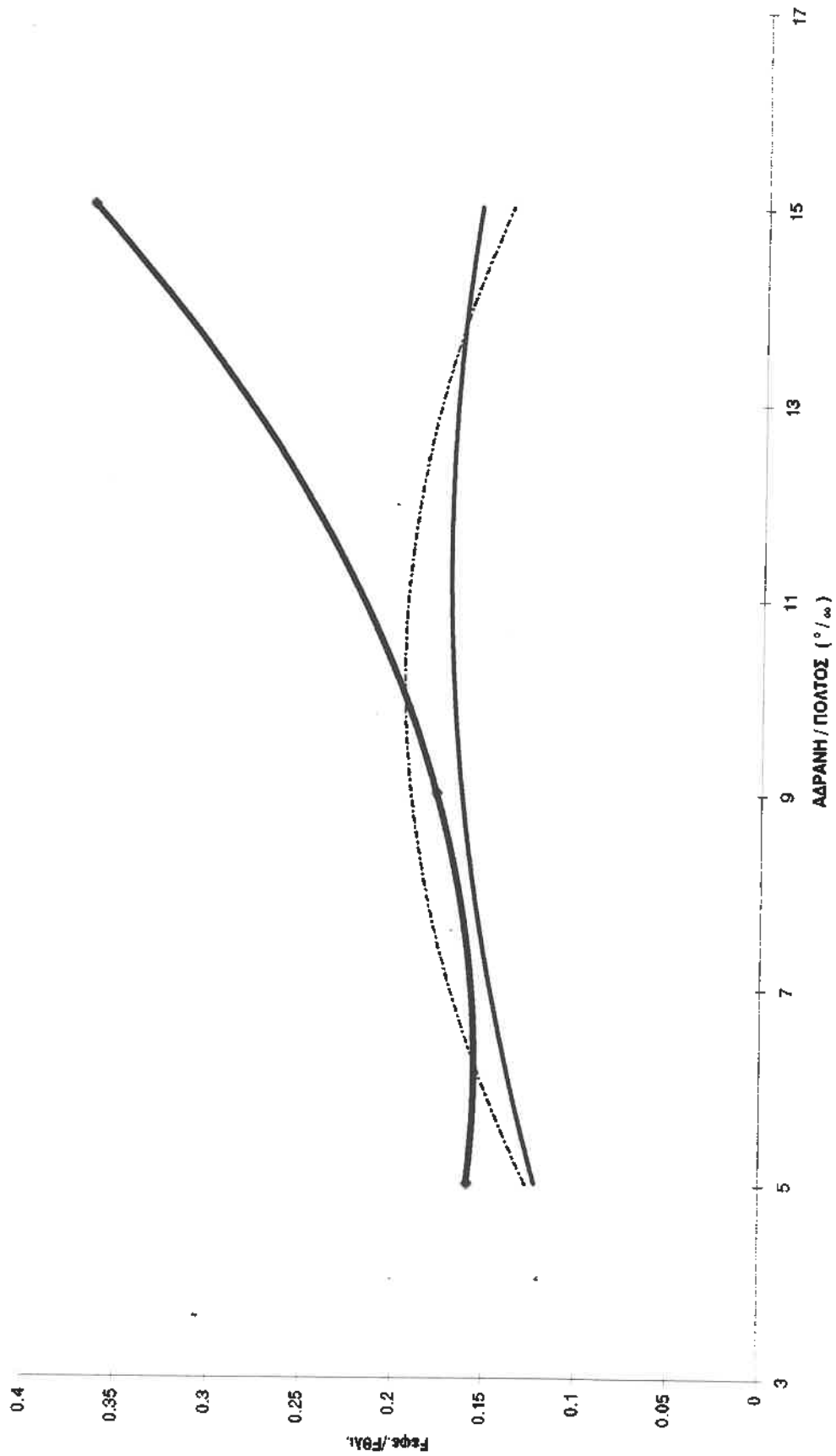
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.19β

ΛΟΓΟΣ ΑΝΤΟΧΩΝ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ / ΟΛΙΠΤΙΚΗΣ ΚΥΒΟΥ ΓΙΑ ΛΟΓΟ $\lambda/\mu = (5^\circ / \infty, 9^\circ / \infty, 15^\circ / \infty)$



