

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΕΠΟΠΤΗΣ: Σ. ΚΟΛΙΑΣ ΕΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ
ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΣΤΟ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ
ΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
Δ. ΚΛΟΥΚΙΝΑΣ - Β. ΤΣΟΥΚΗΣ

ΑΘΗΝΑ ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 1992

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ

ΕΠΟΠΤΗΣ: Σ.ΚΟΛΙΑΣ ΕΠ. ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑΣ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΣΗΣ
ΙΠΤΑΜΕΝΗΣ ΤΕΦΡΑΣ ΣΤΟ ΚΥΛΙΝΔΡΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ
ΓΙΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΟΔΟΣΤΡΩΜΑΤΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Δ.ΚΛΟΥΚΙΝΑΣ - Β.ΤΣΟΥΚΗΣ

ΑΘΗΝΑ ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 1992

Ευχαριστίες

Θα θέλαμε να εκφράσουμε τις ευχαριστίες μας:

Στην ΔΕΗ για την παραχώρηση του Εργαστηρίου Σκυροδέματος του ΚΔΕΠ στην Παλλήνη Αττικής υπό τους όρους της σύμβασης, που μας έδωσε τη δυνατότητα να εκτελέσουμε το πειραματικό μέρος της διπλωματικής μας εργασίας.

Στον κ. Α. Σακελλαρίου Δρα Πολιτικό Μηχανικό και υπεύθυνο του Εργαστηρίου Σκυροδέματος του ΚΔΕΠ, για την επιστημονική καθοδήγηση και τις υποδείξεις στην εκτέλεση των πειραμάτων.

Στον κ. Ν. Καρυστινό Πολιτικό Μηχανικό της ΔΕΗ για την βοήθεια στην οργάνωση και εκτέλεση των πειραμάτων, καθώς και στο προσωπικό του εργαστηρίου.

Στον κ. Σ. Κόλια Επ. Καθηγητή του Τομέα Μεταφορών και Συγκοινωνιακής Υποδομής του ΕΜΠ για την πολύτιμη βοήθεια που μας προσέφερε καθ'όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της εργασίας.

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

Αθήνα, Φεβρουάριος 1992

Δ.Κλουκίνας, Β.Τσούκης

Περίληψη

Από την ανασκόπηση της υπάρχουσας βιβλιογραφίας σχετικά με το Κυλινδρούμενο Σκυρόδεμα διαπιστώθηκε ότι αυτό αποτελεί ένα ενδιαφέρον υλικό για την κατασκευή οδοστρωμάτων που βρίσκει εφαρμογή σε πολλές χώρες του εξωτερικού. Κρίθηκε ότι τα πλεονεκτήματα που διαθέτει κάνουν την εφαρμογή του στην οδοστρωσία ιδιαίτερα ελκυστική για την Ελλάδα. Για το λόγο αυτό αποφασίστηκε να διερευνηθούν τα μηχανικά του χαρακτηριστικά για αναμίγματα με ελληνικά τσιμέντο, ιπτάμενη τέφρα και αδρανή. Διερευνήθηκε η αντοχή μιγμάτων από θραυστό ασβεστολιθικό αδρανές τυπικής διαβάθμισης με τσιμέντο Ο.Ρ.Σ. μέρος του οποίου αντικαθίστατο σε αυξανόμενα ποσοστά από ιπτάμενη τέφρα. Τα μίγματα αυτά περιείχαν 100% τσιμέντο, 75% τσιμέντο και 25% ιπτάμενη τέφρα, 50% τσιμέντο και 50% ιπτάμενη τέφρα, 100% ιπτάμενη τέφρα. Κατασκευάστηκαν δύο πρίσματα και τρεις κύλινδροι από κάθε μίγμα και για τις ηλικίες των 7, 28 και 60 ημερών και υποβλήθηκαν σε κάμψη, θλίψη και διάρρηξη. Τα αποτελέσματα των δοκιμών (μ.ο.) παρατίθενται στον πίνακα.

Πίνακας. Αποτελέσματα δοκιμών θραύσης (MPa)

ΜΙΓΜΑ	100%Τ.			75% Τ., 25%Ι.Τ.			50%Τ., 50%Ι.Τ.			100%Ι.Τ.		
ΗΛΙΚΙΑ	7	28	60	7	28	60	7	28	60	7	28	60
ΘΛΙΨΗ	42,49	48,95	49,32	35,41	40,21	49,68	28,37	37,10	46,81	-	6,11	6,41
ΚΑΜΨΗ	6,45	6,82	8,47	5,43	7,02	7,12	3,08	6,28	7,56	-	0-1,35	0-1,35
ΔΙΑΡΡΗΞΗ	3,67	4,48	4,06	3,24	3,98	3,72	2,29	3,74	4,13	-	0,52	0,65

Χρησιμοποιώντας τα αποτελέσματα των δοκιμών έγινε συσχέτιση των τριών αντοχών μεταξύ τους η οποία βρέθηκε με καλή προσέγγιση ότι είναι γραμμική. Οι σχέσεις που προέκυψαν είναι: Λόγος κάμψης προς θλίψη 0.16, λόγος διάρρηξης προς θλίψη 0,08 και λόγος διάρρηξης προς κάμψη 0,49. Ακόμη καταγράφηκε η θερμότητα ενυδάτωσης των τεσσάρων μιγμάτων κατά τις πρώτες ώρες μετά την παρασκευή τους με σκοπό τη μελέτη της κατανομής της στο χρόνο. Προέκυψε ότι η προσθήκη ιπτάμενης τέφρας σε αυξανόμενα ποσοστά δημιουργεί αντίστοιχη μείωση των μέγιστων τιμών των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στα μίγματα, ενώ ο χρόνος στον οποίο εμφανίζονται οι θερμοκρασίες αυτές δεν φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά. Η μείωση της θερμοκρασίας αυτής είναι ιδιαίτερα επωφελής στη μείωση των εσωτερικών τάσεων που αναπτύσσονται σε ένα οδόστρωμα από σκυρόδεμα λόγω διαφοράς θερμοκρασίας καθ' ύψος της διατομής.

Τα αποτελέσματα των πειραμάτων δείχνουν ότι τα μίγματα του κυλινδρούμενου σκυροδέματος που παρασκευάστηκαν, εκτός από αυτό που δεν περιείχε καθόλου τσιμέντο, αναπτύσσουν σημαντικές μηχανικές αντοχές που καλύπτουν τις προδιαγραφές των περισσότερων χωρών για την κατασκευή οδοστρώματων από σκυρόδεμα. Το γεγονός αυτό μας επιτρέπει να συμπεράνουμε την καταλληλότητα του κυλινδρούμενου σκυροδέματος για την κατασκευή οδοστρώματων, καθώς και τη δυνατότητα επίτευξης σημαντικής οικονομίας στο κόστος των υλικών, και συγκεκριμένα του τσιμέντου, με την αντικατάστασή του σε κάποια σημαντικά ποσοστά (της τάξης του 50%), με ιπτάμενη τέφρα.

1. ΚΥΛΙΝΔΡΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ-ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

1.1. Εισαγωγή - Ιστορική αναδρομή.....	1
1.2. Υλικά	5
Αδρανή	5
Κονίες	6
Περιεκτικότητα υγρασίας και ενέργεια συμπίκνωσης	9
Πρόσθετα	11
1.3. Μηχανικά χαρακτηριστικά	13
Αντοχή σε θλίψη	13
Ελαστικά χαρακτηριστικά	13
Ικανότητα παραμόρφωσης	14
Μεταβολή όγκου	15
Αντοχή σε κάμψη	16
Αντοχή στην φθορά	17
Συμπεριφορά σε κόπωση	18
1.4. Κατασκευή Οδοστρωμάτων από Κυλινδρούμενο Σκυρόδεμα	19
Έδαφος θεμελίωσης και στρώση υπόβασης	19
Παραγωγή του μίγματος	19
Μεταφορά	20
Διάστρωση και συμπίκνωση	22
Αρμοί	29
Συντήρηση	32
Επιφανειακή υφή και ομαλότητα	35
Συμπεράσματα.....	36

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1. Σκοπός της εργασίας.....	41
2.2. Υλικά	42
2.3. Παρασκευή δοκιμίων	43
Εισαγωγή.....	43
Προεργασία για την κατασκευή δοκιμίων.....	45

Δοκιμαστικά αναμίγματα	47
Μίγματα κύριας έρευνας	55
Κατασκευή δοκιμίων	58
Μέτρηση της θερμοκρασίας για τα μίγματα Α,Β,Γ,Δ.....	59
Κατασκευή πρισμάτων επιβραχύνσεων	60
2.4. Δοκιμές	66
Θλίψη	66
Σχόλια πάνω στη δοκιμή σε θλίψη	69
Κάμψη	77
Σχόλια πάνω στη δοκιμή σε κάμψη	79
Διάρρηξη	83
Σχόλια πάνω στη δοκιμή σε διάρρηξη	86
Θερμότητα ενυδάτωσης, συστολή ξήρανσης	88
Σχόλια σχετικά με τη θερμότητα ενυδάτωσης και τη συστολή ξήρανσης	91
2.5. Αποτελέσματα	93
Πίνακες	95-97
Διαγράμματα	98-110
2.6. Σχόλια αποτελεσμάτων.....	111
Κάμψη	111
Θλίψη	111
Διάρρηξη	113
Σχέση μεταξύ αντοχών σε θλίψη και σε κάμψη	114
Σχέση μεταξύ αντοχών σε θλίψη και σε διάρρηξη	116
Σχέση μεταξύ αντοχών σε κάμψη και σε διάρρηξη	117
Ανάπτυξη θερμοκρασίας κατά τις πρώτες ώρες μετά την παρασκευή	119
2.7. Συμπεράσματα	121
Παράρτημα	124-142
Βιβλιογραφία	143

1. ΚΥΛΙΝΔΡΟΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ-ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

1.1. Εισαγωγή - Ιστορική αναδρομή

Τα κυλινδρούμενα σκυροδέματα (Κ.Σ.) είναι μίγματα αδρανών, τσιμέντου ή/και άλλων υδραυλικών κονιών, όπως ποζολανικών υλικών (ιπτάμενες τέφρες), ασβέστου και νερού τα οποία έχουν πλήρως καθορισμένα χαρακτηριστικά και δεδομένες αναλογίες. Τα οδοστρώματα από Κ.Σ. είναι το αποτέλεσμα μιάς νέας τεχνολογίας διάστρωσης σκυροδέματος κατά την οποία ένα μηδενικής κάθισης σκυρόδεμα με τσιμέντο Portland διαστρώνεται με ένα τροποποιημένο διαστρωτήρα ασφατομίγματος και συμπυκνώνεται με ένα δονητικό συμπυκνωτή. Αυτή η μέθοδος κατασκευής, που είναι παρόμοια με την οδοστρώση ασφαλτικού σκυροδέματος, παρέχει τη δυνατότητα εξοικονόμησης του ενός τρίτου ή και περισσότερο του κόστους κατασκευής ενός οδοστρώματος από συμβατικό σκυρόδεμα, συνδυάζοντας τα πλέον ελκυστικά χαρακτηριστικά των οδοστρωμάτων από σκυρόδεμα αφ' ενός και των ασφατικών οδοστρωμάτων αφ' ετέρου.

Η ιδέα της διάστρωσης και συμπύκνωσης ενός σκυροδέματος μηδενικής κάθισης σε στρώσεις ξεκίνησε στις αρχές της δεκαετίας του 1970 για χρήση σε ογκώδεις κατασκευές από σκυρόδεμα, κυρίως φράγματα. Οι τεχνικές κατασκευής μεγάλων έργων από σκυρόδεμα αναπτύχθηκαν, συμπεριλαμβάνοντας φυσικά και κατασκευές οδοστρωμάτων. Δύο πειραματικά οδοστρώματα από Κ.Σ. κατασκευάσθηκαν στο U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station (WES) στο Vicksburg, Mississippi στα μέσα της δεκαετίας του 1970. Το ένα προκειμένου να μελετηθεί η συμπύκνωση σκυροδέματος μηδενικής κάθισης με διάφορους δονητικούς συμπυκνωτές και το άλλο για να μελετηθεί η χρήση διαφόρων ποιοτήτων αδρανών σαν συνθετικά του Κ.Σ. οδοστρωμάτων. Την ίδια περίπου εποχή, οι Καναδοί πειραματίζονταν με οδοστρώματα από Κ.Σ. στη βιομηχανία ξυλείας σαν μια χαμηλού κόστους εναλλακτική λύση για την κατασκευή δαπέδων μεταφοράς και αποθήκευσης ξυλείας, όπου συχνά εμφανί-

ζονται φορτία στον άξονα που υπερβαίνουν τους 100ton. Αυτά τα δάπεδα έχουν παρουσιάσει εξαιρετική συμπεριφορά υπό σκληρές συνθήκες φόρτισης και περιβάλλοντος και έως το 1983 στον Καναδά είχαν κατασκευασθεί δάπεδα ξυλείας που υπερβαίνουν σε έκταση τα 110.000m^2 (280acres) καθώς και μια οδός μεταφοράς μήκους 17,7km (11miles) από Κ.Σ.

Οι πρώτες εφαρμογές μεγάλης έκτασης οδοστρωμάτων από Κ.Σ. από τα U.S. Army Corps of Engineers έγινε στο Fort Hood, Texas, τον Ιούλιο του 1984. Κατασκευάσθηκε ένας χώρος στάθμευσης για άρματα M1 και οχήματα μεταφοράς προσωπικού, έκτασης 16.700m^2 (20.000yd^2), σε 11 ημέρες και προέκυψε μια εξοικονόμηση κατά 15% σε σχέση με το κόστος ενός οδοστρώματος από οπλισμένο σκυρόδεμα. Τον Νοέμβριο του 1984 κατασκευάσθηκε μια οδός για ερπυστριοφόρα και ελαστικοφόρα στρατιωτικά οχήματα μήκους 215m (700ft) στο Fort Lewis, Washington. Τερματικοί σταθμοί σιδηροδρόμων στο Houston, Texas και στην Tacoma, Washington κατασκευάσθηκαν πρόσφατα σε πάχη έως και 0,46m (18in) προκειμένου να φέρουν βαριά φορτία που εφαρμόζονται από οχήματα φορτοεκφόρτωσης και στοίβαξης εμπορευματοκιβωτίων.

Στην Ευρώπη και σε άλλες χώρες η διάδοση του Κ.Σ. για την κατασκευή οδοστρωμάτων υπήρξε ανάλογη. Μετά το 1980 η Γαλλία, η Νορβηγία, η Σουηδία, η Φινλανδία, η Γερμανία, η Αυσταλία, η Αργεντινή και η Ιαπωνία έχουν να επιδείξουν την κατασκευή περισσότερων από 100.000m^2 οδοστρωμάτων από Κ.Σ. η κάθε μία, ενώ στη Χιλή, στην Ουρουγουάη, στο Μεξικό, στην Ισλανδία και στη Νότιο Αφρική το Κ.Σ. έχει χρησιμοποιηθεί λιγότερο, σε ορισμένες περιπτώσεις μόνο σε πειραματικά τμήματα.

Στην Ισπανία οι πρώτες εφαρμογές έλαβαν χώρα γύρω στο 1970. Ήταν κυρίως οδοστρώματα υποκείμενα σε ελαφρά κυκλοφορία, σε περιοχές κατοικίας, αστικές οδούς και αγροτικούς δρόμους.

Η τεχνική διάστρωσης εξελίχθηκε εμπειρικά από μικρούς τοπικούς εργολάβους και αν και οι εταιρείες αυτές δεν ήταν τόσο προηγμένες τεχνικά και η κατασκευή γινόταν χωρίς προηγούμενες εργαστηριακές δοκιμές ή με ανεπαρκείς ελέγχους κατά τη διάρκεια της κατασκευής, η συμπεριφορά αυτών των οδοστρωμάτων επιτρέπει να λεχθεί ότι, με την εμπειρία που αποκτήθηκε με περισσότερα από 5 εκατομμύρια τετραγωνικά μέτρα, έχει επιτευχθεί μια τεχνολογία απόλυτα επαρκής για τα είδη των δρόμων όπου έχει εφαρμοσθεί.

Σημαντική εμπειρία με το Κ.Σ. έχει επίσης αποκτηθεί σε δρόμους που φέρουν βαριά ή μέτρια κυκλοφορία. Η πρώτη κατασκευή αυτού του είδους ήταν το Cadí Tunnel, που κατασκευάσθηκε το 1984, όπου ήταν απαραίτητο να διατηρηθεί το οδόστρωμα ανοικτό στην κατασκευαστική κυκλοφορία. Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο το οδόστρωμα κατασκευάσθηκε σε μισά πλάτη με την κυκλοφορία να περνά το απόγευμα πάνω στο μισό οδόστρωμα που κατασκευάσθηκε κατά τη διάρκεια του πρωϊνού. Ακολούθως η μέθοδος χρησιμοποιήθηκε για νέες κατασκευές καθώς και για διαπλάτυνση, ενίσχυση ή βελτίωση υπάρχόντων δρόμων. Έχει εκτιμηθεί ότι περισσότερα από 300.000m^2 επιφάνειας δρόμων έχουν κατασκευασθεί με Κ.Σ. Ο αριθμός αυτός αναμένεται να αυξηθεί στο άμεσο μέλλον. Κατά την διάρκεια της άνοιξης και του καλοκαιριού του 1987 το πρώτο τμήμα αυτοκινητόδρομου κατασκευάσθηκε με τη χρήση αυτής της τεχνικής σε ένα μήκος 22,5km και σε πλάτος 7,5m και αναμένεται ότι στα επόμενα 2 χρόνια, περίπου 100km αυτοκινητοδρόμων θα έχουν κατασκευασθεί με Κ.Σ.

Διάφοροι λόγοι μπορούν να αναφερθούν για την εκτεταμένη χρήση του Κ.Σ. Κατ'αρχήν δεν απαιτείται ειδικός εξοπλισμός και τα οδοστρώματα από Κ.Σ. κατασκευάζονται με εξοπλισμό που διατίθεται ευρεώς και χρησιμοποιείται για μια ποικιλία εργασιών. Ακόμη προσφέρουν τη δυνατότητα σύντομης διάνοιξης στην

κυκλοφορία λόγω της σταθερότητας του ορυκτού σκελετού που σχηματίζεται από τα αδρανή, όταν το υλικό έχει συμπυκνωθεί. Για εργασίες επίστρωσης η διάνοιξη στην κυκλοφορία μπορεί να γίνει αμέσως. Τέλος, μπορούν να υπάρξουν σημαντικές εξοικονομήσεις σε σχέση με άλλες εναλλακτικές λύσεις. Η τεχνική των οδοστρωμάτων από Κ.Σ. έχει και ορισμένους περιορισμούς. Η ομαλότητα της επιφάνειας που επιτυγχάνεται με τον υπάρχοντα εξοπλισμό δεν είναι ακόμη απόλυτα ικανοποιητική, και όταν το οδόστρωμα πρόκειται να χρησιμοποιηθεί από κυκλοφορία υψηλής ταχύτητας εφαρμόζεται συνήθως μια επίστρωση ασφαλτικού σκυροδέματος πάχους μερικών εκατοστών. Επιπλέον απαιτείται προσεκτικός έλεγχος κατά την κατασκευή καθώς το Κ.Σ. είναι ιδιαίτερα ευαίσθητο σε διακυμάνσεις της υγρασίας του καθώς και σε ανεπαρκή συμπίκνωση.

1.2. Υλικά

Αδρανή

Σύμφωνα με την Ισπανική εμπειρία, οι προδιαγραφές για τα αδρανή που χρησιμοποιούνται στο Κ.Σ. είναι αυτές που χρησιμοποιούνται για κάθε κατηγορία κυκλοφοριακού φόρτου για επεξεργασμένες βάσεις από τσιμέντο.

Πρέπει να σημειωθεί ότι η εμπειρία που αποκτήθηκε, σε πάνω από 20 χρόνια, από τις επεξεργασμένες βάσεις από τσιμέντο φάνηκε χρήσιμη για την μεταγενέστερη κατασκευή οδοστρωμάτων Κ.Σ.

Το μέγιστο μέγεθος των αδρανών που χρησιμοποιείται για την αποφυγή του κινδύνου του διαχωρισμού των αδρανών και για την απόκτηση καλύτερης ποιότητας επιφάνειας είναι 20mm και 16mm, γεγονός που κάνει την ανάμιξη των υλικών ευκολότερη. Πάντως σε οδοστρώματα με χαμηλούς κυκλοφοριακούς φόρτους χρησιμοποιείται μέγιστο μέγεθος αδρανών 38mm.

Στον Πίνακα 1. παρουσιάζονται τα όρια της κοκομετρικής διαβάθμισης για μέγιστο μέγεθος αδρανών 20mm ($3/4$ in) & 16mm ($5/8$ in) αντίστοιχα. Έχουν χρησιμοποιηθεί δύο είδη αδρανών: πυριτικά και ασβεστολιθικά. Γενικά τα θραυσμένα αδρανή, που έχουν χρησιμοποιηθεί, χωρίζονται σε τρία τουλάχιστον μεγέθη (χαλίκι, γραμπίλι, άμμος). Πάντως, σε μερικά έργα έχουν χρησιμοποιηθεί μόνο δύο μεγέθη ή ακόμα και ένα. (0/20mm ή $3/4$ in). Για οδοστρώματα ταχείας κυκλοφορίας τα αδρανή, όπως απαιτεί ο κανονισμός, προέρχονται από κλάσματα δύο τουλάχιστον μεγεθών, που διαχωρίζονται από το κόσκινο No 4 (5mm).

Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του Κ.Σ., όπως έχει αναφερθεί, είναι η άμεση παράδοση στην κυκλοφορία του οδοστρώματος αμέσως μετά την κατασκευή του. Το γεγονός αυτό δημιουργεί την απαίτηση η στρώση να έχει μετά από την συμπύκνωση μία υψηλή ευστάθεια ή μία "άμεση φέρουσα ικανότητα". Δηλαδή ο σκε-

λετός των αδρανών να έχει μία κατάλληλη κοκομετρική διαβάθμιση. Είναι γεγονός, ότι η ικανότητα συμπύκνωσης των οδοστρωμάτων Κ.Σ. αυξάνει με την αύξηση της περιεκτικότητας των στρογγυλεμένων αδρανών στο μίγμα, ενώ αντίθετα η ευστάθεια του οδοστρώματος γίνεται καλύτερη με την αύξηση του ποσοστού των θραυσμένων κόκκων αδρανών του μίγματος. Γι' αυτό τον λόγο είναι απαραίτητο τα 2/3 των αδρανών που χρησιμοποιούνται να είναι θραυσμένα για να αποκτήσει το οδόστρωμα επαρκή φέρουσα ικανότητα.

Το γεγονός αυτό μπορεί να εκτιμηθεί με τη δοκιμή διείσδυσης C.B.R. σε δοκίμια που έχουν συμπυκνωθεί στην ελάχιστη πυκνότητα που απαιτείται (φυσιολογικά στο 95% της τροποποιημένης δοκιμής Proctor).

Κονίες

Το πλεονέκτημα του οδοστρώματος Κ.Σ., που είναι η στρώση να έχει μία υψηλή ευστάθεια, έχει σαν αποτέλεσμα την χρησιμοποίηση κονιών με υψηλή περιεκτικότητα ενεργών προσθέτων. Οι κονίες αυτές προσδίδουν στα σκυροδέματα αντοχή των πρώτων ημερών μικρότερη από αυτή που έχουν σκυροδέματα (για την ίδια ηλικία) κατασκευασμένα από τσιμέντα με χαμηλή αναλογία προσθέτων, ή από τσιμέντα χωρίς πρόσθετα (καθαρά). Όμως η αύξηση της ηλικίας των σκυροδεμάτων που είναι κατασκευασμένα από κονία με υψηλή περιεκτικότητα ενεργών προσθέτων προκαλεί αύξηση της αντοχής τους που φθάνει στο επίπεδο των τιμών των σκυροδεμάτων (για την ίδια ηλικία) που είναι κατασκευασμένα από τσιμέντα με χαμηλή αναλογία προσθέτων, ή από τσιμέντα χωρίς πρόσθετα (καθαρά).

Από την άλλη μεριά, κονίες με υψηλή αναλογία ενεργών προσθέτων παρουσιάζουν μερικά χαρακτηριστικά, που τις κάνουν χρήσιμες στην κατασκευή οδοστρωμάτων Κ.Σ. Έτσι, παρουσιάζουν

χαμηλή θερμοκρασία ενυδάτωσης, χαμηλότερη συρρίκνωση και αξιοσημείωτη καθυστέρηση στην έναρξη και τελείωση της εξέλιξης της στερεοποίησης, γεγονός που διευκολύνει την λειτουργία της διάστρωσης και της συμπύκνωσης.

Οι αλλαγές των κανονισμών για το τσιμέντο (Ισπανία, 1985) που επιτρέπει μία χαμηλότερη αναλογία αντοχής για τις 7 και 28 ημέρες από μία προγενέστερη απαίτηση, έκαναν ευκολότερη την ανάπτυξη του είδους αυτού του τσιμέντου. Πάντως πολλές αλλαγές στους κανονισμούς είναι σχετικώς πρόσφατες και οι κανονισμοί που ίσχυαν πριν από τους καινούργιους ήταν αποτέλεσμα της επινόησης ανάμιξης τσιμέντου και Ιπτάμενης Τέφρας παρά το γεγονός ότι εμφανίστηκαν αρκετά μειονεκτήματα (μεταβολή της συμπεριφοράς της ίδιας Ιπτάμενης Τέφρας με διαφορετικά τσιμέντα). Συνήθως χρησιμοποιούνται τσιμέντα που παράγονται με την συνάλεση του κλίνκερ με υψηλή αναλογία ενεργών προσθέτων (50% του ολικού).

Η συμφωνία της "Ένωσης Ισπανών Κατασκευαστών Τσιμέντου" με το Υπουργείο Δημοσίων Έργων, να προμηθεύσουν αυτούς τους τύπους του τσιμέντου σε τιμή 20 με 25% χαμηλότερη από αυτή που επικρατούσε στην αγορά για την κατασκευή οδοστρωμάτων που περιλαμβάνονταν στο πρόγραμμα Expressways, είχε σαν αποτέλεσμα την ευρύτερη χρησιμοποίηση αυτών των τσιμέντων.

Η περιεκτικότητα της κονίας για την κατασκευή σκυροδέματος κυμαίνεται από 260 έως 330Kgr/m³ ή στο 11,5 και 14,5% του ολικού βάρους των ξηρών υλικών.

Έχουν χρησιμοποιηθεί μίγματα από τσιμέντο και Ιπτάμενη τέφρα που προήρθαν μετά από ανάμιξή τους στον αναμικτήρα. Σαν αποτέλεσμα τα μίγματα αυτά ήταν το ίδιο καλά όσο και τα μίγματα που προήρθαν μετά από συνάλεση κλίνκερ και υψηλή αναλογία ενεργών προσθέτων (στα πιο τελευταία έργα έχουν χρησιμοποιηθεί ενεργά πρόσθετα που η περιεκτικότητά τους

έφτανε το 50-55% της ολικής ποσότητας της κονιάς).

Στην περίπτωση αυτή, τα πρόσθετα είναι Ιπτά-
μενη Τέφρα, η οποία είναι στην Ισπανία πολύ πιο άφθονη
(9 εκατομμύρια μετρικούς τόνους) από την φυσική ποζολάνη ή
από τη σκωρία υψικαμίνου. Η σκωρία υψικαμίνου σπύρω χρησιμοποιήθηκε σε ένα έργο μόνο, σαν ενεργό πρόσθετο.

Στην εγκατάσταση ανάμιξης, που αναμιγνύονται το τσιμέντο
και η Ιπτάμενη Τέφρα, η Ιπτάμενη Τέφρα είναι συνήθως υψηλής
περιεκτικότητας σε πυρίτιο και οξείδιο αργιλίου (τύπου F σύμφωνα
με το ASTM C 618) και είναι η πιο συνηθισμένη στην Ισπανία.
για βαριά κυκλοφορία

Όμως στο πρώτο οδόστρωμα από Κ.Σ. η Ιπτάμενη Τέφρα που
χρησιμοποιήθηκε ήταν υψηλής περιεκτικότητας σε ασβέστιο και
θείο (τύπου C σύμφωνα από το ASTM C 618) με υψηλή περιεκτικό-
τητα ελεύθερου ασβέστη (10% περίπου). Σε δρόμους χαμηλής κυκλο-
φορίας, όπου η κονία που χρησιμοποιήθηκε αναμείχθηκε στην ποσό-
τητα των $170\text{kg}/\text{m}^3$ σε τσιμέντο και $90\text{kg}/\text{m}^3$ σε ίδιο τύπου
Ιπτάμενης Τέφρας, κατά την κατασκευή τους δεν παρουσιάστηκε
καμία διαστολή τους.

Στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής
σε διάρρηξη που έγινε σε μίγματα από Κ.Σ. φανερώνοντας την
επιρροή της Κονιάς στην αντοχή των μιγμάτων. Η κονία που
χρησιμοποιήθηκε παράχθηκε μετά από συνέλευση 47,5% Κλίνκερ
2,5% γύψου σαν ρυθμιστή πήξης, και 50% Ιπτάμενης Τέφρας περιε-
κτικότητας σε πυρίτιο και οξείδιο αργιλίου, τύπου F.

Μερικά αξιοσημείωτα συμπεράσματα που προέρχονται από
τις τιμές του Πίνακα 2 είναι τα εξής:

- η ανάπτυξη της αντοχής από τις 28 στις 90 ημέρες είναι αξιόλογη
- η ανάπτυξη της ολικής περιεκτικότητας της κονιάς από 10% σε
13% έχει ως συνέπεια την αξιόλογη αύξηση της τιμής της αντοχής
και αυτό ισχύει για οποιαδήποτε ηλικία.

Οι κανονισμοί ορίζουν παρακάτω τις πιο σπουδαίες απαιτήσεις για την Κονία που χρησιμοποιείται στο Κ.Σ.

- Πρέπει να αποτελείται από τσιμέντο ή από μίγμα τσιμέντου και Ιπτάμενης Τέφρας. Στην δεύτερη περίπτωση η αναφερόμενη ποσότητα για το καθένα υλικό είναι επιβεβλημένη από μία εργαστηριακή μελέτη, ενώ το μίγμα είναι παραδοτέο για τοποθέτηση αφού πρώτα έχει κατασκευασθεί στην εγκατάσταση ανάμιξης.
- Για μίγματα τσιμέντου - Ιπτάμενης Τέφρας συνιστάται ότι το τσιμέντο πρέπει να είναι τύπου Portland χωρίς πρόσθετα. Ενώ η Ιπτάμενη Τέφρα που χρησιμοποιείται πρέπει να είναι περιεκτικότητας πυριτίου και οξειδίου του αργιλίου (τύπου F), επίσης σε ειδικές περιπτώσεις η χρησιμοποίηση τέφρας με υψηλή περιεκτικότητα σε ασβέστη (τύπου C) μπορεί να είναι επιτρεπτή.
- Η ποσότητα της Κονίας δεν επιτρέπεται να είναι λιγότερη από το 10% του ολικού βάρους των ξηρών υλικών.

Περιεκτικότητα υγρασίας και ενέργεια συμπίκνωσης

Η περιεκτικότητα της υγρασίας προσδιορίζεται με τον ίδιο τρόπο όπως και στις επεξεργασμένες βάσεις από τσιμέντο. Έτσι χρησιμοποιήθηκαν η τροποποιημένη δοκιμή Proctor και η δοκιμή της ηλεκτρόσφυρας (Kango). (Τα δοκίμια που χρησιμοποιήθηκαν είχαν κατασκευασθεί σε τρεις στρώσεις, κάθε στρώση συμπυκνώθηκε για 20 δευτερόλεπτα).

Στα έργα που έχουν ολοκληρωθεί μέχρι τώρα η περιεκτικότητα της υγρασίας κυμαίνεται από 4,5 έως 5,5% στο συνολικό βάρος των ξηρών υλικών ή από 105 έως 130 Kgr/m³.

Ένα από τα μειονεκτήματα του Κ.Σ. είναι η ευαισθησία του στην μεταβολή της υγρασίας, γεγονός που επηρεάζει τον απαιτούμενο βαθμό συμπίκνωσης. Η υπέρβαση ή η ανεπάρκεια

του νερού μειώνει σημαντικά την μηχανική αντοχή του μίγματος.

Η έλλειψη της υγρασίας είναι συνήθως η αιτία για την εμφάνιση του κινδύνου διαχωρισμού των αδρανών, των ελαττωμάτων στην στερεοποίηση σε τοπική περιοχή, καθώς και δυσκολίες στην συμπύκνωση. Η υπέρβαση του νερού είναι η αιτία για την δημιουργία σφαλμάτων στην ομαλότητα της επιφάνειας. Από τα σφάλματα αυτά σε συσχετισμό με την μεταβολή της υγρασίας κατά $\pm 0,5\%$ αποκαλύπτεται ο βέλτιστος βαθμός της υγρασίας.

Οι κανονισμοί ορίζουν ότι η ευαισθησία του, τεχνικώς επιλεγμένου μίγματος στην περιεχόμενη υγρασία πρέπει να ελεγχθεί χρησιμοποιώντας την δοκιμή C.B.R. σε δοκίμια στα οποία η περιεκτικότητά τους σε υγρασία διαφέρει από την βέλτιστη του τροποποιημένου Proctor κατά $\pm 0,5\%$. Επίσης δοκίμια με καθορισμένη πυκνότητα και με μεταβαλλόμενη υγρασία πρέπει να πληρούν τους παρακάτω όρους για να είναι αξιοσημείωτα τα αποτελέσματα της δοκιμής σε διάρρηξη στην οποία υποβάλλονται για καθορισμένες ηλικίες (28 ή 90 ημερών η οποία εξαρτάται από τον τύπο της Κονίας που χρησιμοποιήθηκε).

- Τα δοκίμια απαιτείται να έχουν περιεκτικότητα υγρασίας η οποία διαφέρει από την βέλτιστη του τροποποιημένου Proctor κατά $\pm 0,5\%$.
- Τα δοκίμια με την βέλτιστη περιεκτικότητα υγρασίας συμπυκνώνονται με την απαραίτητη ενέργεια ώστε να αποκτήσουν πυκνότητες ίσες με το 95 και 97% της μέγιστης πυκνότητας κατά την δοκιμή του τροποποιημένου Proctor.

Τέλος τα αποτελέσματα της δοκιμής εξαρτώνται επίσης και από το μίγμα. Σε μερικά έργα έχει αποδειχθεί ότι μία αύξηση του 5% της πυκνότητας μπορεί να προκαλέσει μία αύξηση της αντοχής της τάξεως των 25%.

Πρόσθετα

Ένας σημαντικός τύπος προσθέτου που χρησιμοποιείται, εκτός αν η θερμοκρασία κατά την διάστρωση είναι χαμηλή είναι το επιβραδυντικό. Το πρόσθετο αυτό χρησιμοποιείται για την βελτίωση του χρόνου εργασιμότητας για το μίγμα, γεγονός που κάνει ευκολότερη την συμπίκνωση του. Η ποσότητα του επιβραδυντή κυμαίνεται συνήθως στο 0,5 και 1% του βάρους της Κονίας.

Είναι γνωστό ότι η περίοδος εργασιμότητας του μίγματος ποικίλει ανάλογα με την θερμοκρασία. Έτσι οι κανονισμοί ορίζουν ότι η θερμοκρασία που χρησιμοποιείται για να προσδιοριστεί η περίοδος εργασιμότητας του μίγματος πρέπει να είναι ο μέσος όρος της θερμοκρασίας του αέρα που προβλέπεται για την χρονική περίοδο ανάμεσα στις 11.00 και 14.00 ώρες.

Πίνακας 1. Όρια κοκκομετρικής διαβάθμισης για Κ.Σ. [1]

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

Πίνακας 2. Επιρροή της περιεκτικότητας τσιμέντου στην αντοχή του εφελκυσμού σε διάρρηξη για μίγματα από Κ.Σ. [1]

Αναμιγμένο τσιμέντο (50/50) περιεκτικότητα %	Αντοχή εφελκυσμού σε διάρρηξη ΜΡα		
	7 ημερών	28 ημερών	90 ημερών
10	1,1	1,8	2,2
11	1,3	2,4	3,0
12	1,9	2,9	3,5
13	2,3	3,5	4,6
14	2,6	3,6	4,9
15	2,7	3,6	5,2

1.3 Μηχανικά χαρακτηριστικά του Κ.Σ.

Αντοχή σε θλίψη

Η δοκιμή της αντοχής σε θλίψη εφαρμόζεται σε δοκίμια σχήματος κύβου ή και κυλίνδρου, επίσης και σε πρισματικά δοκίμια που μπορούν πρώτα υποβληθούν στη δοκιμή σε κάμψη.

Η έρευνα που παρουσιάζεται στο [5] αποδεικνύει μία στενή συσχέτιση μεταξύ των αντοχών του πυρήνα και του κυλινδρικού δοκιμίου, γεγονός που συμβαίνει όταν δεν υπάρχει διαφορά στην πυκνότητά τους.

Σε δοκίμια μορφής κύβου, κυλίνδρου και πρίσματος η συμπίκνωση γίνεται με την βοήθεια της συσκευής Vebe ή με την ηλεκτρόσφυνρα (Kango). Σε μεγάλα δοκίμια μορφής δοκών και πλακών η συμπίκνωση γίνεται με διάφορους μηχανικούς συμπυκνωτές και με συμπυκνωτές με πεπιεσμένο αέρα.

Η αντοχή σε θλίψη ενός συμπυκνωμένου σκυροδέματος εξαρτάται σημαντικά από τον λόγο N/T νερό - τσιμέντο του μίγματος ή το λόγο νερό - άθροισμα τσιμέντου και πουζολάνης (τσιμέντο-τέφρα) για μίγμα με σταθερό λόγο πουζολάνης προς τσιμέντο. Επισημαίνεται, ότι τα μίγματα αυτά έχουν χαμηλή περιεκτικότητα σε νερό, αλλά αυτή είναι απαραίτητη για να μπορούν να συμπυκνωθούν με οδοστρωτήρα.

Ελαστικά χαρακτηριστικά

Οι κυριώτεροι παράγοντες που επηρεάζουν τα ελαστικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος είναι η αντοχή του τσιμετοπολτού (ηλικία και λόγος N/T), καθώς και το είδος των αδρανών.

Γεγονός είναι ότι το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος αυξάνει με την ηλικία και με την αύξηση της περιεκτικότητας σε τσιμέντο. Επίσης το μέτρο ελαστικότητας των αδρανών και η

αναλογία τους σε όγκο στο μίγμα επηρεάζει την τιμή του μέτρου ελαστικότητας. Η κατάλληλη αναλογία των υλικών καθώς και η καλή συμπύκνωση του μίγματος του Κ.Σ. δίνουν την ίδια τιμή μέτρου ελαστικότητας με το σύνηθες σκυρόδεμα το οποίο είναι κατασκευασμένο με τα ίδια αδρανή. Επίσης η αύξηση της αναλογίας των αδρανών είναι δυνατόν να προκαλέσει αύξηση του μέτρου ελαστικότητας, για δεδομένο μέγιστο μέγεθος κόκκου αδρανών με την προϋπόθεση το μίγμα να έχει αρκετό πολτό.

Τέλος το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος επηρεάζεται από την πυκνότητά του. Έτσι μείωση της πυκνότητας λόγω της αύξησης των κενών του αέρα προκαλεί ελάττωση του μέτρου ελαστικότητας.

Στο [26] παρουσιάζεται η σχέση $E = C \sqrt{f_c}$ που συνδέει το μέτρο ελαστικότητας E και την αντοχή σε θλίψη και προέκυψε από τις δοκιμές που έγιναν με δοκίμια που προέρχονταν από μια δοκιμή σε πραγματική κλίμακα, με πυρήνες και με δοκίμια κατασκευασμένα στο εργαστήριο.

όπου E : μέτρο ελαστικότητας σε MPa (psi)

f_c : αντοχή σε θλίψη σε MPa (psi)

c : σταθερά με τιμή που κυμαίνεται μεταξύ 4.947 (59.000) και 5618 (67.000) ανάλογα με το μίγμα του Κ.Σ.