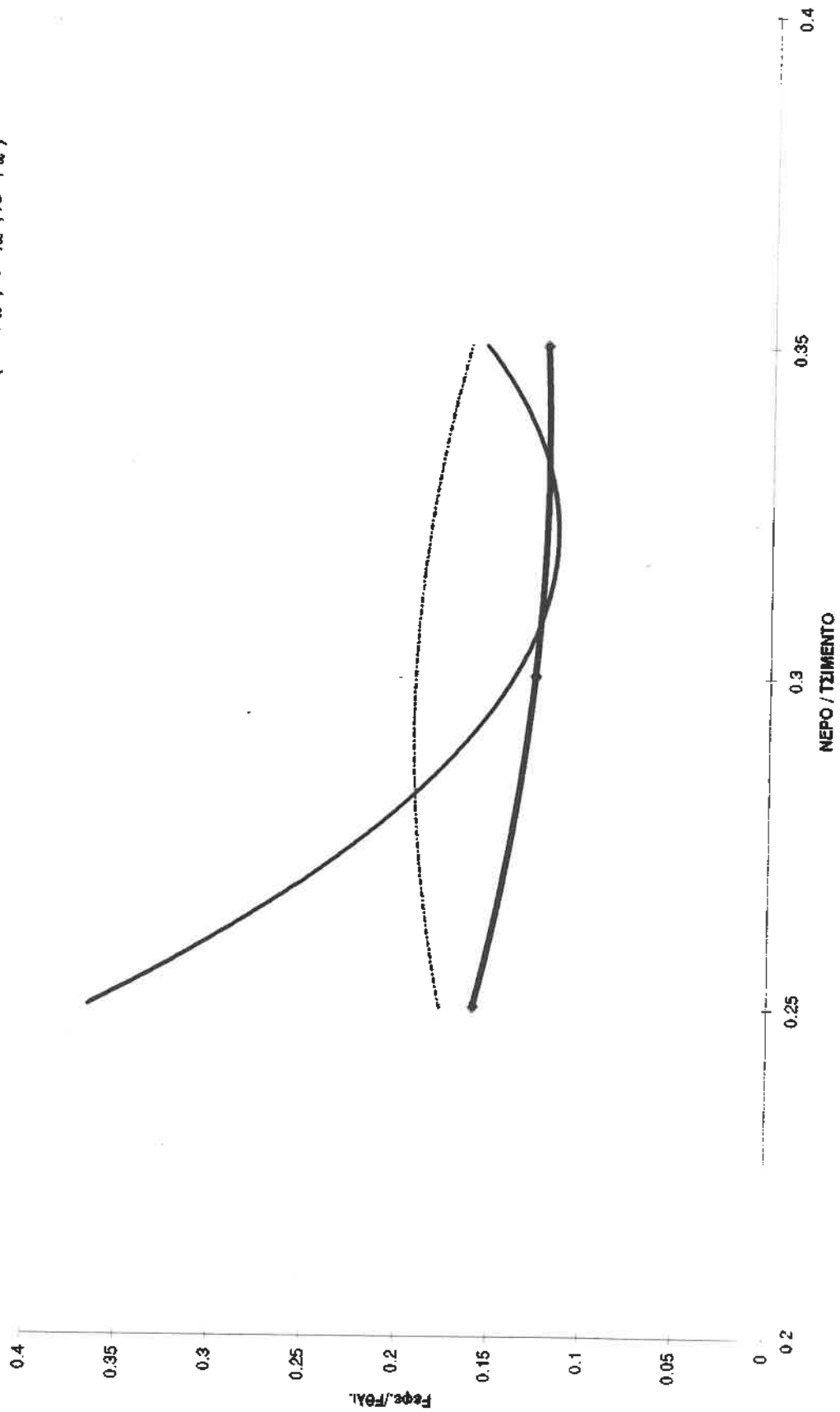
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.20α

ΛΟΓΟΣ ΑΝΤΟΧΩΝ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ / ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ ΓΙΑ ΛΟΓΟ $N/T = (0.25, 0.30, 0.35)$