Ικανότητα παραμόρφωσης

Το μη παρεμποδιζόμενο σε μετακίνηση σκυρόδεμα είναι ελεύθερο να μεταβάλει τον όγκο του χωρίς να υφίσταται καμία ένταση. Στο παρεμποδιζόμενο σε μετακίνηση όμως σκυρόδεμα η προκύπτουσα τάση επιβάλλει αρκετή ένταση για να εξουδετερώσει την μεταβολή του όγκου. Αν η επιφερόμενη παραμόρφωση είναι εφελκυστική και υπερβεί την ικανότητα παραμόρφωσης του σκυροδέματος τότε θα

παρουσιασθεί ρηγμάτωση. Στο σκυρόδεμα μπορεί να αναπτυχθεί παραμόρφωση με την ελάττωση του όγκου που συμβαίνει λόγω της ξήρανσης και της αυτογεννούς συρρίκνωσης ή από την ψύξη. Είναι επομένως φανερό ότι η ικανότητα παραμόρφωσης του σκυροδέματος πριν ρηγματωθεί έχει μεγάλη σημασία. Η ιδιότητα αυτή επηρεάζεται από την ιδιότητα των αδρανών και από την περιεκτικότητα σε τσιμέντο. Γενικά, τα σκληρά και ψαθιρά αδρανή όπως τα χαλαζιακά προσδίδουν χαμηλή ικανότητα παραμόρφωσης.

Η αύξηση της περιεκτικότητας σε τσιμέντο αυξάνει την ικανότητα παραμόρφωσης με την αύξηση της εφελκυστικής αντοχής. Σε ογκώδεις κατασκευές όμως αυτή η αύξηση είναι δυνατόν να αντισταθμίζεται εάν υπάρχουν προβλήματα διάχυσης της αυξημένης θερμότητας, που δημιουργείται από την υψηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο.

Γενικά η ικανότητα παραμόρφωσης του Κ.Σ. δεν διαφέρει από αυτή των συνηθισμένων σκυροδεμάτων που κατασκευάζονται από τα ίδια υλικά. Πάντως η ικανότητα παραμόρφωσης αρκετών Κ.Σ. είναι χαμηλή διότι κατασκευάζονται με χαμηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο μια και χρησιμοποιείται πουζολάνη που αντικαθιστά μέρος του.

Μεταβολή Όγκου

Η πιθανότητα μεταβολής του όγκου, λόγω της απώλειας υγρασίας, της ξήρανσης και της συρρίκνωσης, είναι σημαντικά μικρή στο Κ.Σ., διότι η περιεκτικότητα σε νερό στο μίγμα είναι αρκετά μικρότερη από αυτή που υπάρχει στο συνηθισμένο σκυρόδεμα.

Η επιφάνεια είναι εκτεθειμένη στη ξήρανση, όπως είναι για όλα τα σκυροδέματα, αλλά υπάρχει λιγότερος πολτός στην επιφάνεια και αύξηση της παρεμπόδισης της συστολής, μιά και τα αδρανή έχουν μεγαλύτερο όγκο. Η ξήρανση στην επιφάνεια προκαλεί κυρίως μικρορηγμάτωση του πολτού γύρω από τους κόκκους των αδρανών.

Επίσης η συστολή ξήρανσης είναι αποτέλεσμα της αναλογίας

νερό-τσιμέντο. Αν ο πολτός δεν είναι συμπαγής ή αν η συμπύκνωση δεν είναι η κατάλληλη για να εμποδίσει ή να περιορίσει την μετακίνηση της υγρασίας τότε η επιφάνεια συρρικνώνεται και σπάει, και αυτό μεταδίδεται βαθύτερα στη μάζα.

Η αυτογενής μεταβολή του όγκου του μίγματος σκυροδέματος είναι αποτέλεσμα της ποσότητας και του είδους του τσιμέντου και της πουζολάνης που περιέχονται στο μίγμα. Η μελέτη που συντάχθηκε από το "Σώμα των Μηχανικών" [5] δείχνει ότι έχουμε αύξηση του όγκου από την αύξηση της περιεκτικότητας σε τσιμεντοκονία και από την λεπτότητα του υλικού. Η φυσική πουζολάνη παράγει μεγαλύτερη αυτογενή μεταβολή όγκου από την Ιπτάμενη τέφρα, ή από το αμιγές τσιμέντο portland.

Τα θερμικά χαρακτηριστικά του σκυροδέματος επηρεάζονται από τα αδρανή και από την περιεκτικότητα του μίγματος σε υγρασία. Αυτά τα χαρακτηριστικά για το Κ.Σ. μπορεί να είναι διαφορετικά από ότι για τα συνηθισμένα σκυροδέματα μόνο στο βαθμό που διαφέρει η ανάμιξη. Η πιθανότητα για μεταβολή του όγκου λόγω της θερμότητας ενυδάτωσης είναι σημαντικά μειωμένη για το Κ.Σ.

Αντοχή σε κάμψη

Η αντοχή σε κάμψη του Κ.Σ. μπορεί να είναι ιδιαίτερα υψηλή ιδίως αν ληφθούν υπόψη η μικρή περιεκτικότητα σε τσιμέντο και η συνεκτικότητά του (μηδενική καθισση). Επιπλέον το Κ.Σ. έχει ένα σχετικά υψηλό συντελεστή ερπυσμού και ένα χαρακτηριστικά χαμηλό μέτρο ελαστικότητας. Τα τελευταία αυτά χαρακτηριστικά ελαχιστοποιούν την ανάπτυξη εσωτερικών εντάσεων που είναι ήδη μικρότερες λόγω της μειωμένης περιεκτικότητας σε νερό και τσιμέντο.

Συνιστάται να χρησιμοποιείται σαν μέγεθος υπολογισμού η αντοχή σε κάμψη των 90 ημερών. Συνήθως είναι 10% μεγαλύτερη από αυτή των 28 ημερών. Χρησιμοποιείται το μέγεθος της αντοχής των 90 ημερών διότι τα φορτία που επαναλαμβάνονται στην διάρκεια των λίγων πρώτων μηνών της ζωής του οδοστρώματος είναι μικρά συγκρινόμενα με τον μεγαλύτερο αριθμό των επαναλαμβανομένων φορτίων που εμφανίζονται αργότερα. Το Κ.Σ. θα συνεχίσει να κερδίζει αντοχή με την ηλικία, έτσι η τελική αντοχή του οδοστρώματος θα ξεπεράσει και θα παραμείνει πάνω από το μέγεθος της αντοχής των 90 ημερών.

Η σχέση μεταξύ αντοχής σε θλίψη και αντοχής σε κάμψη των 28 ημερών είναι της μορφής [26].

$$f_r = c \sqrt{f_c}$$

όπου f_r = αντοχή σε κάμψη MPa (psi)

f_c = αντοχή σε θλίψη, MPa (psi)

c = μία σταθερά που κυμαίνεται από 0,79 (9,4) έως 0,91 (10,8) και εξαρτάται από τα διαφορετικά μίγματα του Κ.Σ.

Αντίσταση στη φθορά

Η αντοχή στη φθορά του σκυροδέματος συνίσταται:

- α) Στην αντοχή του στην απότριψη, η οποία προκαλείται από την μηχανική δράση στην επιφάνεια του σκυροδέματος διαφόρων παραγόντων όπως κίνηση οχημάτων, νερού με φερτές ύλες κ.τ.λ.
- β) Στην ανθεκτικότητα στην επίδραση χημικών ουσιών που διαβρώνουν χημικά την επιφάνεια του σκυροδέματος.
- γ) Στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος στις κλιματολογικές επιδράσεις (κύκλο παγετού)

Η αντίσταση του σκυροδέματος στην αποσάθρωση εξαρτάται από την αντίσταση στο παγετό των αδρανών, από την αντοχή του σκυροδέματος και από την περιεκτικότητα του αέρα στο σκυρόδεμα.

Η περιεκτικότητα σε αέρα εξαρτάται από την περιεκτικότητα του μίγματος σε νερό και από την περιεκτικότητα ενδεχομένως σε αερατικό πρόσθετο.

Μέχρι τώρα συνήθως ακολουθούνται οι ίδιοι κανόνες προστασίας που ακολουθούνται για το συνηθισμένο σκυρόδεμα οδοστρωμάτων.

Ως προς την ανθεκτικότητα στην χημική διάβρωση

και σε απότριψη

ακολουθούνται οι ίδιοι κανόνες με αυτούς του συνηθισμένου σκυροδέματος.

Συμπεριφορά σε κόπωση

Όπως το συνηθισμένο σκυρόδεμα έτσι και το Κ.Σ. υπόκειται σε κόπωση. Η αστοχία του οδοστρώματος λόγω κόπωσης συμβαίνει όταν τα υλικά θραυστούν κάτω από συνεχόμενα και επαναλαμβανόμενα φορτία που προκαλούν τάσεις μικρότερες από τις αντοχές των υλικών.

Εφόσον η κρίσιμη τάση στο Κ.Σ. είναι καμπτική, η κόπωση λόγω της καμπτικής τάσης χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό του πάχους οδοστρώματος. Ο λόγος των τάσεων που χρησιμοποιείται σαν σχέση κόπωσης είναι ο λόγος της καμπτικής τάσης και της αντοχής σε κάμψη.

$$\text{Βαθμός καταπόνησης} = \frac{\text{Καμπτική τάση}}{\text{αντοχή σε κάμψη}}$$

1.4. Κατασκευή Οδοστρωμάτων από Κυλινδρούμενο

Σκυρόδεμα

Έδαφος θεμελίωσης και Στρώση υπόβασης

Οι απαιτήσεις για το έδαφος θεμελίωσης και την στρώση της υπόβασης για οδοστρώματα από Κ.Σ. είναι βασικά οι ίδιες με εκείνες που ισχύουν για οδοστρώματα από συμβατικό σκυρόδεμα. Η ομοιομορφία του εδάφους θεμελίωσης θα πρέπει να εξασφαλίζεται και οι μαλακές στρώσεις οργανικών υλικών θα πρέπει να απομακρύνονται. Σε περιοχές όπου το οδόστρωμα ή η υπόβαση ενδέχεται να υποβάλλεται εποχιακά σε παγετό, η υπόβαση θα πρέπει να αποστραγγίζει επαρκώς το νερό που εισχωρεί από την επιφάνεια είτε μέσω του εδάφους θεμελίωσης. Η υπόβαση θα πρέπει επίσης να παρέχει ικανοποιητική υποστήριξη ώστε το οδόστρωμα από Κ.Σ. να συμπυκνώνεται πλήρως καθ'όλο το ύψος της διατομής του.

Παραγωγή του μίγματος

Για την παραγωγή του μίγματος του Κ.Σ. έχουν ως τώρα χρησιμοποιηθεί αναμικτήρες συνεχούς ανάμιξης (continuous-mixing), αναμικτήρες ανάμιξης κατά ποσότητες (weigh-batch) και σε ορισμένες περιπτώσεις αναμικτήρες φορτηγά (drum truck mixers) (βαρέλες). Η εγκατάσταση συνεχούς ανάμιξης παρουσιάζεται πλεονεκτικότερη διότι μεταφέρεται ευκολότερα στο εργοτάξιο, χρειάζεται λιγότερο χρόνο για να εγκατασταθεί και έχει μεγαλύτερη απόδοση απ'ότι η εγκατάσταση ανάμιξης κατά ποσότητες. Η εγκατάσταση ανάμιξης κατά ποσότητες επιτρέπει ακριβέστερο έλεγχο στις αναλογίες των υλικών σε κάθε φουρνιά, αλλά γενικά δεν έχει επαρκή απόδοση, για μεγάλες εργασίες οδοστρωσίας. Το πρόβλημα αυτό μπορεί να λυθεί με τη χρήση περισσότερων από μιάς εγκαταστάσεων. Η απόδοση της εγκατάστασης θα πρέπει να είναι τέτοια ώστε η ομαλή

και συνεχής λειτουργία του ή των διαστρωτήρων να μην διακόπτεται. Για τις περισσότερες εργασίες, εκτός από τις πολύ μικρές, η απόδοση της εγκατάστασης δεν θα πρέπει να είναι μικρότερη από 250 τόνους ανά ώρα. Η παραγωγή μίγματος της εγκατάστασης δεν θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ικανότητα διάστρωσης των μηχανημάτων διάστρωσης, ούτε μεγαλύτερη από την ικανότητα του εξοπλισμού κυλίνδρωσης.

Οι αναμικτήρες - φορτηγά συνιστάται να αποφεύγονται καθώς έχουν παρουσιάσει στο παρελθόν προβλήματα ομοιομορφίας στην ανάμιξη και μη ομαλή και συνεχή παραγωγή μίγματος. Παρ'όλα αυτά παρουσιάζονται ιδιαίτερα ελκυστικοί για μικρές εργασίες. Σε μιά συγκεκριμένη περίπτωση τα συστατικά του μίγματος ζυγίσθηκαν στο εργοτάξιο ενώ η ανάμιξη καθεαυτή έγινε στον αναμικτήρα-φορτηγό χωρίς να εμφανιστεί κανένα πρόβλημα στην ομοιομορφία του υλικού ή κατά την εκφόρτωση. Η απόδοση που επιτεύχθηκε ήταν μεταξύ 40 και 65 m³/hr [1].

Η ανάμιξη επί τόπου δεν είναι εφαρμόσιμη για παραγωγή Κ.Σ., καθώς με αυτό τον τρόπο δεν είναι δυνατόν να εξασφαλισθεί ο έλεγχος της ποιότητάς του.

Μεταφορά

Το Κ.Σ. μεταφέρεται από την εγκατάσταση ανάμιξης στη θέση όπου θα διαστρωθεί συνήθως με ανατρεπόμενα φορτηγά οχήματα. Αυτά θα πρέπει να είναι εφοδιασμένα με προστατευτικά καλύματα ώστε να διατηρείται σε βέλτιστη τιμή η περιεκτικότητα σε νερό και υπό δυσμενείς καιρικές συνθήκες (βροχή ή καιρός ζεστός και ξηρός). Το μίγμα εκφορτώνεται κοντά στον εξοπλισμό διάστρωσης ή και κατευθείαν μέσα στη σκάφη του διαστρωτήρα. Ένας μέγιστος χρόνος 60' είναι η συνηθισμένη απαίτηση των προδιαγραφών για μεταφορά και διάστρωση.

Αν το Κ.Σ. αναμιγνύεται και μεταφέρεται σε αναμικτήρες - φορτηγά, οι βαρέλες τους θα πρέπει να είναι σε καλή κατάσταση και καθαρές. Ακόμη και όταν αυτές οι προϋποθέσεις υπάρχουν, η εκφόρτωση είναι αργή, αλλά όταν δεν υπάρχουν οι δυσκολίες θα είναι ακόμη μεγαλύτερες.

Σ' αυτό το στάδιο η διαδικασία κατασκευής μπορεί να συγκριθεί με αυτή που ακολουθείται στη διάστρωση ενός ασφαλτικού σκυροδέματος. Το πρόβλημα που παρουσιάζεται εδώ είναι ο διαχωρισμός λόγω έλλειψης λεπτόκοκκου υλικού. Όταν η διαδικασία ανάμιξης έχει αρχίσει σ' ένα μίγμα από συμβατικό σκυρόδεμα και έχει δημιουργηθεί μια κονία, ο διαχωρισμός του αδρανούς παρεμποδίζεται. Μιά συνδετική ύλη από άσφαλτο ή παιπάλη ή και τα δύο σ' ένα ασφαλτικό μίγμα, επίσης εμποδίζει το διαχωρισμό του αδρανούς. Όμως, η χαμηλή περιεκτικότητα σε νερό στο Κ.Σ. εμποδίζει τη δημιουργία μιάς συνδετικής ύλης και σαν συνέπεια ο διαχωρισμός του αδρανούς είναι ένα δυνητικό πρόβλημα. Απαιτείται προσοχή στη μεταφορά, διάστρωση και κατεργασία με το χέρι που σχετίζονται με την κατασκευή οδοστρωμάτων από Κ.Σ. προκειμένου να επιτευχθεί ομοιογένεια στην τελική κατασκευή.

Άλλος τρόπος μεταφοράς για το νωπό Κ.Σ. είναι η μεταφορά με αποξεστικά οχήματα (scrapers). Η χρήση τους εξασφαλίζει καλύτερο έλεγχο του πάχους της στρώσης κατά τη διάστρωση. Το γεγονός αυτό μειώνει τον χρόνο που απαιτείται από τον εξοπλισμό διάστρωσης προκειμένου να προετοιμάσει τη στρώση για συμπύκνωση με μία αρχική διευθέτηση του υλικού.

Πρέπει να υπάρχει φροντίδα ώστε να μην μεταφέρονται ακαθαρσίες στο Κ.Σ. Αυτό σημαίνει ότι χρειάζεται να υπάρχει πρόνοια ώστε τα ελαστικά του εξοπλισμού μεταφοράς να διατηρούνται καθαρά ή να καθαρίζονται προτού το μηχάνημα μπει στην περιοχή του Κ.Σ. Ειδικές επιστρώσεις των οδών μεταφοράς όπως πλυμένο αδρανές

ή καθαρή άμμος που δεν θα προσκολλάται στα ελαστικά, μπορούν να χρησιμοποιηθούν προκειμένου να διατηρείται η επιφάνεια του Κ.Σ. καθαρή. Σε δύο έργα [10] χρησιμοποιήθηκαν ειδικά συστήματα πλύσης με καταιονισμό των ελαστικών. Μιά άλλη λύση είναι να διατηρούνται οι μονάδες μεταφοράς πάνω στην επιφάνεια του Κ.Σ. κατά την φόρτωση. Ένα καλό πρόγραμμα συντήρησης είναι επίσης αναγκαίο ώστε να αποφευχθούν διαρροές λιπαντικών ή καυσίμων στην επιφάνεια του Κ.Σ.

Η κυκλοφορία στο Κ.Σ. θα πρέπει να γίνεται σε μία κατεύθυνση, δηλαδή να υπάρχουν μία είσοδος και μία έξοδος από την περιοχή. Η κυκλοφορία σε μία κατεύθυνση εμποδίζει τον εξοπλισμό μεταφοράς από του να εμπλέκεται με τον εξοπλισμό διάστρωσης. Αυτό βοηθά ώστε να υπάρχει μία συνεχής ροή του μίγματος και σταθερή πρόοδος των εργασιών.

Σε περιπτώσεις όπου χρειάζεται μεγάλος όγκος σκυροδέματος σε σχετικά περιορισμένη έκταση όπως στα φράγματα, η μεταφορά μπορεί να γίνει με μεταφορικές ταινίες.

Διάστρωση και Συμπύκνωση

Η διαδικασία της διάστρωσης και της συμπύκνωσης είναι ο κύριος παράγοντας σ'ότι αφορά την οικονομία των οδοστρωμάτων από Κ.Σ., διότι απαιτείται γι'αυτήν ένα μέρος μόνο του χρόνου που καταναλώνεται σ'ένα οδόστρωμα από συμβατικό σκυρόδεμα. Για παράδειγμα αντί της δημιουργίας λωρίδων από συμβατικό σκυρόδεμα που απαιτούν προεργασία και χρόνο προετοιμασίας για κάθε λωρίδα κάθε φορά, ένα οδόστρωμα από Κ.Σ. διαστρώνεται με ένα ευέλικτο μηχάνημα διάστρωσης ασφαλτομίγματος το οποίο γενικά περιορίζεται μόνο από την παραγωγή μίγματος και τον αριθμό των φορτηγών οχημάτων για τη μεταφορά του. Ο χρόνος

για την κατασκευή ενός οδοστρώματος από Κ.Σ. βρίσκεται στο τριάντα τοις εκατό αυτού που απαιτείται για μιά κατασκευή οδοστρώματος από συμβατικό σκυρόδεμα.

Κατά τη χειρωνακτική εργασία για τη διάστρωση χρησιμοποιούνται τα ίδια εργαλεία όπως και στα ασφαλτικά οδοστρώματα, όπως φτυάρια και τσουγκράνες.

Στις περισσότερες εφαρμογές οδοστρώσεως το Κ.Σ. διαστρώνεται με ένα διαστρωτήρα ασφαλτομίγματος ή παρόμοιο εξοπλισμό. Ένας αυτόματος μηχανισμός ελέγχου της στάθμης επιτρέπει στο Κ.Σ. να απλώνεται με ένα βαθμό ακρίβειας και με ικανοποιητική ομαλότητα. Ένας διαστρωτήρας εξοπλισμένος με ένα δονητικό προπέτασμα ή με μία μπάρα συμπίεσης θα αποδώσει μιά ικανοποιητική υφή της επιφάνειας και κάποια αρχική συμπύκνωση κατά τη διάρκεια της διάστρωσης. Είναι αναγκαίο να γίνουν ορισμένες τροποποιήσεις στον ασφαλτικό διαστρωτήρα, ώστε να προσαρμοστεί στις διαφορετικές απαιτήσεις που έχει η διάστρωση του Κ.Σ. Αυτές περιλαμβάνουν διεύρυνση στις τροφοδοτικές πύλες μεταξύ της κοάνης τροφοδοσίας και του προπετάσματος, ώστε να διευκολύνεται ο μεγάλος όγκος του δύσκαμπτου υλικού να κινείται διαμέσω του μηχανήματος, και ρύθμιση των κοχλιών διανομής μπροστά απ' το προπέτασμα ώστε το Κ.Σ. να απλώνεται ομοιόμορφα σ' όλο το πλάτος της λωρίδας διάστρωσης.

Αν και ορισμένοι τύποι διαστρωτήρων έχουν ικανότητα διάστρωσης υλικού σ' ένα πλάτος που φθάνει έως και τα 7,3m, ο περιορισμός του πλάτους της λωρίδας διάστρωσης στα 3,6 έως 4,3m βοηθά στη μείωση του διαχωρισμού του υλικού. Το πάχος της στρώσης που μπορεί να διαστρωθεί από ένα συμβατικό διαστρωτήρα ασφαλτομίγματος φθάνει τα 25cm μη συμπυκνωμένου υλικού. Ας σημειωθεί ότι το πάχος της στρώσης και η συμπύκνωση που χρειάζεται ώστε αυτή να φθάσει την επιθυμητή πυκνότητα, έχουν σημα-

ντική επίδραση στην ανοχή της επιφάνειας του τελικού οδοστρώματος. Μιά στρώση μη συμπυκνωμένου υλικού πάχους 25cm θα συμπιεσθεί κατά 2,5 έως 4,0cm κατά την συμπύκνωση. Ορισμένες περιοχές της επιφάνειας μπορεί να συμπιεσθούν περισσότερο από άλλες κατά την κυλίνδρωση, γεγονός που οδηγεί σε ανωμαλίες της τελικής επιφάνειας. Οι νέοι διαστρωτήρες υψηλής απόδοσης έχουν ικανότητα συμπύκνωσης σε περισσότερο από 90% κατά τροποποιημένη δοκιμή Proctor, αφήνοντας έτσι λιγότερη εργασία συμπύκνωσης για τον εξοπλισμό κυλίνδρωσης που ακολουθεί.

Όταν το πάχος του οδοστρώματος είναι τέτοιο ώστε να απαιτείται κατασκευή σε δύο στρώσεις, τότε η επιφανειακή στρώση θα πρέπει να διαστρώνεται μέσα στην περίοδο εργασιμότητας της κάτω στρώσης έτσι ώστε να επιτυγχάνεται μέγιστη πρόσφυση μεταξύ των δύο στρώσεων. Στους πίνακες 1 και 2 παρατίθενται περίοδοι εργασιμότητας για διάφορα είδη εργασιών σύμφωνα με τις Γαλλικές και Ισπανικές προδιαγραφές αντίστοιχα.

Πίνακας 1. Ελάχιστες περίοδοι εργασιμότητας ανάλογα με το είδος της εργασίας (Γαλλικοί Κανονισμοί) [3]

Είδος εργασίας	Περίοδος εργασιμότητας
Νέες οδοί και επιστρώσεις χωρίς κυκλοφορία:	
- Συνολικό πλάτος χωρίς κατεργασία	6 ώρες
- Μισά πλάτη	10 ώρες
- Συνολικό πλάτος με κατεργασία	10 ώρες
Επιστρώσεις με κυκλοφορία	12 ώρες

Πίνακας 2. Απαιτούμενες περίοδοι εργασιμότητας για διάφορα είδη εργασιών [1]

Είδος εργασίας		Ελάχιστες περίοδοι εργασιμότητας (ώρες)
Χωρίς κυκλοφορία	Συνολική κατασκευή του πλάτους	5
	Τμηματική κατασκευή του πλάτους	7
Επικάλυψη με κυκλοφορία		9

Δεν απαιτούνται ιδιαίτερες εργασίες για την επίτευξη της απαραίτητης πρόσφυσης μεταξύ των δύο στρώσεων αλλά όπου η υψηλή θερμοκρασία, ο αέρας και η μειωμένη υγρασία ενδέχεται να ξηράνουν την επιφάνεια της κάτω στρώσης, θα πρέπει να υπάρχει φροντίδα ώστε αυτή να διατηρείται υγρή.

Πρέπει να τονισθεί ότι, με βάση την έως σήμερα εμπειρία, ο μόνος εξοπλισμός διάστρώσης που είναι κατάλληλος για την κατασκευή ενός ικανοποιητικής επιφανειακής ποιότητας οδοστρώματος από Κ.Σ., είναι ένας διαστρωτήρας ασφαλτομίγματος. Ισοπεδωτές, προωθητές ή άλλοι τύποι μηχανημάτων διάστρώσης προκαλούν σχίσσιμο της επιφάνειας και ως εκ τούτου δεν συνιστώνται. Παρ' όλα αυτά ισοπεδωτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη διάστρωση της υπόβασης. Επίσης όταν το πάχος του οδοστρώματος υπερβαίνει τα 25cm συμπυκνωμένου υλικού, το οποίο σημαίνει ότι το πάχος της στρώσης μη συμπυκνωμένου υλικού βρίσκεται έξω από τις δυνατότητες ενός συνηθισμένου διαστρωτήρα, ένας ισοπεδωτής που κινείται μαζί με τον διαστρωτήρα μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να διαστρώσει τα επιπλέον εκατοστά του πάχους στην κατώτερη στρώση [11].

Ισοπεδωτές έχουν ακόμη χρησιμοποιηθεί για την διάστρωση του Κ.Σ. σε δρόμους χαμηλής κυκλοφορίας όπου η τελική επιφάνεια θα δεχθεί μιά κατεργασία με ελικόπτερο (power trowel) ή θα υπάρξει μια λεπτή ασφατική επικάλυψη, ή σε δρόμους με μικρές απαιτήσεις ομαλότητας όπως οι αγροτικοί. Πολλές φορές αποτελούν τον καταλληλότερο εξοπλισμό για ακανόνιστες εργασίες, όπως αυτές που συναντώνται σε αστικούς δρόμους.

Σε κατασκευές όπου είναι επιθυμητό να διαστρώνεται ολόκληρο το πλάτος του οδοστρώματος σε μια φάση, μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο ή και περισσότεροι διαστρωτήρες κινούμενοι κλιμακωτά, μειώνοντας ενδεχομένως και τον αριθμό των ψυχρών αρμών (ραφών) κατά

το ήμισυ ή και περισσότερο. Όμως είτε λόγω των χαρακτηριστικών του υπάρχοντος εξοπλισμού, είτε για λόγους προόδου των εργασιών όπου είναι απαραίτητο να διατηρείται το μισό οδόστρωμα ανοικτό για τη διέλευση της κατασκευαστικής κυκλοφορίας, είτε ακόμη λόγω της φύσης του έργου όπως π.χ. ένας χώρος στάθμευσης οχημάτων, είναι ορισμένες φορές αναγκαία η διάστρωση σε λωρίδες. Προκειμένου να αποφευχθεί η δημιουργία ενός διαμήκους ψυχρού αρμού (ραφής), ένα πλάτος 40 έως 50cm της πρώτης λωρίδας αφήνεται ασυμπύκνωτο και αυτό χρησιμεύει σαν πλευρική στήριξη για αυτή τη λωρίδα. Αυτή η κεντρική λωρίδα συμπυκνώνεται εν συνεχεία μαζί με τη δεύτερη λωρίδα του οδοστρώματος. Σε κάθε περίπτωση και όπως οι προδιαγραφές ορίζουν, οι παρακείμενες λωρίδες θα πρέπει να διαστρώνονται εντός της περιόδου εργασιμότητας της πρώτης λωρίδας προκειμένου να αποφευχθεί ο σχηματισμός ενός ψυχρού αρμού. Αν δεν χρησιμοποιούνται επιβραδυντικά πρόσθετα, η διάστρωση δύο παράλληλων λωρίδων δεν επιτρέπεται αφού περάσει περισσότερο από μία ώρα από τη διάστρωση της πρώτης λωρίδας.

Η συμπύκνωση του νωπού διαστρωμένου μίγματος του Κ.Σ. θα πρέπει να πραγματοποιείται αμέσως μετά τη διαδικασία διάστρωσης χωρίς καθυστέρηση.

Το Κ.Σ. συμπυκνώνεται συνήθως με ένα βαρύ δονητικό συμπυκνωτή σε πολλές περιπτώσεις σε συνδυασμό με ένα ελαστικοφόρο συμπυκνωτή. Για τον δονητικό συμπυκνωτή συνιστάται το στατικό βάρος ανά εκατοστό του μέτρου του πλάτους του κινητήριου κυλίνδρου να μην είναι μικρότερο από 30KP. Για τον ελαστικοφόρο συμπυκνωτή το φορτίο ανά τροχό θα πρέπει να υπερβαίνει τους 3ton και η πίεση επαφής να μην είναι μικρότερη από 0,8MPa. Μία συνηθισμένη διαδικασία κυλίνδρωσης αποτελείται από δύο στατικές διελεύσεις (μιά κίνηση εμπρός και επιστροφή) στο νωπό υλικό ώστε να στερεοποιηθεί,

που ακολουθείται από αρκετές δονητικές διελεύσεις, συνήθως τέσσερεις ή περισσότερες, έως ότου επιτευχθεί η επιθυμητή πυκνότητα. Η διαδικασία συμπύκνωσης ολοκληρώνεται με επαρκή αριθμό διελεύσεων του ελαστικοφόρου συμπυκνωτή ώστε να κλείσουν τα επιφανειακά κενά και οι σχισμές. Αυτή η διαδικασία κυλίνδρωσης επιδέχεται ορισμένες τροποποιήσεις. Όταν δεν είναι διαθέσιμοι ελαστικοφόροι συμπυκνωτές, μπορούν να γίνουν αρκετές τελικές στατικές διελεύσεις του οδοστρωτήρα προκειμένου να σφραγισθεί η επιφάνεια. Καλά αποτελέσματα έχουν επίσης επιτευχθεί με ένα συμπυκνωτή μικτού τύπου (λείος κύλινδρος στον εμπρόσθιο άξονα και ελαστικά πίσω). Οι διαδοχικές διελεύσεις του συμπυκνωτή δεν θα πρέπει να εκκινούν από την ίδια θέση ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία καταβυθίσεων στο οδόστρωμα. Στο τέλος κάθε λωρίδας, δημιουργείται μία ράμπα που επιτρέπει την απομάκρυνση του εξοπλισμού.

Η παρατήρηση της συμπεριφοράς του νωπού σκυροδέματος κατά τις στατικές διελεύσεις του συμπυκνωτή προσφέρει μια καλή ένδειξη για την συνοχή του μίγματος. Ένα μίγμα με την κατάλληλη συνοχή θα υποχωρήσει μ'έναν ομοιόμορφο τρόπο. Αν είναι περισσότερο υγρό απ'όσο πρέπει η επιφάνειά του θα εμφανιστεί γυαλιστερή και υδαρή, και το Κ.Σ. θα δείξει μιά ελαστική συμπεριφορά κάτω από τον συμπυκνωτή και ακόμη και κάτω από το πόδι. Αντίθετα, αν είναι περισσότερο ξηρό απ'όσο πρέπει, η επιφάνειά του θα εμφανιστεί σκονισμένη και κοκκώδης (ανοιχτή) και ενδέχεται ακόμη και να παρουσιάσει σχισμές.

Όπως έχει αναφερθεί ήδη, είναι σημαντικό να υπάρχει συνέχεια κατά τη διαδικασία της διάστρωσης. Οι συμπυκνωτές, ειδικά όταν δονούνται, δεν θα πρέπει να σταματούν για όσο χρόνο βρίσκονται πάνω στο νωπό υλικό διότι αυτό δημιουργεί κυματισμούς στην τελική επιφάνεια.

Καθώς η μηχανική αντοχή του Κ.Σ. εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την πυκνότητά του, είναι πολύ σημαντικό η συμπύκνωση να είναι επαρκής. Συνήθως προδιαγράφεται μια ελάχιστη απαιτούμενη πυκνότητα. Οι ισπανικές προδιαγραφές ορίζουν μια μέση πυκνότητα όχι μικρότερη από 97% της μέγιστης τιμής κατά τροποποιημένη δοκιμή Proctor, ενώ στον πυθμένα της στρώσης αυτή η πυκνότητα απαιτείται να υπερβαίνει το 95%. Υπάρχει μιά γενική τάση ελέγχου της διαδικασίας συμπύκνωσης με τη βοήθεια πυρηνικών μετρητών.

Σε πολλές χώρες είναι υποχρεωτικό η διαδικασία της συμπύκνωσης να ολοκληρώνεται μέσα σε 60' ή 90' από την στιγμή της μίξης των συστατικών. Όμως οι χρόνοι αυτοί μπορούν να αυξηθούν εάν υπάρχουν ποζολανικά υλικά στο μίγμα ή χρησιμοποιούνται επιβραδυντικά πρόσθετα. Έχει ήδη αναφερθεί ότι εργασιμότητα μερικών ωρών ορίζεται σε Γαλλικές και Ισπανικές προδιαγραφές.

Το πάχος της στρώσης θα πρέπει επίσης να ελέγχεται κατά τη διάστρωση. Όταν χαμηλά σημεία ή μειωμένα τοπικά πάχη έχουν διορθωθεί με επιπλέον υλικό συχνά αυτό αποφλοιώνεται. Για το λόγο αυτό στη Γαλλία συνιστάται η διάστρωση μερικών επιπλέον εκατοστών σκυροδέματος το οποίο απομακρύνεται από τον ισοπεδωτή αφού το υλικό υποστεί μιά αρχική συμπύκνωση. Ακολουθεί η συμπύκνωση έως την απαιτούμενη πυκνότητα. Αυτή η κατεργασία της επιφάνειας συμβάλει επίσης στην καλύτερη επιπεδότητά της.

Από την εμπειρία που αποκτήθηκε στις ΗΠΑ και τον Καναδά όπου έχουν διαστρωθεί πολλές επιφάνειες από Κ.Σ. σε περισσότερες λωρίδες, έχουν τυποποιηθεί ορισμένες διαδικασίες κυλίνδρωσης προκειμένου να αποφεύγεται η δημιουργία ψυχρών αρμών. Συνήθως μια στενή ζώνη 30 έως 50cm της πρώτης λωρίδας αφήνεται ασυμπύκνωτη και χρησιμεύει ως πλευρική στήριξη που εμποδίζει το υπόλοιπο υλικό από του να εκτοπισθεί πλευρικά. Αφού το σκυρόδεμα της επόμενης λωρίδας έχει διαστρωθεί, ο αρμός συμπυκνώνεται

με τη διέλευση του κέντρου του κυλίνδρου του συμπυκνωτή από επάνω του κυλινδρώνοντας συγχρόνως τα δύο άκρα των παρακείμενων λωρίδων.

Η συμπύκνωση των πλευρικών άκρων είναι μια λεπτή εργασία. Προκειμένου να προκύψουν καλά αποτελέσματα είναι απαραίτητο να προβλεφθεί σταθερή πλευρική συγκράτηση π.χ. κράσπεδα στους αστικούς δρόμους. Αν κάτι τέτοιο δεν υπάρχει το αποτέλεσμα θα είναι απώλεια πυκνότητας και κατά συνέπεια αντοχής. Αν προβλέπονται ερείσματα συνιστάται αυτά να συμπυκνώνονται συγχρόνως με τη στρώση του Κ.Σ. Σ' αυτή την περίπτωση η κυλίνδρωση περιλαμβάνει μια πρώτη στατική διέλευση του συμπυκνωτή επάνω από τον αρμό, κατά τρόπο ώστε τα $\frac{2}{3}$ του πλάτους του κυλίνδρου του να βρίσκονται στο οδόστρωμα και το υπόλοιπο στο έρεισμα.

Η ξήρανση του σκυροδέματος κατά την συμπύκνωση πρέπει να αποφεύγεται. Αυτή η προφύλαξη είναι σημαντική όταν η διάστρωση γίνεται σε περισσότερες λωρίδες όπου όπως αναφέρθηκε μια στενή πλευρική ζώνη σε κάθε λωρίδα μένει ασυμπύκνωτη έως ότου διαστρώνεται η επόμενη λωρίδα. Όταν ο καιρός είναι ζεστός, μπορεί να απαιτείται συχνός ψεκασμός της επιφάνειας προκειμένου αυτή να διατηρηθεί υγρή έως ότου αρχίσει η συντήρηση. Ο εξοπλισμός που χρησιμοποιείται με αυτό το σκοπό θα πρέπει να δημιουργεί μια ομίχλη ώστε να αποφεύγεται το λίκνισμα του νερού ή η ροή στην επιφάνεια του Κ.Σ.

Αρμοί

Τα περισσότερα από τα οδοστρώματα από Κ.Σ. που κατασκευάστηκαν αρχικά, είχαν αφαιρεθεί χωρίς αρμούς, να ρηγματωθούν μόνα τους. Οι ρωγμές που προέκυψαν είχαν συνήθως μεγαλύτερο πλάτος από αυτό που θα επέτρεπε μια αποτελεσματική μεταφορά φορτίου. Για το λόγο αυτό υπάρχει τώρα μία τάση για τη χρησιμοποίηση αρμών.

Οι αποστάσεις τους κυμαίνονται συνήθως μεταξύ 5 και 8m προκειμένου να προκύψουν ανοίγματα αρμών μικρότερα από 1mm. Μετρήσεις που έγιναν σε δοκιμαστικά τμήματα στην Ιαπωνία έδειξαν ότι η μεταφορά φορτίου στον αρμό εξαρτάται από το άνοιγμα του αρμού ή της ρωγμής, το πάχος της στρώσης και τηνφέρουσα ικανότητα της υπόβασης. Η μεταφορά φορτίου είναι αυξημένη όταν το Κ.Σ. κείται σε μιά υπόβαση από κατεργασμένο με τσιμέντο υλικό. Έχει παρατηρηθεί επίσης σημαντική τριβή μεταξύ Κ.Σ. και υπόβασης που οφείλεται στην διαδικασία συμπίκνωσης. Για το λόγο αυτό οι διακυμάνσεις στο άνοιγμα των αρμών είναι συνήθως μικρότερες από αυτές που εμφανίζονται σε οδοστρώματα από δονημένο σκυρόδεμα με παρόμοιες αποστάσεις αρμών.

Οι εγκάρσιοι αρμοί συστολής συνήθως κόβονται με κάποια καθυστέρηση που εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τις κλιματολογικές συνθήκες: από λίγες ώρες έως μερικές ημέρες. Το κόψιμο των αρμών γίνεται κανονικά αφού το σκυρόδεμα έχει ενυδατωθεί επαρκώς ώστε να αποφευχθεί η δημιουργία ενός ακανόνιστου αρμού κατά την κοπή όπου μικρά τμήματα του υλικού θα αποκοπούν και τοπικά θα δημιουργηθούν μικρές σχισμές. Επειδή η περιεκτικότητα σε νερό του Κ.Σ. είναι οριακή για την ενυδάτωση, οι εξωτερικές κλιματολογικές συνθήκες όπως υψηλή θερμοκρασία, χαμηλή υγρασία και αέρας μπορούν να μειώσουν την ήδη μικρή περιεκτικότητα σε υγρασία οδηγώντας έτσι σε καθυστέρηση της ενυδάτωσης στην επιφάνεια η οποία επιβραδύνει την ανάπτυξη επαρκούς αντοχής ώστε να μπορέσει να κοπεί ο αρμός. Η επιβράδυνση αυτή μπορεί να οδηγήσει σε ανεξέλεγκτη ρηγμάτωση γεγονός που συνηγορεί υπέρ της άποψης κοπής αρμών. Επιπλέον υγρασία ενδέχεται να καθεί στην περιοχή των ρωγμών, εκτός αυτής που απαιτείται για την ενυδάτωση, με κατάληξη κακής ποιότητας σκυρόδεμα στην περιοχή γύρω από την ρωγμή.

Η κοπή αρμών σε νωπό υλικό έχει αρχίσει να διαδίδεται στη Γαλλία και στην Ισπανία. Διατίθενται διάφορα μηχανήματα για το σκοπό αυτό όπως δονητικές πλάκες (vibratory plates) ή μικροί κύλινδροι εφοδιασμένοι με κοπτήρα. Μιά ενδιαφέρουσα καινοτομία εδώ αποτελεί ένα γαλλικό μηχανήμα που κόβει το συνολικό πάχος του ασυμπύκνωτου υλικού. Την ίδια στιγμή μία φλέβα ασφατικού γαλακτώματος χύνεται μεταξύ των δύο λεπίδων που σχηματίζουν τον κοπτήρα του μηχανήματος. Το γαλάκτωμα εμποδίζει τα άκρα του αρμού από του να επανασυγκολληθούν. Το μειωμένο κόστος κατασκευής αυτών των αρμών επιτρέπει την κατασκευή τους σε κοντινές αποστάσεις.