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.20β

ΛΟΓΟΣ ΑΝΤΟΧΩΝ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗ / ΘΛΙΠΤΙΚΗ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥ ΓΙΑ ΛΟΓΟ $A/\Pi = (5^\circ / \infty , 9^\circ / \infty , 15^\circ / \infty)$



5.8 ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΜΕΓΙΣΤΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ

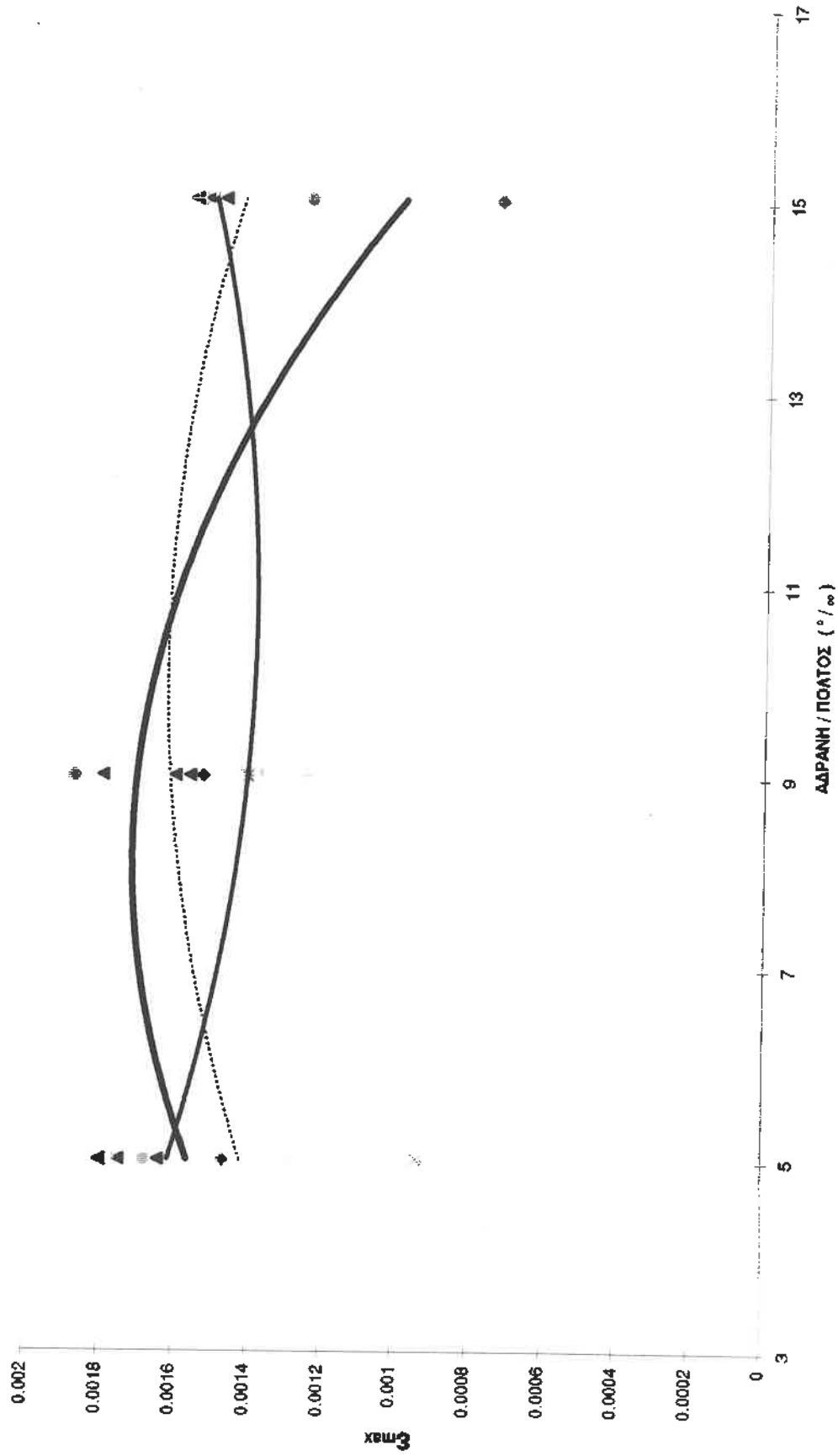
ΣΧΟΛΙΑ

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.21(α,β)