Σ'ότι αφορά τους ψυχρούς αρμούς εργασίας, είτε διαμήκεις είτε εγκάρσιους, είναι σημαντικό οι επιφάνειές τους να είναι κατακόρυφες. Αλλιώς υπάρχει ο κίνδυνος τα άκρα των παρακείμενων πλακών να ανυψωθούν και να θραυστούν σε περίπτωση υψηλών θερμοκρασιών. Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι ώστε να εξασφαλίζεται η απαιτούμενη κατακόρυφη επιφάνεια. Διαμήκεις και εγκάρσιοι ψυχροί αρμοί εργασίας μπορούν να διαμορφωθούν είτε απομακρύνοντας το νωπό σκυρόδεμα από τις ράμπες εξόδου του εξοπλισμού συμπίκνωσης ή από το εξωτερικό ασυμπύκνωτο άκρο με ένα ισοπεδωτή, ή με κοπή του σκληρυμένου υλικού έως το μισό πάχος της στρώσης. Το υπόλοιπο πάχος αποκόπτεται με το χέρι ώστε να δημιουργηθεί μια ενιαία κατακόρυφη επιφάνεια (απόκλιση: έως 15° από την κατακόρυφο). Μια άλλη δυνατότητα για τους εγκάρσιους αρμούς είναι να απομακρυνθεί μια στενή λωρίδα (περίπου 30cm) νωπού υλικού κοντά στην ράμπα εξόδου προτού ολοκληρωθεί η συμπίκνωση, να πληρωθεί με κοκκώδες υλικό και να συμπληρωθεί η συμπίκνωση. Την επόμενη εργάσιμη ημέρα το χαλαρό υλικό μαζί με τη ράμπα απομακρύνονται πριν να επαναληφθεί η διάστρωση.

Όταν το Κ.Σ. διαστρώνεται σε μεγάλες εκτάσεις, η διεύθυνση

διάστρωσης θα πρέπει να είναι παράλληλη με την μικρότερη διάσταση ώστε οι αρμοί που δημιουργούνται κατά τη διακοπή της εργασίας να έχουν μικρότερο μήκος.

Σε κατασκευές που γίνονται σε δύο στρώσεις, οι ψυχροί αρμοί εγκάρσιοι ή διαμήκεις θα πρέπει να ευθυγραμμίζονται προσεκτικά στις δύο στρώσεις ώστε να δημιουργείται μιά ομοιόμορφη κατακόρυφη επίπεδη επιφάνεια καθ'όλο το πάχος της στρώσης και καθ'όλο το μήκος του αρμού. Εάν η επιφάνεια της άνω στρώσης δεν έρχεται πρόσωπο με την επιφάνεια της κάτω στρώσης τότε η κάτω στρώση θα πρέπει να κοπεί κατάλληλα ώστε να δημιουργεί η επιθυμητή επιφάνεια .

Στις περισσότερες χώρες οι αρμοί στα οδοστρώματα από Κ.Σ. δεν σφραγίζονται. Παρ'όλα αυτά η σφράγιση των αρμών γίνεται επί του παρόντος στην Αυστραλία, Γερμανία και ΗΠΑ, όπου είναι υποχρεωτική στις εργασίες που αναλαμβάνουντα Corps of Engineers.

Τα προϊόντα και οι διαδικασίες σφράγισης βρίσκονται σε συμφωνία με τις προδιαγραφές που εφαρμόζονται στα οδοστρώματα από δονημένο σκυρόδεμα.

Συντήρηση

Το Κ.Σ. απαιτεί συντήρηση παρόμοια με αυτή που εφαρμόζεται στο συμβατικό σκυρόδεμα. Επειδή η περιεκτικότητα σε νερό του μίγματος βασίζεται στη βέλτιστη υγρασία που χρειάζεται ώστε να προκύψει η μέγιστη πυκνότητα, και όχι στο λόγο νερό/τσιμέντο, δεν υπάρχει πρακτικά περίσσεια νερού που θα μπορούσε να χρησιμεύσει σαν απόθεμα για τη συντήρηση. Για το λόγο αυτό το νερό από μια εξωτερική πηγή είναι σημαντικό για την ανάπτυξη σημαντικό για την ανάπτυξη της αντοχής του οδοστρώματος τις πρώτες ημέρες μετά τη διάστρωση.

Η επιφάνεια του οδοστρώματος θα πρέπει να διατηρείται συνεχώς

υγρή μετά το τέλος της κυλίνδρωσης το λιγότερο για 24 ώρες με τη βοήθεια ενός βυτιοφόρου που θα ψεκάζει την επιφάνεια, ή ενός αρδευτικού συστήματος που θα δημιουργεί μια ομίχλη, ή διαβρεγμένων λινατσών ή ψάθινων καλυμάτων. Στην περίπτωση της χρήσης λινατσών ή ψάθινων καλυμάτων, αυτά θα πρέπει να έχουν διαβραχεί πλήρως, να τοποθετούνται στο οδόστρωμα από Κ.Σ. κατά τρόπο ώστε να καλύπτεται ολόκληρη η επιφάνεια και τα άκρα του και να διατηρούνται συνεχώς υγρά. Μετά από αυτή την αρχική περίοδο συντήρησης το οδόστρωμα θα πρέπει να συντηρηθεί μέχρι την ηλικία των 7 ημερών τουλάχιστον με μία από τις ακόλουθες μεθόδους. Συντήρηση με ψεκασμό με νερό, κάλυψη με λινάτσες ή ψάθινα καλύματα, ή συντήρηση με τη χρήση υλικού που σχηματίζει μεμβράνη. Το υλικό αυτό μπορεί να είναι ανάμιγμα που σχηματίζει μια μεμβράνη λευκού χρώματος ή ένα ασφαλικό γαλάκτωμα. Το ανάμιγμα ή το γαλάκτωμα θα πρέπει να σχηματίζει μια συνεχή ελεύθερη από κενά μεμβράνη, και θα πρέπει να διατηρείται σ' αυτή την κατάσταση καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου συντήρησης. Ένα αρδευτικό σύστημα έχει χρησιμοποιηθεί για την συντήρηση οδοστρωμάτων από Κ.Σ. στον Καναδά και στο Fort Lewis, αλλά χρειάζεται προσοχή ώστε το λεπτόκοκκο υλικό στην επιφάνεια να μην αποπλυθεί λόγω υπερβολικού ψεκασμού. Μια συντήρηση με υγρή άμμο, που χρησιμοποιήθηκε στο Fort Steward λόγω έλλειψης ειδικού αναμίγματος συντήρησης, εφοδιάζει την επιφάνεια με το απαραίτητο νερό για την ενυδάτωση.

Εάν ενδιαφέρει η αντοχή σε παγετό, η συντήρηση με συνεχή διαβροχή θα πρέπει να ληφθεί ιδιαίτερα υπόψη. Τα αποτελέσματα εργαστηριακών δοκιμών παγετού και απόψυξης που έγιναν στο WES και στο North Pacific Division Laboratory δείχνουν ότι τα οδοστρώματα από Κ.Σ. με έναν αρκετά χαμηλό λόγο νερού/τσιμέντο τα οποία έχουν συντηρηθεί με συνεχή διαβροχή για μία εκτεταμένη

περίοδο έχουν βελτιωμένη αντοχή σε παγετό.

Η κυκλοφορία οχημάτων στο οδόστρωμα θα πρέπει να αποκλείεται κατά τις πρώτες 14 ημέρες. Αν είναι απολύτως αναγκαίο ένα βυτιοφόρο για τον ψεκασμό της επιφάνειας με νερό ή με το ειδικό ανάμιγμα μπορεί να κυκλοφορεί στην επιφάνεια πριν περάσει αυτό το χρονικό διάστημα αλλά αυτή η διαδικασία θα πρέπει να περιορίζεται στο ελάχιστο.

Οι ισπανικές προδιαγραφές ορίζουν ότι τα οδοστρώματα από Κ. Σ., εκτός από αυτά των δευτερευόντων οδών, πρέπει να προστατεύονται με μιά στρώση συντήρησης ενός ασφαλτικού γαλακτώματος, μετά από την αρχική συντήρηση με διαβροχή. Όταν ακολουθείται αυτή η διαδικασία το γαλάκτωμα πρέπει να είναι ανιονικό, με ένα pH όχι μικρότερο από 5 και πρέπει να διαστρώνεται κατά τρόπο ώστε το ασφαλικό υπόλοιπο να μην είναι λιγότερο από 600 g/m^2 . Η χρήση προϊόντων με βάση πολυμερή επιτρέπεται επίσης, και εκτός του ότι συγκρατούν την υγρασία, αντιδρούν με το τσιμέντο που βρίσκεται στις στρώσεις κοντά στην επιφάνεια δημιουργώντας μια σκληρότερη και ανθεκτικότερη επιφάνεια. Η ελάχιστη αναλογία αυτών των προϊόντων ορίζεται σε 400 g/m^2 . Αυτή η τελευταία μέθοδος προτιμάται από τα γαλακτώματα σε περιπτώσεις όπου ενδιαφέρει η τελική ποιότητα του επιφανειακού σκυροδέματος· έχει όμως το μειονέκτημα ότι δεν επιτρέπει την διάνοιξη αμέσως στην κυκλοφορία του τελειωμένου τμήματος. Για το λόγο αυτό προϊόντα αυτού του είδους έχουν χρησιμοποιηθεί σπάνια.

Στο πειραματικό τμήμα στο Alcaniz, Ισπανία, η συντήρηση έγινε με ένα γαλάκτωμα τύπου ECR2 (κατιονικό, ταχείας συντήρησης) (σύμφωνα με τις προδιαγραφές PG3 για εργασίες σε Οδούς και Γέφυρες) με αναλογία 0.81 l/m^2 . Προκειμένου η κυκλοφορία να μην αποκολλήσει το γαλάκτωμα, αυτό καλύφθηκε με υγρή πλυμένη άμμο με αναλογία 71 l/m^2 . Προτού το οδόστρωμα παραδοθεί στην κυκλοφορία,

ένας συμπυκνωτής πέρασε χωρίς δόνηση πάνω από την άμμο και το γαλάκτωμα συντήρησης.

Επιφανειακή υφή και ομαλότητα

Σε οδοστρώματα με χαμηλή κυκλοφορία δεν έχει εφαρμοστεί ιδιαίτερη κατεργασία της επιφάνειας του Κ.Σ.. Καλά χαρακτηριστικά τριβής έχουν επιτευχθεί σε εργασίες στις Σκανδιναυικές χώρες όπου έχουν χρησιμοποιηθεί δονητικοί συμπυκνωτές με τύμπανα καλυμένα με ελαστικό. Πρέπει να τονισθεί ότι στην Ισπανία καθώς και σε μερικές εφαρμογές στην Ιαπωνία, έχουν χρησιμοποιηθεί ελικοπτερα (mechanical trowels) προκειμένου να βελτιωθούν τα χαρακτηριστικά τριβής του οδοστρώματος. Η υφή που προκύπτει δεν συνιστάται για ταχύτητες που υπερβαίνουν τα 40km/h αλλά είναι επαρκής για οδούς σε κατοικημένες περιοχές, χώρους στάθμευσης κλπ.

Στη Γαλλία προδιαγράφεται μια ασφατική επικάλυψη. Η λύση αυτή έχει επίσης χρησιμοποιηθεί σε εφαρμογές στην Αυστραλία και στην Ισπανία. Στην τελευταία μια επικάλυψη από ασφατικό σκυροδεμα, πάχους αρκετών εκατοστών (π.χ. 8), χρησιμοποιείται σε δρόμους ταχείας κυκλοφορίας και αυτοκινητόδρομους ώστε να προκύψει μια επαρκής επιφανειακή ομαλότητα. Σε δρόμους με μέτρια κυκλοφορία το πάχος μειώνεται σε 4 έως 6 cm. Η πρακτική αυτή έχει επίσης υιοθετηθεί σε μερικούς αυτοκινητόδρομους στην Γερμανία, στην Αργεντινή και στην Αυστραλία. Όταν εφαρμόζεται μιά τέτοια επιφανειακή στρώση συνιστάται αυτό να γίνεται αφού περάσουν τουλάχιστον μερικές ημέρες ώστε το Κ.Σ. να αναπτύξει τη δυννητική του ρηγμάτωση. Οι ισπανικές προδιαγραφές ορίζουν ότι επτά ημέρες πρέπει να περάσουν προτού μιά τέτοια επικάλυψη διαστρωθεί, αλλά συνιστάται η επιμήκυνση αυτής της περιόδου σε ένα ή δύο μήνες ειδικά όταν ο καιρός είναι κρύος.

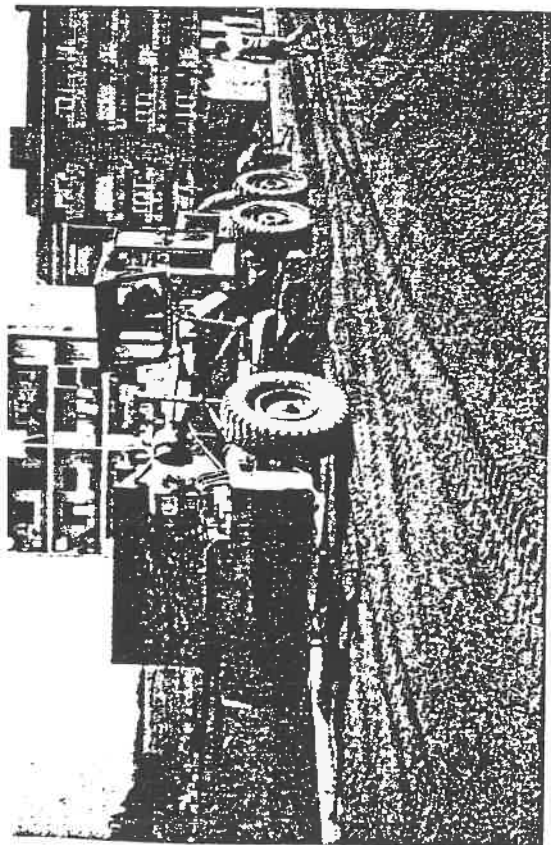
Συμπεράσματα

Από έργα που έχουν γίνει σε διάφορες χώρες όπως η Γερμανία, η Αυστραλία, η Ισπανία και οι ΗΠΑ, προκύπτει ότι μπορούν να επιτευχθούν εξοικονομήσεις μεταξύ 15 και 30% στο κόστος κατασκευής οδοστρωμάτων από Κ.Σ. εάν συγκριθούν με οδοστρώματα από συμβατικό σκυρόδεμα για παρόμοια κυκλοφορία. Αυτές οι εξοικονομήσεις οφείλονται στους παρακάτω λόγους. Χρησιμοποιείται κονία στην οποία ένα σημαντικό ποσοστό του τσιμέντου, που συνήθως αποτελεί το ακριβότερο συστατικό του Κ.Σ., αντικαθίσταται από ιπτάμενη τέφρα. Ο εξοπλισμός διάστρωσης, που μοιάζει με αυτόν που χρησιμοποιείται στην κατασκευή οδοστρωμάτων από ασφαλτικό σκυρόδεμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μία ποικιλία εργασιών. Επιπλέον έχει ικανότητα επίτευξης υψηλής παραγωγής. Ένα μικρό μόνο συνεργείο απαιτείται για την κατασκευή. Η συστολή ξήρανσης του Κ.Σ. είναι μειωμένη γεγονός που επιτρέπει την κοπή αρμών συστολής σε μεγαλύτερες μεταξύ τους αποστάσεις. Σημαντική είναι επίσης η δυνατότητα σύντομης απόδοσης του έργου στην κυκλοφορία. Στην Ισπανία και στη Γαλλία η διάνοιξη του έργου στην κυκλοφορία γίνεται αμέσως· στις ΗΠΑ, τον Καναδά και την Αυστραλία η κυκλοφορία επιτρέπεται συνήθως μετά από επτά ή δεκατέσσερις ημέρες. Ένα πλεονέκτημα του Κ.Σ. , που ενδιαφέρει στην κατασκευή χώρων στάθμευσης οχημάτων, αεροσκαφών κλπ., είναι η αντοχή του σε χημική δράση από ορυκτέλαια, καύσιμα και άλλους υδρογονάνθρακες.

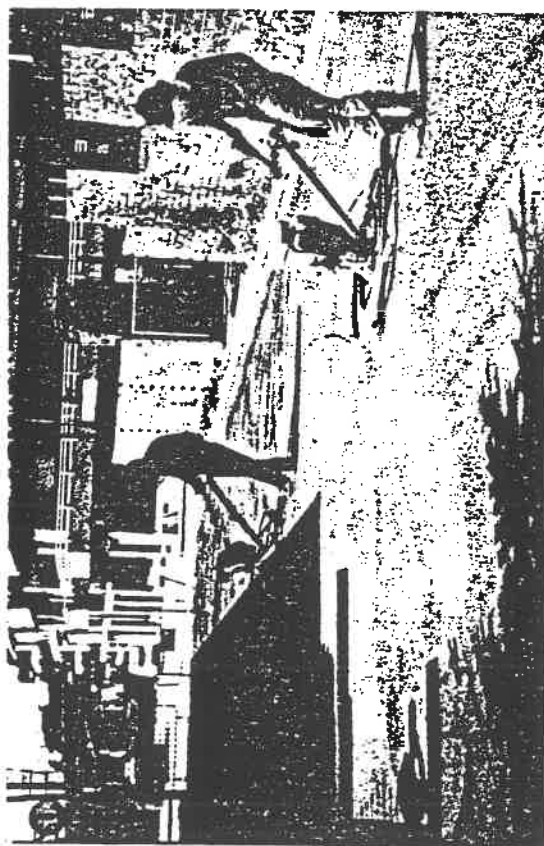
Το σημαντικότερο μειονέκτημα των οδοστρωμάτων από Κ.Σ. είναι η ομαλότητα της επιφάνειάς τους που αυτή τη στιγμή δεν ικανοποιεί τις απαιτήσεις για κυκλοφορία υψηλής ταχύτητας. Παρ'όλα αυτά έχει παρατηρηθεί σημαντική βελτίωση σε σχέση με τις πρώτες εργασίες, ιδίως όταν χρησιμοποιήθηκαν διαστρωτήρες που κάνουν μία υψηλή αρχική συμπύκνωση. Ακόμη κάποιο ξέφτισμα του επιφα-

νειακού υλικού ενδέχεται να εμφανιστεί κατά μήκος των ψυχρών αρμών ή τοπικά σε μερικές περιοχές σαν αποτέλεσμα ατελειών κατά την κατασκευή ή την συντήρηση. Είναι γι' αυτό σημαντικό να διεξάγονται επιστάμενοι έλεγχοι κυρίως κατά τη φάση της διάστρωσης και συμπύκνωσης και ειδικά σε σχέση με την περιεκτικότητα σε υγρασία και τον βαθμό συμπύκνωσης.

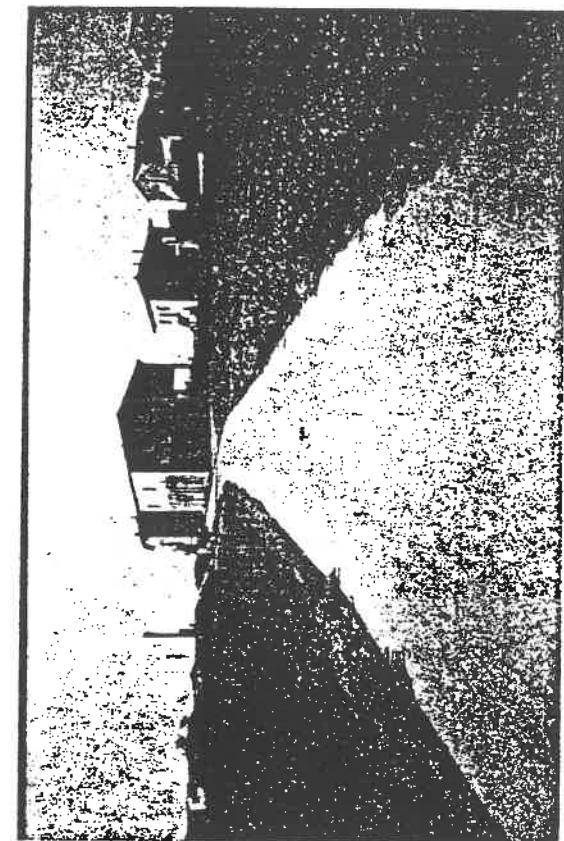
Αναμένεται ότι με την εξέλιξη του νέου εξοπλισμού διάστρωσης, τα λίγα προβλήματα που εμφανίζει η χρήση του Κ.Σ. θα επιλυθούν, γεγονός που θα οδηγήσει στην περαιτέρω διάδοσή του στην κατασκευή οδοστρωμάτων.



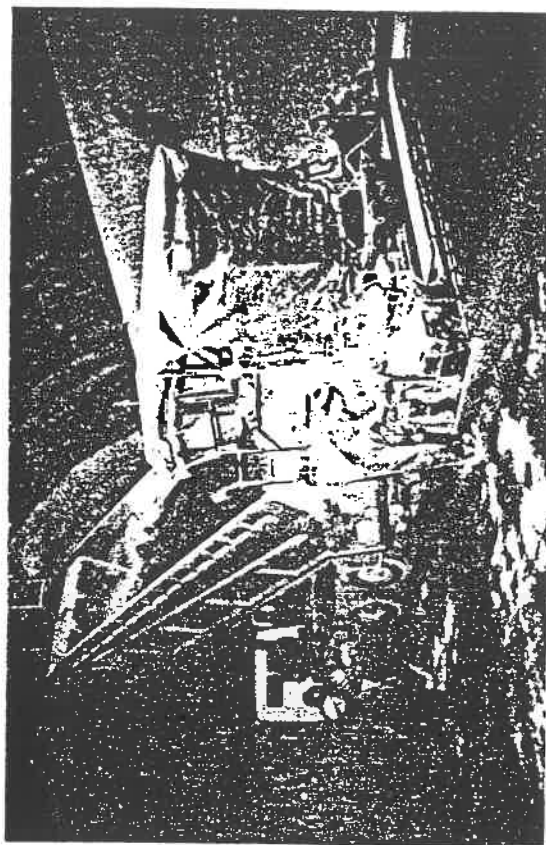
Φωτ.1. Κατασκευή δρόμων χαμηλής κυκλοφορίας
με Κ.Σ.: διάστρωση με ισοπεδωτή [2]



Φωτ. 2: Κατασκευή δρόμων χαμηλής κυκλοφορίας
με Κ.Σ.: κατεργασία επιφάνειας με ελικοπτερα [2]



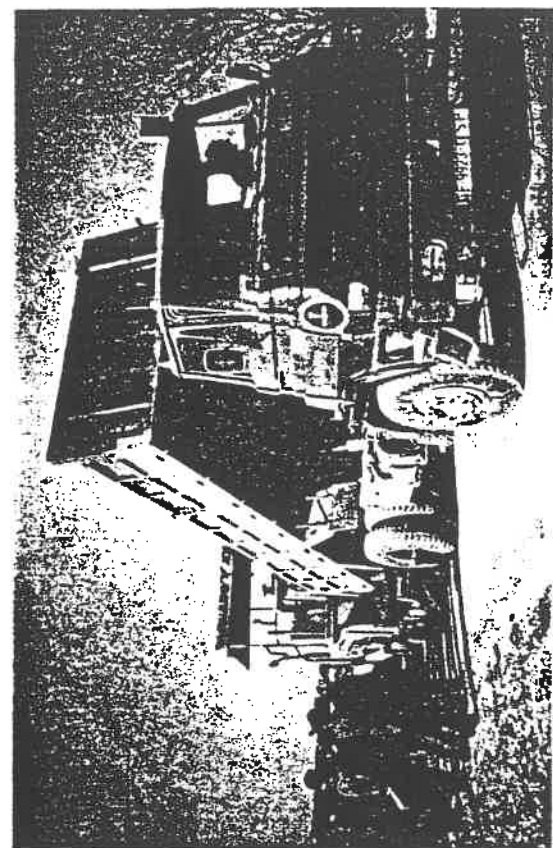
Φωτ. 3 Αγροτικός δρόμος κατασκευασμένος
με Κ.Σ. [2]



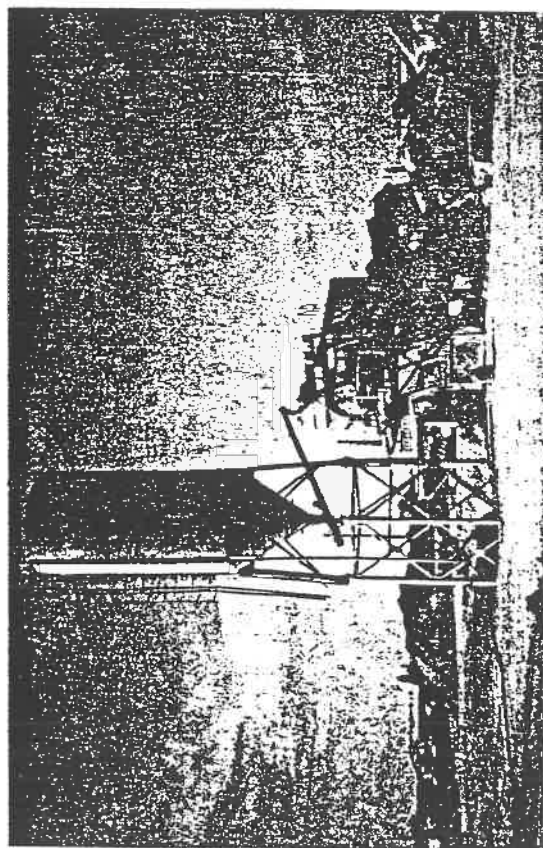
Φωτ.4: Κατασκευή του οδοστρώματος στο
Cadí Tunnel: διάστρωση με διαστρωτήρα [2]



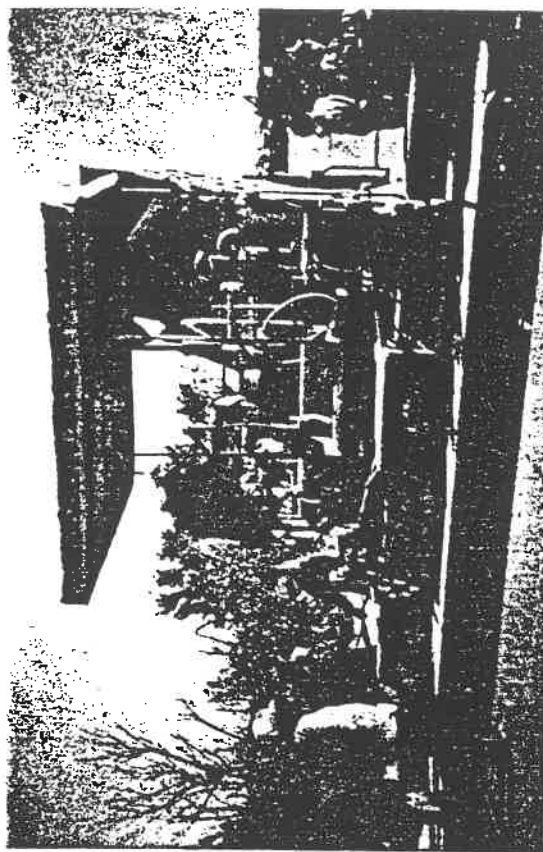
Φωτ. 5. Κατάσταση οδοστρώματος πριν από την επίστρωση (Alcaniz) [2]



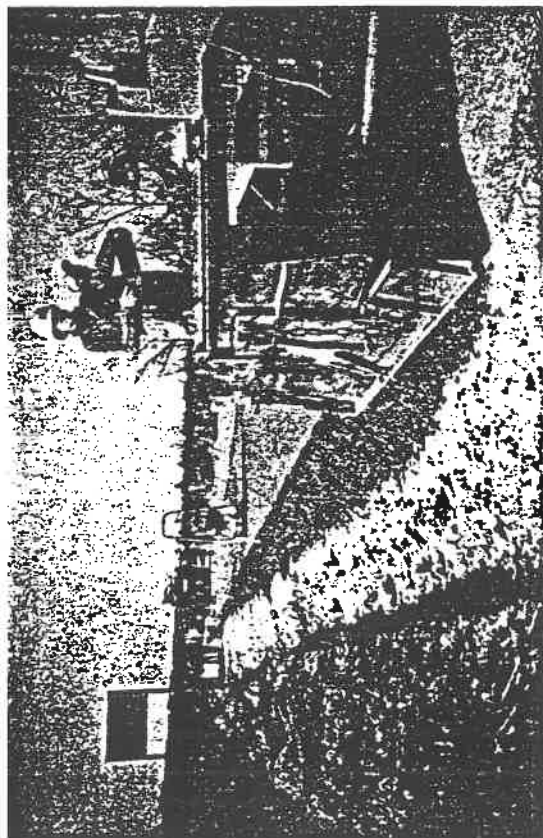
Φωτ. 7. Μεταφορά σκυροδέματος με ανατρεπόμενο φορτηγό (Alcaniz) [2]



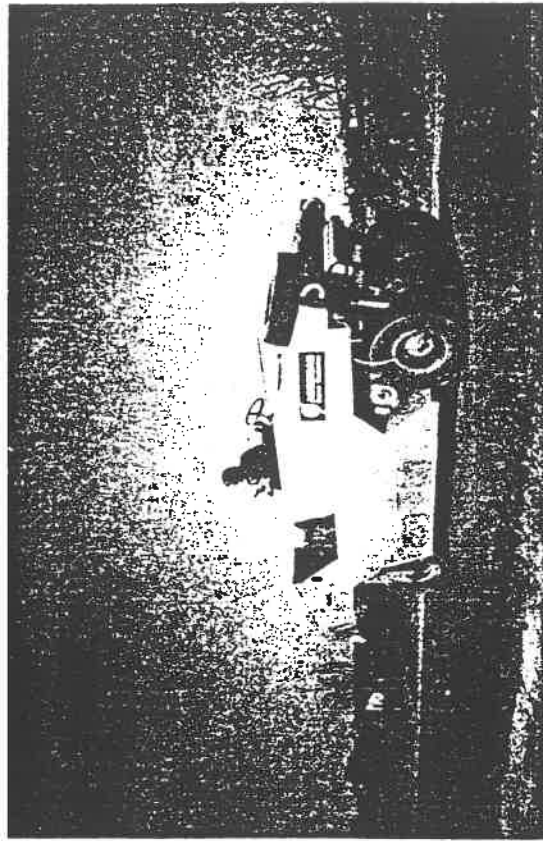
Φωτ. 6. Κεντρική εγκατάσταση ανάμιξης σκυροδέματος (Alcaniz) [2]



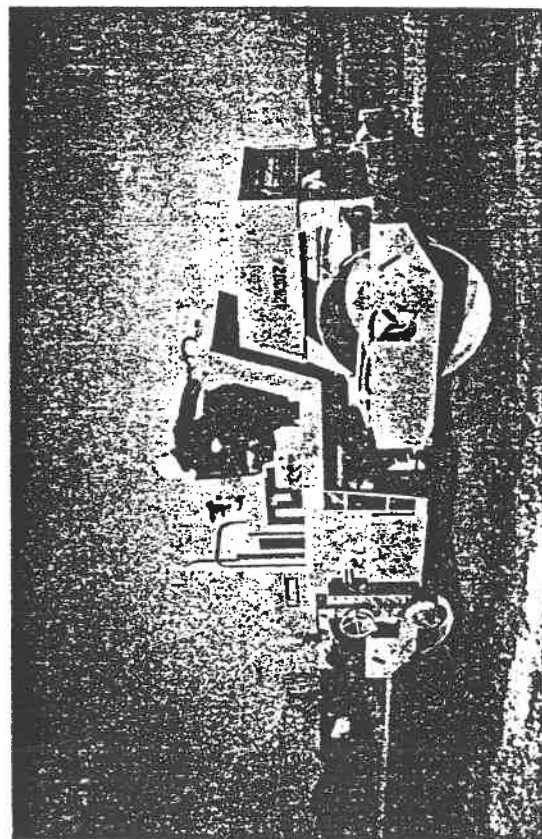
Φωτ. 8. Διάστρωση και αρχική συμπίκνωση του σκυροδέματος με διαστρωτήρα (Alcaniz) [2]



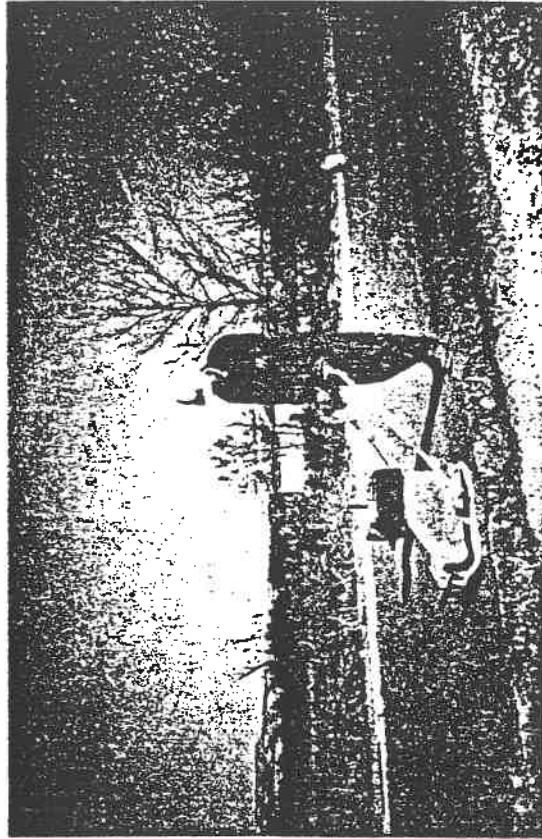
Φωτ. 9. Άποψη του άκρου του οδοστρώματος
πίσω από τον διαστρωτήρα (Alkaniz) [2]



Φωτ. 11. Συμπύκνωση με ελαστικοφόρο συμπυκνωτή
(Alkaniz) [2]



Φωτ. 10. Συμπύκνωση με συμπυκνωτή με
λείους κυλίνδρους (Alkaniz) [2]



Φωτ. 12. Συμπύκνωση των άκρων του οδοστρώματος
(Alkaniz) [2]

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Σκοπός της εργασίας

Το Κυλινδρούμενο Σκυρόδεμα αποτελεί για την Ελλάδα, ένα σχε-
τικώς νέο υλικό. Μόνο η μελέτη του φράγματος στο Πουρνάρι έχει
γίνει χρησιμοποιώντας σαν υλικό Κ.Σ. [20], ενώ στην οδοστρώση
Κ.Σ. δεν έχει χρησιμοποιηθεί ποτέ ως τώρα.

Από την έως τώρα εφαρμογή του στο εξωτερικό, το Κ.Σ. έχει φανεί
αξιοσημείωτα φθινό. Αυτό οφείλεται σε δύο σημαντικούς λόγους.
Αφενός μεν στο χαμηλό κόστος για διάστρωση, που βρίσκεται κοντά
σ' εκείνο μιάς σταθεροποιημένης βάσης σαν αποτέλεσμα της χρησιμο-
ποίησης του υπάρχοντος συνηθισμένου εξοπλισμού για ασφαλτικά οδο-
στρώματα. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στην Ελλάδα όπου υπάρχει
εξοπλισμός και εμπειρία σε σχέση με τα ασφαλτικά σκυροδέματα ενώ
η διάδοση των οδοστρώματων από συμβατικό δονημένο σκυρόδεμα είναι
πολύ μικρή. Αφετέρου στην αντικατάσταση ενός σημαντικού ποσοστού
τσιμέντου με ιπτάμενη τέφρα.

Προκειμένου λοιπόν να ερευνηθεί αυτό το νέο, χαμηλού κόστους
υλικό επιλέχθηκαν ως υλικά: Τσιμέντο Ο.Ρ.Σ. (Ι 35), αδρανές ασβε-
στολιθικό θραυστό λατομείου και ιπτάμενη τέφρα προέλευσης Α.Η.Σ.
Πτολεμαΐδας.

Σκοπός αυτής της εργασίας είναι η εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά
με την καταλληλότητα της ιπτάμενης τέφρας που υπάρχει στην Ελλάδα
σαν συνθετικό υλικό του Κ.Σ. Με κύριο κριτήριο το είδος της φόρτι-
σης στην οποία υποβάλλεται ένα οδόστρωμα από σκυρόδεμα επιλέχθηκαν
ορισμένες δοκιμές ώστε να εκτιμηθούν μερικές βασικές μηχανικές
του ιδιότητες .

Τα οδοστρώματα από σκυρόδεμα επιπονούνται σε κάμψη τόσο από
τα φορτία της κυκλοφορίας όσο και από την διαφορά θερμοκρασίας
καθ' ύψος της διατομής. Επομένως η αντοχή σε κάμψη είναι το μηχανικό
χαρακτηριστικό που ενδιαφέρει περισσότερο. Επειδή όμως η δοκιμή

σε κάμψη παρουσιάζει ορισμένες πρακτικές δυσκολίες προκειμένου να εκτελεστεί (μεγάλο μέγεθος δοκιμίων που δύσκολα παρασκευάζονται, συντηρούνται και μεταφέρονται, ειδικές διατάξεις φόρτισης και ειδική μικρή κλίμακα φορτίου) συνήθως τόσο στη μελέτη σύνθεσης όσο και στον ποιοτικό έλεγχο κατά την κατασκευή, προτιμούνται άλλες δοκιμές όπως η δοκιμή σε θλίψη και η δοκιμή σε διάρρηξη.

Η εύρεση της αντοχής σε κάμψη, της αντοχής σε θλίψη και της αντοχής σε διάρρηξη και η συσχέτιση των αντοχών αυτών, καθώς και η μελέτη της κατανομής της θερμότητας ενυδάτωσης στο χρόνο για το Κ.Σ. αποτελούν το αντικείμενο αυτής της εργασίας.

2.2 Υλικά

Τα υλικά που χρησιμοποιήθηκαν είναι:

α) Τσιμέντο

Χρησιμοποιήθηκε καθαρό τσιμέντο (Ordinary Portland Cement) Ι35

β) Αδρανή

Χρησιμοποιήθηκαν θραυστά υλικά από λατομείο. Μέγιστος κόκκος του αδρανούς ήταν 20mm και συγκεντρώθηκε μετά από κοσκίνισμα σε κόσκινο 3/4". Η αναλογία με την οποία αναμίχθηκε το αδρανές καθορίστηκε λαμβάνοντας υπόψη: ότι η κοκκομετρική διαβάθμιση του υλικού πρέπει να βρίσκεται μέσα σε μία ζώνη που καθορίζεται από προδιαγραφές [1].

Η διαβάθμιση αυτή, επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας 11 κλάσματα 3/4" - 1/2" 1/2" - 3/8", 3/8" - 1/4", 1/4" - Νο 4, Νο 4 - Νο 8, Νο 8 - Νο 16, Νο 16 - Νο 30, Νο 30 - Νο 50, Νο 50 - Νο 100, Νο 100 - Νο 200, Νο 200 - 0.

Η επιλογή της ζώνης αυτής έγινε με βάση την εμπειρία που έχουν οι Ισπανοί στην κατασκευή οδοστρωμάτων Κ.Σ. με χρήση της Ιπτάμενης Τέφρας.

Ύστερα από διάφορες δοκιμές που παρουσιάζονται στο παράρτημα

η τελική αναλογία που καθορίστηκε είναι:

Άμμος 60%

Χαλίμι 20%

Γαρμπίλι 20%

γ) Ιπτάμενη Τέφρα

Η προέλευσή της είναι από τον ΑΗΣ Πτολεμαΐδας παραγωγής 1ο Εξάμηνο 1990. Τα κύρια συστατικά της είναι τα εξής:

CaO: 34%

SiO₂: 30%

Fe₂O₃: 5%

Al₂O₃: 14%

SO₃: 7%

Άκαυστα: 3%

δ) Νερό

Χρησιμοποιήθηκε νερό δικτύου ύδρευσης.

2.3. Παρασκευή δοκιμίων

Εισαγωγή

Ο καθορισμός του είδους των μιγμάτων είχε σαν σκοπό:

1. Την εύρεση της αντοχής ενός σκυροδέματος με τυπικές αναλογίες αδρανών για μία περιεκτικότητα τσιμέντου.
2. Την μελέτη της μεταβολής των μηχανικών αντοχών του τυπικού αυτού μίγματος για διάφορα ποσοστά τέφρας που αντικαθιστά το τσιμέντο.
3. Την συσχέτιση των αντοχών: σε θλίψη, σε διάρρηξη και σε εφελκυσμό (κάμψη), για τα διάφορα αυτά μίγματα.

Για τον σκοπό αυτό επιλέχθηκε αρχική ποσότητα τσιμέντου 300Kgr/m³ (μίγμα Α). Η ποσότητα αυτή του τσιμέντου μειώθηκε διαδοχικά στα επόμενα μίγματα με αντικατάσταση της σε ίσους όγκους με τέφρα,

σε ποσοστό 25%, 50%, και 100%.