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης των κυλινδρικών δοκιμίων, για τον προσδιορισμό του μέτρου ελαστικότητας, καταγράφηκαν οι τιμές της μέγιστης παραμόρφωσης των δοκιμίων κατά την στιγμή της θραύσης. Από τα διαγράμματα αυτά προκύπτει ότι το εύρος των τιμών της μέγιστης παραμόρφωσης που κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 0.0014 και 0.0018, είναι ανεξάρτητο των αναλογιών σύνθεσης του υλικού. Πρέπει ωστόσο να τονισθεί ότι για το μίγμα με λόγο $A / \Pi = 15\%$ και λόγο $N / T = 0.25$, παρουσιάζει μικρή τιμή ανηγμένης παραμόρφωσης, εξαιτίας της μικρής αντοχής που παρουσιάζει το συγκεκριμένο μίγμα, λόγω κακής συμπίκνωσης και ανομοιομορφίας. Η θραύση αυτού του τύπου δοκιμίων γινόταν στο άνω τμήμα τους, λόγω της μειωμένης ποσότητας τσιμεντοπολτού που υπήρχε εκεί. Αντίθετα στα μίγματα με λόγο $A / \Pi = 5$ και 9% , η θραύση των δοκιμίων γινόταν στο μέσο τους, λόγω καλύτερης συμπίκνωσης και άρα καλύτερης ομοιομορφίας στην μάζα τους. Τα αποτελέσματα αυτού του τύπου δοκιμίων δίνουν πιο αξιόπιστα αποτελέσματα για την τιμή της μέγιστης παραμόρφωσης.

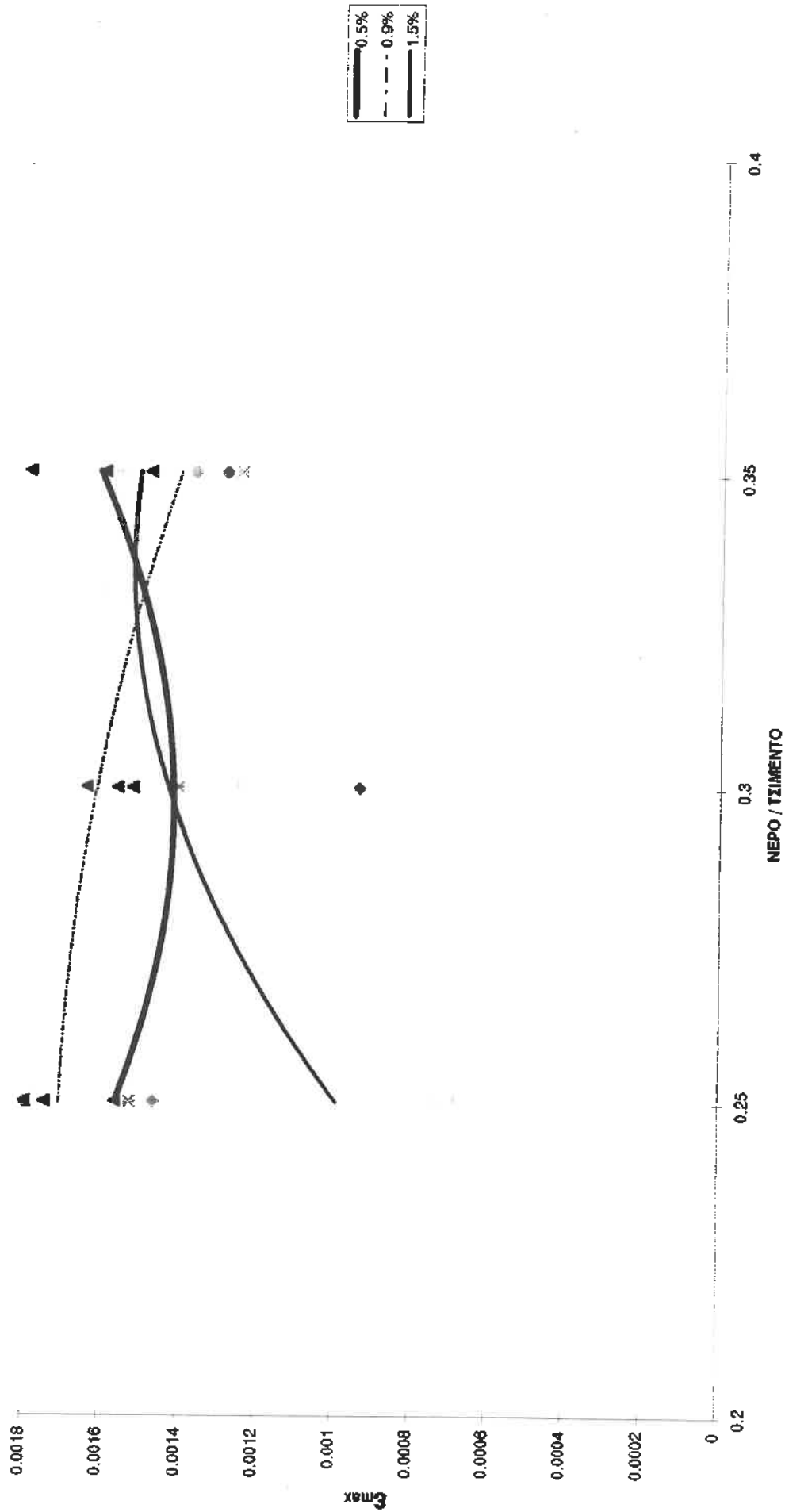
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.21α

$\varepsilon_{\max}$ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΓΙΑ ΛΟΓΟ $N/T = (0.25, 0.30, 0.35)$



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5.21β

$\varepsilon_{\max}$ ΚΥΛΙΝΔΡΙΚΩΝ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΓΙΑ ΛΟΓΟ $\lambda/\pi = (5^\circ / \infty, 9^\circ / \infty, 15^\circ / \infty)$



5.9 ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από ολόκληρη την πειραματική διαδικασία και την επεξεργασία των αποτελεσμάτων τα οποία προέκυψαν οδηγηθήκαμε στα ακόλουθα συμπεράσματα :

1. Κατά την ανάμιξη και συμπύκνωση των δοκιμίων παρατηρήθηκαν σε ορισμένες περιπτώσεις έντονα φαινόμενα απόμειξης του υλικού. Αυτό οφείλεται στο εξαιρετικά μικρό φαινόμενο βάρος του αδρανούς που χρησιμοποιήθηκε (περίπου 12 kg/m^3). Τέτοια φαινόμενα ήταν περισσότερο έντονα όσο ο λόγος N/T αυξανόταν .

2. Τα όρια αναλογιών ανάμιξης του αδρανούς και του τσιμεντοπολτού κυμαίνονται μεταξύ 5 και 15 %ο κατά βάρος . Σε μίγματα με λόγο $A/P > 15 \%$ η ανάμιξη του υλικού είναι εξαιρετικά δύσκολη, γιατί η ποσότητα του τσιμεντοπολτού δεν επαρκεί να καλύψει πλήρως τους κόκκους του αδρανούς . Αντίθετα σε μίγματα με λόγο $A/P < 5 \%$ μπορεί να παρουσιαστούν έντονα φαινόμενα κάθισης του τσιμεντοπολτού ειδικά, για λόγους N/T μεγαλύτερους από 0.35 .

3. Εξαιτίας του ότι η αντοχή του υλικού οφείλεται αποκλειστικά και μόνο στην ποσότητα του τσιμεντοπολτού μέσα στο μίγμα, αύξηση του ποσοστού του τσιμεντοπολτού οδηγεί και σε ανάλογη αύξηση της θλιπτικής αντοχής της εφελκυστικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας του ελαφροσκυροδέματος. Ενδεικτικά δίνονται οι μέσες τιμές των αντοχών και του μέτρου ελαστικότητας όπως αυτές προέκυψαν από την επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων.