Έτσι παρασκευάσθηκαν τα μίγματα που φαίνονται στον παρακάτω πίνακα 1.

Πίνακας 1. Είδη αναμιγμάτων σκυροδέματος

ΜΙΓΜΑ	ΤΣΙΜΕΝΤΟ (%)	ΤΕΦΡΑ (%)
A	100	0
B	75	25
Γ	50	50
Δ	0	100

Από κάθε ανάμικμα κατασκευάσθηκαν τα εξής δοκίμια:

ΕΙΔΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ						
ΜΙΓΜΑ	Πρισματικό (10X10X50cm)			Κυλινδρικό (10/20cm)		
	Ημέρες θραύσης			Ημέρες θραύσης		
	7	28	60	7	28	60
A	2	2	2	3	3	3
B	2	2	2	3	3	3
C	2	2	2	3	3	3
D	2	2	2	3	3	3
ΣΥΝΟΛΟ	24 πρίσματα			36 κύλινδροι		

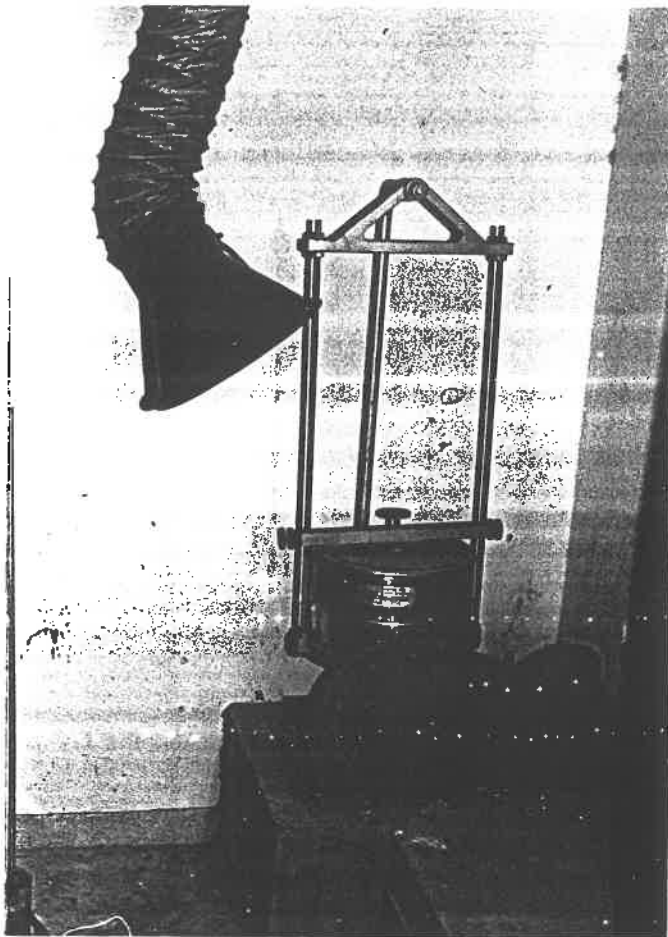
Προεργασία για την κατασκευή δοκιμίων

Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των δοκιμίων μεταφέρθηκαν μέσα σε μεγάλες λαμαρίνες από τον τόπο αποθήκευσής τους σε έναν φούρνο για την ξήρανσή τους. Η διαδικασία αυτή έγινε επειδή ο τόπος αποθήκευσης των αδρανών ήταν σε εξωτερικό περιβάλλον και είχαν υγρανθεί από τις βροχές που είχαν προηγηθεί.

Μετά την ξήρανση των αδρανών πραγματοποιήθηκε η κοκκομετρική τους ανάλυση. Η διαδικασία αυτή έγινε με την βοήθεια της συσκευής που φαίνεται στην Φωτογραφία 1 και ο χρόνος κοσκίνησης του κάθε υλικού στην μηχανή ήταν 5 λεπτά.

Κατόπιν ακολούθησε η προετοιμασία των μητρών που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των Δοκιμίων. Αφού λύθηκαν οι μήτρες λαδώθηκαν καλά για να μην κολλήσει το δοκίμιο στα τοιχώματά τους και ξαναβιδώθηκαν καλά για να μην ξεβιδωθούν κατά την διαδικασία της συμπίκνωσης.

Οι συνθέσεις πραγματοποιήθηκαν σε ένα αναψικτήρα που φαίνεται στην Φωτογραφία 2.



Φωτογραφία 1. Συσκευή κοκκομέτρησης



Φωτ. 2. Συσκευή ανάμιξης υλικών για την κατασκευή σκυροδέματος

Δοκιμαστικά αναμίγματα

Πριν από την παρασκευή των μιγμάτων της έρευνας παρασκευάσθηκαν τα ακόλουθα 5 δοκιμαστικά μίγματα:

(α) Δοκιμαστικό ανάμιγμα 1 (όγκου 20 lt)

Το μίγμα αυτό έγινε με σκοπό την εξοικείωση με την όλη διαδικασία της παρασκευής μιγμάτων σκυροδέματος και με τον τρόπο λειτουργίας των μηχανημάτων (π.χ. αναμικτήρας) που χρησιμοποιήθηκαν για την εργασία αυτή. Το μίγμα αυτό παρασκευάσθηκε με λόγο $\frac{\text{Νερό}}{\text{Τσιμέντο}}$

$$\frac{N}{T} = 0,60$$

Η εργασία για την εύρεση της ποσότητας των αδρανών με την οποία συμμετέχουν στην σύνθεση του μίγματος είναι η εξής:

Ξεκινώντας από την ποσότητα του τσιμέντου στο 1m^3 μίγμα σκυροδέματος που είναι 300Kgr/m^3 (συνήθης ποσότητα) υπολογίζεται η ποσότητα του Νερού που απαιτείται για το μίγμα: $\frac{N}{T} = 0,60$
 $N = 0,60 \times 300 = 180$. Τέλος χρησιμοποιώντας τη σχέση:

$$1000\text{lt} = A + T + N + \alpha$$

όπου Α: όγκος αδρανών στο 1m^3 σκυροδέματος

T: " τσιμέντου " "

N: " νερού " "

α : " κενών αέρος " " (ίσος με 20lt/m^3)

υπολογίστηκε η απαιτούμενη ποσότητα των αδρανών. Τα ποσοστά συμμετοχής της Άμμου, του Γαρμπιλιού και του χαλικού που συνθέτουν τα αδρανή φαίνονται στον Πίνακα 1. Τα ποσοστά αυτά είναι τα συνήθη με τα οποία τα υλικά αυτά συμμετέχουν για την παραγωγή μίγματος σκυροδέματος.

Οι ποσότητες (κατά βάρος) των υλικών που χρειάζονται για την παραγωγή του μίγματος ενός m^3 σκυροδέματος φαίνονται στον Πίνακα 2.

(β) Δοκιμαστικό ανάμιγμα 2 (όγκου 30 lt)

Το μίγμα αυτό παρασκευάσθηκε για τον ίδιο λόγο όπως και το

προηγούμενο μίγμα.

Ο συντελεστής Νερό/τσιμέντο είναι και για το μίγμα αυτό

$$\frac{N}{T} = 0,60$$

Η εργασία για την εύρεση της ποσότητας των Αδρανών του μίγματος είναι ακριβώς η ίδια όπως περιγράφηκε στο μίγμα 1 .

Τα ποσοστά συμμετοχής της Άμμου, του Γαρμπιλιού και του Χαλικιού φαίνονται στον Πίνακα 1.

Οι ποσότητες των υλικών που χρειάζονται για την παραγωγή του μίγματος ενός m^3 σκυροδέματος φαίνονται στον Πίνακα 2. Επίσης από το μίγμα αυτό παρασκευάστηκαν 3 πρισματικά δοκίμια (10X10X 50(cm)) και 2 κυλινδρικά [15/30(cm)]. Τα αποτελέσματα των θραύσεων των δοκιμιών φαίνονται στον Πίνακα 5.

(γ) Δοκιμαστικό ανάμιγμα 3 (όγκου 30lt)

Στην περίπτωση αυτή η τέφρα αντικαθιστά κατά 50% το τσιμέντο κατά την παραγωγή του μίγματος. Δηλαδή το ποσοστό συμμετοχής της τέφρας και του τσιμέντου στο σκυρόδεμα είναι 50% αντίστοιχα.

Η παρασκευή του μίγματος έγινε για να ελεγχθεί αν θα υπάρξουν προβλήματα από την χρησιμοποίηση της τέφρας που θα αντικαταστήσει μέρος του απαιτούμενου τσιμέντου.

Ο λόγος Νερό/τσιμέντο είναι:

$$N/T = 0,70$$

Η εργασία για την εύρεση της ποσότητας των Αδρανών είναι ακριβώς η ίδια όπως περιγράφηκε στο μίγμα 1 . Τα ποσοστά συμμετοχής της Άμμου του Γαρμπιλιού και του Χαλικιού φαίνονται στον Πίνακα 1. Η εύρεση της ποσότητας του τσιμέντου και της Τέφρας με την οποία τα δύο αυτά υλικά συμμετέχουν για την δημιουργία του μίγματος είναι:

1. Βρίσκεται ο όγκος του τσιμέντου των 300Kgr:

$$\text{Όγκος Τσιμέντου} = \frac{\text{Βάρος τσιμέντου}}{\text{Ειδικό βάρος τσιμ.}} = \frac{300\text{Kgr}}{3,0\text{Krg/dm}^3} = 100\text{lt}$$

2. Εύρεση των όγκων του τσιμέντου και της ιπτάμενης τέφρας με τον οποίο συμμετέχουν στην σύνθεση του μίγματος.

Έχω συμμετοχή του τσιμέντου κατά 50% άρα:

$$\text{Όγκος τσιμέντου} = 50\% * \text{όγκο τσιμέντου} = 50\% * 100 = 50\text{lt}$$

Έχω και στην ιπτάμενη τέφρα συμμετοχή 50% άρα:

$$\text{Όγκος ιπτάμενης τέφρας} = 50\% * \text{όγκο τσιμέντου} = 50\% * 100 = 50\text{lt}$$

3. Εύρεση των βαρών των δύο υλικών με τα οποία συμμετέχουν στο μίγμα:

$$\begin{aligned} \text{Βάρος τσιμέντου} &= \text{Όγκος τσιμέντου} * \text{ειδικό βάρος τσιμέντου} = \\ &= 50\text{lt} * 3,00\text{Kgr/m}^3 = 150\text{Kgr} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Βάρος Ιπτάμενης τέφρας} &= \text{Όγκος ιπτάμενης τέφρας} * \text{ειδικό Βάρος} \\ \text{ιπτ. τέφρ.} &= 50\text{lt} * 2,3\text{Kgr/dm}^3 = 115\text{Kgr.} \end{aligned}$$

Οι αναλογίες κατά βάρος που θα αναμειχθούν τα υλικά φαίνονται στον Πίνακα 2. Επίσης παρασκευάσθηκαν από το μίγμα αυτό 3 πρισματικά δοκίμια [10X10X50(cm)] και 2 κυλινδρικά [15/30(cm)]. Τα αποτελέσματα των θραύσεων των δοκιμίων αυτών φαίνονται στον Πίνακα 6.

Δοκιμαστικό ανάμικμα 4 (όγκου 25lt)

Το μίγμα αυτό κατασκευάσθηκε με σκοπό την μελέτη της διαφοράς που υπάρχει ως προς το αποτέλεσμα της συμπύκνωσης χρησιμοποιώντας Ηλεκτρόσφγγρα (Kango) και Δονητική Τράπεζα. Ο λόγος του μίγματος είναι:

$$N/T = 0,40$$

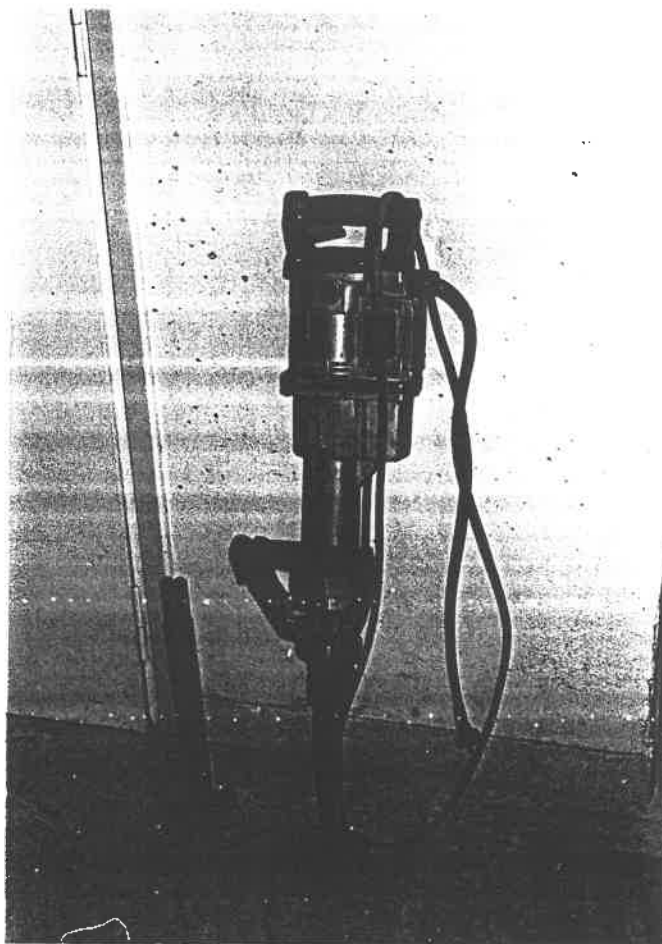
Ο οποίος χρησιμοποιείται συνήθως στην Πράξη για να επιτευχθεί ύφυγρο μίγμα που να μπορεί να συμπυκνωθεί με οδοστρωτήρα.

Η εργασία για την εύρεση της ποσότητας των Αδρανών του μίγματος είναι ακριβώς η ίδια ως περιγράφηκε στο μίγμα 1.

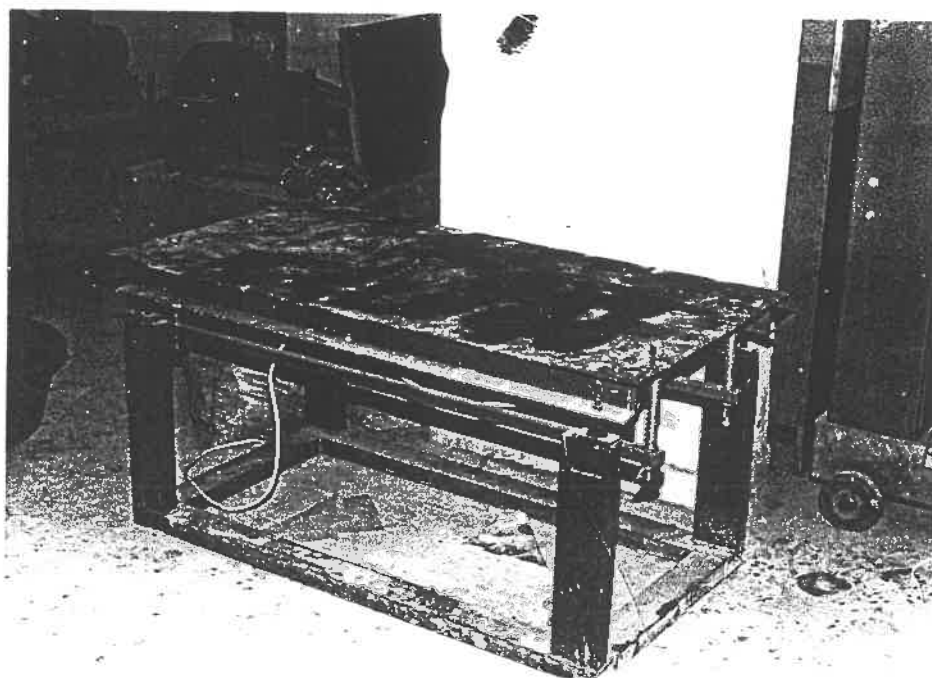
Τα ποσοστά συμμετοχής της Άμμου, του Γαρμπιλιού και του Χαλινιού φαίνονται στον Πίνακα 3. Από την ποσότητα του μίγματος

κατασκευάσθηκαν 3 δοκίμια πρισματικά διαστάσεων 10X10X50 (cm) και 3 κυλινδρικά διαστάσεων 10/20 (cm). Από αυτά δύο δοκίμια πρισματικά και 2 κυλινδρικά συμπυκνώθηκαν με ηλεκτρόσφυρα (Φωτογραφία 3) ενώ τα υπόλοιπα με την Δονητική Τράπεζα (Φωτογραφία 4). Παρατηρήθηκε ότι τα δοκίμια που συμπυκνώθηκαν με ηλεκτρόσφυρα (Kango) παρουσίαζαν μία επιφάνεια πολύ πιο κλειστή από αυτή που είχαν τα δοκίμια που είχαν συμπυκνωθεί με την Δονητική Τράπεζα.

Τέλος τα αποτελέσματα των θράσεων των Δοκιμίων [Πίνακας 7] αιτιολογούν την επιλογή της Ηλεκτρόσφυρας (Kango) σαν μέθοδο συμπύκνωσης και όχι της Δονητικής Τράπεζας.



Φωτογραφία 3. Ηλεκτρόσφυρα (Kango)



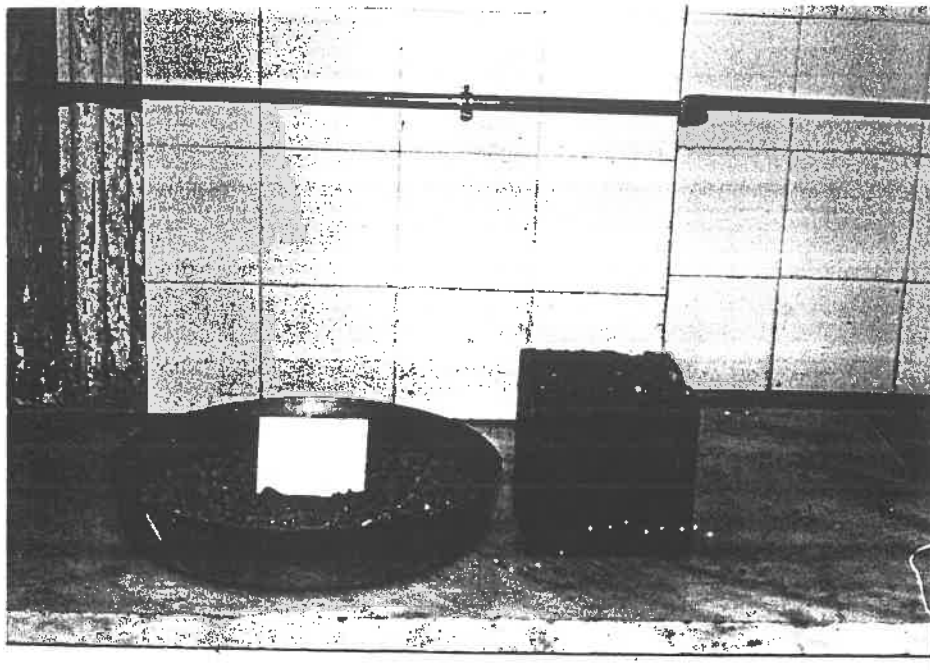
Φωτογραφία 4. Δονητική Τράπεζα

Δοκιμαστικά αναμίγματα 5α, 5β, 5γ

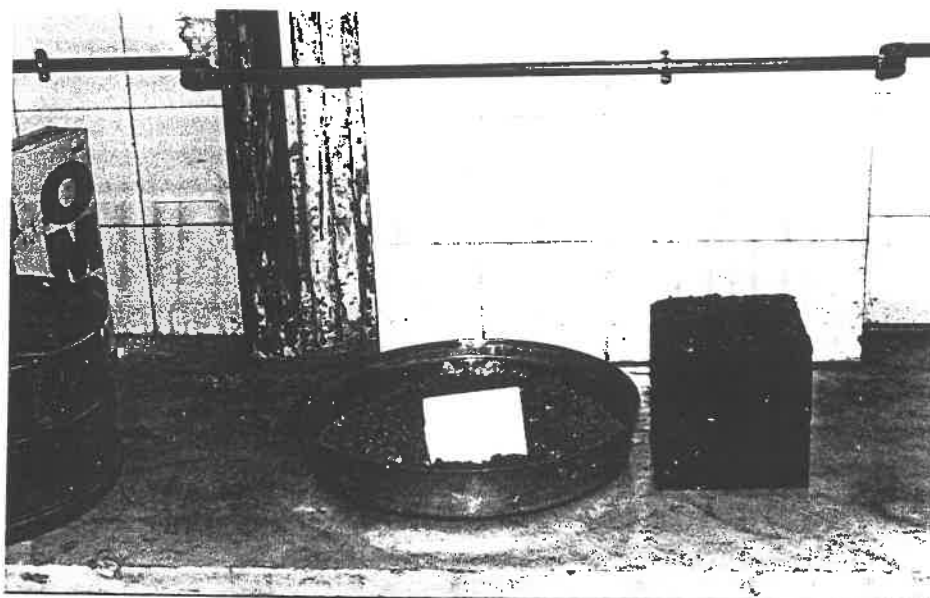
Παρασκευάσθηκαν τρία αναμίγματα με λόγο N/T : 0,40, 0,45, και 0,50.