α) Θλιπτική αντοχή κυβικών δοκιμίων (MPa) :

$A/P \backslash N/T$	5 %ο	9 %ο	15 %ο
0.25	10.217	4.687	1.608
0.30	10.265	4.872	1.924
0.35	10.165	4.140	1.410

β) Εφελκυστική αντοχή κυλινδρικών δοκιμίων (MPa) :

$\begin{matrix} \text{A} / \Pi \\ \text{N} / \text{T} \end{matrix}$	5 ‰	9 ‰	15 ‰
0.25	1.362	0.624	0.269
0.30	0.871	0.531	0.215
0.35	0.800	0.443	0.210

γ) Θλιπτική αντοχή κυλινδρικών δοκιμίων (MPa) :

$\begin{matrix} \text{A} / \Pi \\ \text{N} / \text{T} \end{matrix}$	5 ‰	9 ‰	15 ‰
0.25	8.548	3.523	0.808
0.30	6.857	2.775	1.561
0.35	6.558	2.718	1.354

δ) Μέτρο ελαστικότητας (MPa) :

$\begin{matrix} \text{A} / \Pi \\ \text{N} / \text{T} \end{matrix}$	5 ‰	9 ‰	15 ‰
0.25	6228	2745	1185
0.30	5937	2586	1533
0.35	5430	2288	1485

4. Για την ανάμιξη του ελαφροσκυροδέματος αυτού απαιτείται μηχανικό μέσο το οποίο δουλεύει με μεγάλη ταχύτητα περιστροφής, ειδικά για τιμές του λόγου $N/T < 0.30$.

5. Η μείωση του λόγου N/T οδηγεί σε αύξηση της αντοχής του υλικού και ειδικά σε μικρές τιμές του λόγου A/Π . Ωστόσο για τιμές κάτω του 0.25 παρατηρούμε μείωση των αντοχών εξαιτίας της κακής συμπίκνωσης αλλά και της μερικής ενυδάτωσης του τσιμέντου.

6. Η χρήση ρευστοποιητικών κατά την ανάμιξη του υλικού, κρίνεται απαραίτητη σε μίγματα με λόγο $N/T < 0.35$. Αντίθετα σε μίγματα με λόγο $N/T > 0.35$ η χρήση ρευστοποιητικών μπορεί να επιφέρει κάθιση του τσιμεντοπολτού κατά την ανάμιξη και συμπίκνωση του μίγματος.

7. Από τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης και εφελκυσμού των κυλινδρικών δοκιμίων προκύπτει ότι ο λόγος της θλιπτικής / εφελκυστική αντοχή του ελαφροσκυροδέματος είναι περίπου ίσος με 7.

8. Το συγκεκριμένου τύπου ελαφροσκυρόδεμα για τιμές του λόγου A/Π κοντά στο 15 % μπορεί να χρησιμοποιηθεί μόνο ως θερμομονωτικό υλικό εξαιτίας των χαμηλών αντοχών που παρουσιάζει, ενώ για τιμές του λόγου A/Π κοντά στο 5 % παρουσιάζει ικανποιητικές αντοχές.

5.10 ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ

Επειδή ο συγκεκριμένος τύπος ελαφροσκυροδέματος δεν έχει ευρεία χρήση στην χώρα μας, και όπου χρησιμοποιείται γίνεται μόνο για θερμομονωτικούς σκοπούς, χρήσιμο θα ήταν να συνεχιστεί η έρευνα πάνω στα μηχανικά χαρακτηριστικά και στις φυσικές ιδιότητες του. Η εργασία αυτή είναι μια πρώτη προσέγγιση των παραπάνω χαρακτηριστικών και θεωρούμε απαραίτητη την περαιτέρω έρευνα στους ακόλουθους τομείς :

α) Να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στο φαινόμενο της απόμειξης των συστατικών του ελαφροσκυροδέματος. Η κάθιση του τσιμεντοπολτού στο κάτω μέρος των δοκιμών, παρόλο που μπορεί να μην είναι εμφανής οπτικά ορισμένες φορές, δημιουργεί ανομοιομορφία στην μάζα του υλικού, με αποτέλεσμα να αλλοιώνονται τα μηχανικά χαρακτηριστικά του υλικού και να οδηγήσει σε λάθος συμπεράσματα.

β) Η αύξηση του αριθμού των δοκιμών σε μελλοντική έρευνα είναι απαραίτητη έτσι ώστε να προκύψουν ακριβέστερα συμπεράσματα για τις τιμές των μηχανικών χαρακτηριστικών του υλικού.

γ) Συνιστούμε να κατασκευασθούν κυβικά και κυλινδρικά δοκίμια μεγαλύτερων διαστάσεων για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής και του μέτρου ελαστικότητας. Ωστόσο τα κυλινδρικά δοκίμια να διατηρήσουν τον ίδιο λόγο $h/d=2$. Η καλύτερη ίσως επιλογή διαστάσεων είναι εκείνη που ορίζουν οι Κανονισμοί για το κοινό σκυρόδεμα στο οποίο τα κυλινδρικά δοκίμια έχουν ύψος $h = 300\text{mm}$ και διάμετρο $d = 150\text{mm}$, ενώ η ακμή των κυβικών να είναι 15 ή 20 cm. Με τον τρόπο αυτό θα μπορεί να γίνει άμεση σύγκριση των αποτελεσμάτων των αντοχών και του μέτρου ελαστικότητας του ελαφροσκυροδέματος με το κοινό σκυρόδεμα.

δ) Να υπολογιστεί ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας του υλικού για κάθε τιμή του λόγου A/Π .

ε) Θεωρούμε απαραίτητο τον υπολογισμό του κόστους μονάδος παραγωγής για το συγκεκριμένο τύπο ελαφροσκυροδέματος. Στον υπολογισμό αυτό θα πρέπει να εξεταστεί το κόστος παρασκευής, μεταφοράς και διάστρωσης του υλικού. Θα πρέπει επίσης να ελεγχθεί εάν οι αναμικτήρες που χρησιμο-

ποιούνται για την παρασκευή του κοινού σκυροδέματος είναι κατάλληλοι για την ανάμιξη του συγκεκριμένου ελαφροσκυροδέματος .

στ) Να γίνει προσθήκη αεροποιητικού υλικού στην μάζα του ελαφροσκυροδέματος για την αποφευχθεί η κάθιση του τσιμεντοπολτού και να βελτιωθούν οι θερμομονωτικές ιδιότητές του .

η) Να μελετηθεί η συμπεριφορά του ελαφροσκυροδέματος με διογκωμένη πολυστερίνη όταν στη μάζα του προστεθεί λεπτόκοκκο υλικό (άμμος) . Έτσι θα μειωθεί η ποσότητα του τσιμεντοπολτού που απαιτείται και θα καταστεί πιο οικονομικό το υλικό .

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] ΧΡΙΣΤΟΥ Μ. ΟΙΚΟΝΟΜΟΥ, "ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΔΕΥΤΕΡΗ ΕΚΔΟΣΗ
- [2] ΚΑΝΟΝΙΣΜΟΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (Φ.Ε.Κ : 266 / Β / 9 - 5 - 1985)
- [3] ΠΑΝ. ΚΟΥΦΟΠΟΥΛΟΣ, "ΘΕΜΑΤΑ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΔΙΑΛΕΞΕΙΣ, ΑΘΗΝΑ 1988
- [4] Π. ΚΟΥΦΟΠΟΥΛΟΣ - ΧΡ. ΟΙΚΟΝΟΜΟΥ, "ΤΑ ΥΛΙΚΑ", 5ο ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΣΥΝΕΔΡΙΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ
- [5] Α. ΚΟΡΩΝΑΙΟΣ, "ΤΕΧΝΙΚΑ ΥΛΙΚΑ (ΤΟΜΟΣ Ι), Ε.Μ.Π 1985
- [6] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS A.S.T.M C 39 : 71 "Test for Compressive strength of Cylindrical Concrete specimens"
- [7] Β. ΚΑΛΕΥΡΑΣ, "ΜΑΘΗΜΑΤΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ (ΤΟΜΟΣ Ι)", 1981
- [8] Γ. Κ. ΠΑΡΙΣΑΚΗ, "ΧΗΜΕΙΑ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ" ΑΘΗΝΑ 1991
- [9] Σ. ΚΟΛΙΑΣ - Α. ΛΟΙΖΟΣ, "ΣΗΜΕΙΩΣΕΙΣ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ" ΑΘΗΝΑ 1992
- [10] A. M. Neville, "Properties of Concrete", Pitman 1981
- [11] Sindney Mindess - J. Francis Young, "Concrete", PRENTICE-HALL, 1981
- [12] American Concrete Institute ACI 523. 1R-92, Guide for Cast - in - Place Low - Density Concrete