Από την εμφάνιση του μίγματος σε σχέση με την εμπειρία που είχε επιτευχθεί επιλέχθηκε το ανάμιγμα εκείνο που παρουσίαζε την καλύτερη δυνατότητα για συμπύκνωση με ηλεκτρόσφυρα για δημιουργία δοκιμίων με επιφάνειες κλειστές και απαλλαγμένες από κενά. Στις φωτογραφίες 5, 6, 7 φαίνονται τα αναμίγματα αυτά. Τελικά κρίθηκε ότι ο λόγος $N/T=0,45$ είναι ο καλύτερος.

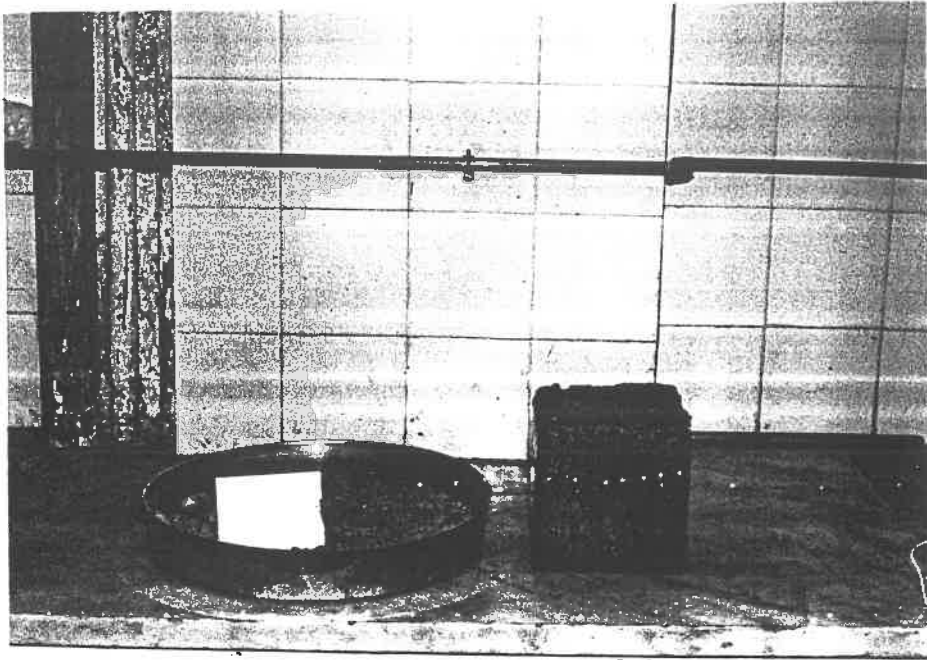
Τα ποσοστά συμμετοχής της Άμμου του Γαρμπιλίου και του Χαλικιού φαίνονται στον Πίνακα 3. Τέλος οι αναλογίες κατά βάρος που θα αναμειχθούν τα υλικά φαίνονται στον Πίνακα 4.



Φωτογραφία 5. Ανάμιγμα με λόγο $N/T = 0,40$



Φωτογραφία 6. Ανάμιγμα με λόγο $N/T = 0,45$



Φωτογραφία 7. Ανάμιγμα με λόγο $N/T = 0,50$

Μίγματα Κύριας Έρευνας

(α') Μίγμα Α (100% Τσιμέντο)

Το μίγμα παράχθηκε με συντελεστή $N_{\text{Νερό}}/T_{\text{Τσιμέντο}}$ ίσο με:

$$N/T = 0,45$$

Η διαδικασία για τον καθορισμό συνθέσεως είναι η ακόλουθη:

1. Δεδομένου ότι η ποσότητα του τσιμέντου ανά m^3 είναι 300Kgr και ο λόγος $N/T = 0,45$ η ποσότητα του Νερού υπολογίζεται ως εξής:

$$N = 0,45 * T = 0,45 * 300 = 135lt$$

2. Η αναλογία των Αδρανών προκύπτει από την σχέση:

$$1000lt = A + T + N + \alpha$$

όπου Α: όγκος Αδρανών στο $1m^3$ σκυροδέματος.

T: " τσιμέντου " " "

N: " Νερού " " "

α : " κενών αέρος " " " ίσος με $20lt/m^3$

Βρίσκω την απαιτούμενη ποσότητα των Αδρανών αφού μετατρέψω πρώτα τους όγκους των υλικών (Αδρανή, τσιμέντο) σε βάρη διαιρώντας τους με τα ειδικά τους βάρη. [ειδικό βάρος Αδρανών: $2,65Kgr/dm^3$, ειδικό βάρος τσιμέντο τσιμέντου: $3,10Kgr/dm^3$]. Τα ποσοστά συμμετοχής των υλικών Άμμο, Γαρμπίλι και χαλίκι τα οποία συνθέτουν τα Αδρανή φαίνονται στον Πίνακα 3.

Η σύνθεση των υλικών κατά βάρους για $1m^3$ του μίγματος φαίνονται στον Πίνακα 4.

(β') Μίγμα Β (75% Τσιμέντο-25% Ιπτάμενη Τέφρα)

Το μίγμα παράχθηκε με συντελεστή $N_{\text{Νερό}}/T_{\text{Τσιμέντο}}$ ίσο με

$$N/T = 0,45$$

Η εργασία για την εύρεση της ποσότητας των Αδρανών με την οποία συμμετέχουν στην σύνθεση είναι ακριβώς η ίδια όπως περιγράφηκε στο μίγμα Α.

Η εύρεση της Ποσότητας των υλικών: Τσιμέντου και Ιπτάμενης

Τέφρας με την οποία συμμετέχουν στο μίγμα Β ακολουθεί την εξής εργασία:

1. Βρίσκεται ο όγκος του Τσιμέντου των 300Kgr:

$$V_T = \frac{\text{Βάρος τσιμέντου}}{\text{Ειδικό Βάρος}} = \frac{300\text{Kgr}}{3,12\text{Kgr/dm}^3} = 96,15\text{lt}$$

2. Εύρεση του όγκου του τσιμέντου και της Ιπτάμενης Τέφρας με την οποία συμμετέχουν στην σύνθεση του μίγματος: Για το τσιμέντο έχω συμμετοχή 75%. Άρα:

$$\text{Όγκος τσιμέντου} = 75\% * V_T = 75\% * 96,15\text{lt} = 72,11\text{lt}$$

Για την Ιπτάμενη Τέφρα έχω συμμετοχή 25%. Άρα:

$$\text{Όγκος Ιπτάμενης τέφρας} = 25\% * V_T = 25\% * 96,15\text{lt} = 24,04\text{lt}$$

3. Μετατροπή των όγκων των δύο υλικών σε βάρη:

$$\text{Βάρος τσιμέντου} = \text{Όγκος τσιμέντου} * \text{ειδικό βάρος} = 72,11\text{lt} * 3,12\text{Kgr/dm}^3 = 225\text{Kgr}.$$

$$\text{Βάρος Ιπτάμενης τέφρας} = \text{Όγκος ιπτάμενης τέφρας} * \text{ειδικό βάρος} = 24,04\text{lt} * 2,30\text{Kgr/dm}^3 = 55,59\text{Kgr}$$

Τα ποσοστά συμμετοχής της Άμμου του Χαλικιού και του Γαρμπιλιού φαίνονται στον Πίνακα 3.

Η σύνθεση των υλικών κατά βάρος φαίνονται στον Πίνακα 4.

(γ') Μίγμα C (50% Τσιμέντο - 50% Ιπτάμενη Τέφρα)

Το μίγμα παράχθηκε με συντελεστές $N_{\text{Νερο}}/\text{Τσιμέντο}$ ίσο με

$$N/T = 0,45$$

Η εργασία για την εύρεση της ποσότητας των Αδρανών με την οποία συμμετέχουν στην σύνθεση του μίγματος C είναι η ίδια όπως περιγράφηκε στο μίγμα A. Η εύρεση της ποσότητας των υλικών τσιμέντου και Ιπτάμενης τέφρας με την οποία συμμετέχουν στο μίγμα C ακολουθεί την εξής εργασία:

1. Βρίσκεται ο όγκος του Τσιμέντου των 300 Kgr.

$$V_T = \frac{\text{Βάρος τσιμέντου}}{\text{Ειδικό Βάρος}} = \frac{300\text{Kgr}}{3,12\text{Kgr/dm}^3} = 96,15\text{lt}$$

2. Όγκος τσιμέντου και ιπτάμενης τέφρας με τον οποίο συμμετέχουν στην σύνθεση του μίγματος.

Για το τσιμέντο έχω συμμετοχή 50%

$$\text{Όγκος τσιμέντου: } 50\% * V_T = 50\% * 96,15\text{lt} = 48,07\text{lt}$$

Για την Ιπταμ. Τέφρα έχω συμμετοχή 50%

$$\text{Όγκος Ιπταμ. Τέφρας: } 50\% * V_T = 50\% * 96,15\text{lt} = 48,07\text{lt}$$

3. Μετατροπή των όγκων των δύο υλικών σε βάρη:

$$\text{Βάρος τσιμέντου: Όγκος τσιμέντου} * \text{ειδικό βάρος} = 48,07\text{lt} *$$

$$3,12\text{Kgr/dm}^3 = 150\text{Kgr}$$

$$\text{Βάρος Ιπταμ. Τέφρας: Όγκος ιπταμ. τέφρας} * \text{ειδικό βάρος} =$$

$$48,07\text{ lt} * 2,30\text{Kgr/dm}^3 = 110,57\text{ Kgr.}$$

Τα ποσοστά συμμετοχής της Άμμου του Γαρμπιλιού και του Χαλικιού φαίνονται στον Πίνακα 3. Η σύνθεση κατά Βάρος των Υλικών φαίνονται στον Πίνακα 4.

(δ') Μίγμα D (0% Τσιμέντο ~ 100% Ιπταμενη Τέφρα)

Το μίγμα παράχθηκε με συντελεστή Νερό/Τσιμέντο ίσο με:

$$N/T = 0,45$$

Η εργασία για την εύρεση της Ποσότητας των Αδρανών με την οποία συμμετέχουν στην σύνθεση του μίγματος D είναι η ίδια όπως περιγράφηκε στο μίγμα A. Η εύρεση της ποσότητας της Ιπτάμενης Τέφρας η οποία συμμετέχει στην σύνθεση του μίγματος D ακολουθεί την εξής εργασία:

1. Όγκος του τσιμέντου των 300 Kgr

$$V_T = \frac{\text{Βάρος Τσιμέντου}}{\text{Ειδικό Βάρος}} = \frac{300\text{Kgr}}{3,12\text{Kgr/dm}^3} = 96,15\text{lt}$$

2. Όγκος ιπταμ. τέφρας που συμμετέχει στο μίγμα. Έχω συμμετοχή 100%. Άρα: Όγκος ιπταμ. τέφρας = 96,15Pt.

3. Μετατροπή του όγκου σε βάρος της Ιπταμ. Τέφρας.

$$\text{Βάρος Ιπταμ. Τέφρας} = \text{Όγκος Ιπτ. Τέφρ.} * \text{ειδ. Βάρος} = 96,15\text{lt} *$$

$$2,30\text{Kgr/dm}^3 = 221,14\text{ Kgr.}$$

Τα ποσοστά συμμετοχής της Άμμου του Γαρμπιλίου και του Χαλικιού φαίνονται στον Πίνακα 3.

Η σύνθεση των υλικών κατά βάρος φαίνονται στον Πίνακα 4.

Κατασκευή δοκιμίων

Η διαδικασία παρασκευής των τεσσάρων αναμιγμάτων είναι η εξής:

- α) Ζύγιση των υλικών στη ζυγαριά
- β) Ρίψη των Αδρανών μέσα στον αναμικτήρα και ανάμιξη για 90sec.
- γ) Ρίψη του τσιμέντου και της Ιπτάμενης Τέφρας (για τα μίγματα B, C & D) στον αναμικτήρα και ανάμιξη όλων των υλικών για 60sec.
- δ) Προσθήκη της ποσότητας του Νερού στον αναμικτήρα και ανάμιξη όλων των υλικών για 90sec.

Ακολούθησε η κατασκευή των Δοκιμίων με την ακόλουθη διαδικασία:

Πρίσματα 10X10X50 (cm)

Το δοκίμιο κατασκευάσθηκε σε δύο στρώσεις. Κάθε στρώση συμπυκνώθηκε για 90 sec. Η συμπίκνωση έγινε με ηλεκτρόσφυρα. Κατά την συμπίκνωση η ηλεκτρόσφυρα έπρεπε να βρίσκεται σε κάθετη θέση ως προς την επιφάνεια του δοκιμίου.

Η επιφάνεια των πρισματικών δοκιμίων δεν ήταν δυνατόν να ήταν επίπεδη με την χρησιμοποίηση της Συμπυκνωτικής πλάκας διαστάσεων 10X 5cm) και για τον σκοπό αυτό μετά το πέρας της συμπίκνωσης το δοκίμιο υφίστατο περαιτέρω συμπίκνωση με μία πλάκα διαστάσεων 10X50 (cm) . Η πλάκα αυτή τοποθετήθηκε στην επιφάνεια του ήδη συμπυκνωμένου δοκιμίου και στο πάνω μέρος της τοποθετείτο η δονητική πλάκα της ηλεκτρόσφυρας. Ετίθετο σε κίνηση για μερικά δευτερόλεπτα. Έτσι αφ' ενός μεν η τελική επιφάνεια ήταν σχεδόν επίπεδη αφετέρου ήταν και κλειστή χωρίς επιφανειακά κενά.

Κύλινδροι 10/20 (cm)

Ανάλογη κατεργασία υφίστανται και τα κυλινδρικά δοκίμια 10/20cm.

Για τα δοκίμια αυτά ακολουθήθηκε η εξής διαδικασία: Συμπυκνώθηκαν σε 3 στρώσεις, όπου η κάθε στρώση συμπυκνώθηκε με ηλεκτρόσφυρα.. για 8sec.

Τα δοκίμια παρέμειναν μέσα στις μήτρες για 24 ώρες. Στην διάρκεια των ωρών αυτών ήταν σκεπασμένα με πλαστικά φύλλα και πάνω από αυτά είχαν απλωθεί βρεγμένες λινάτσες ώστε τα δοκίμια να βρίσκονται σε κορεσμένο περιβάλλον. Μετά το πέρας των εικοσιτεσσάρων ωρών τα δοκίμια αποχωρίζονταν από τις μήτρες και τοποθετούνταν σε μια δεξαμενή με νερό και παρέμειναν εκεί μέχρι την ημέρα της θραύσης των.

Κατά την διαδικασία ξεκαλουπώματος του μίγματος D παρουσιάστηκε πρόβλημα σε ορισμένα κυλινδρικά δοκίμια (μήτρες χωριζόμενες στη μέση) όπου απολέστηκαν 3 δοκίμια διότι δεν επιτεύχθηκε η αποκόλλησή τους. Αυτό αποδίδεται σε μη ικανοποιητικό για την περίπτωση αυτή λάδωμα σε συνδυασμό με την μικρή τους αντοχή.

Μέτρηση της θερμοκρασίας για τα μίγματα A, B, C, D.

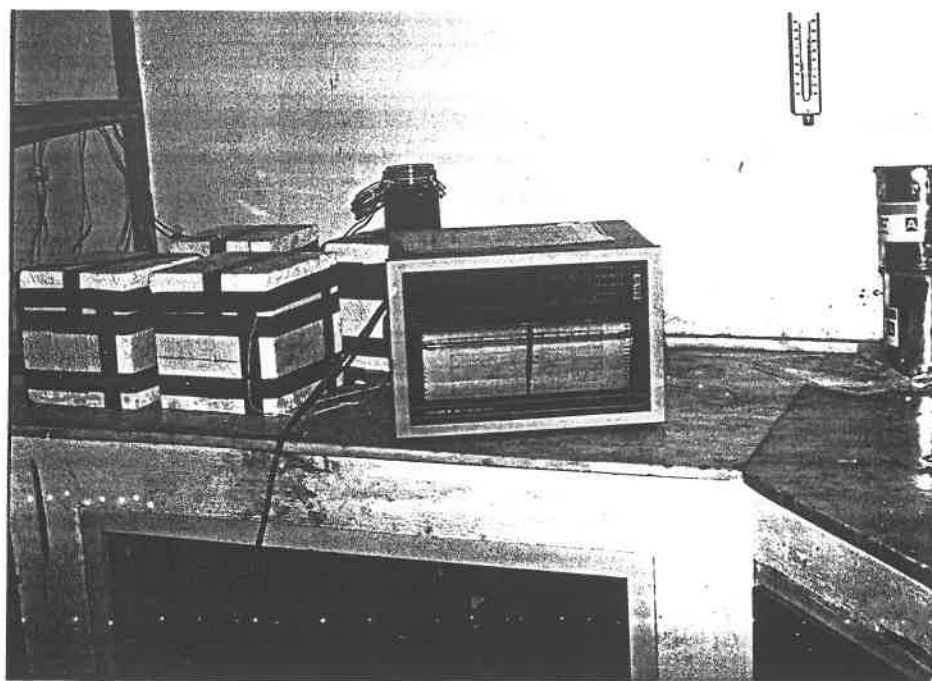
Η μέτρηση της θερμοκρασίας του μίγματος έγινε με αδιαβατικές συνθήκες και για το σκοπό αυτό κατασκευάσθηκαν τέσσερεις μήτρες από διογκωμένη πολυστερίνη πάχους 5cm και εσωτερικών διαστάσεων 15 X 15 X 15 (cm) (φωτογραφία 8). Μάλιστα η σύνδεση των πλευρών της μήτρας έγινε με την βοήθεια μονωτικής ταινίας, για να αποφευχθεί η διαρροή της θερμότητας του μίγματος κατά την μέτρησή της.

Η καταγραφή της θερμοκρασίας επιτεύχθηκε με την βοήθεια ενός καταγραφικού, όπου οι θερμοκρασίες των μιγμάτων καταγράφονταν από το μηχάνημα σε σταθερά χρονικά διαστήματα.

Κατασκευή πρισμάτων επιβραχύνσεων

Από τα μίγματα Α, Β, C & D κατασκευάσθηκαν για το καθένα 1 πρισματικό δοκίμιο.

Τα τέσσερα αυτά δοκίμια παράχθησαν σε μήτρες διαστάσεων 16X16X285 (mm). Η συμπύκνωσή τους έγινε με την βοήθεια της Δονητικής Τράπεζας. Η παραμονή του δοκιμίου μέσα στην μήτρα διαρκούσε 24 ώρες και μετά από αυτό το διάστημα ακολουθούσε η διαδικασία του ξεκαλουπώματος. Οι μήτρες έπρεπε να ήταν καλά λαδωμένες ώστε το δοκίμιο να ξεκαλουπωνόταν εύκολα και για να μην υπήρχαν απώλειες. Μάλιστα επειδή το δοκίμιο έβγαινε από την μήτρα έχοντας στις 2 άκρες του από μία βίδα μεταξύ της βίδας αυτής και του παξιμαδιού που την στήριξε στην μήτρα είχε παρεμβληθεί ένα μικρό κομματάκι ναύλον ώστε ο αποχωρισμός της βίδας από το παξιμάδι να ήταν εύκολος και με χωρίς απώλειες. Τα πρισματικά αυτά δοκίμια φυλαγόταν σε χώρο υπόσυνθήκες περιβάλλοντος.



Φωτογραφία 8. Καταγραφικό μηχάνημα μέτρησης της θερμοκρασίας των μιγμάτων - μήτρες από διογκωμένη πολυστερίνη

Πίνακας 1. Ποσοστιαίες αναλογίες ανάμιξης αδρανών

	Μίγματα		
	1	2	3
Χαλίκι 3/4-1/2'	30%	30%	30%
Γαρμπίλι 1/2'- 4	20%	20%	20%
Άμμος, No 4-0	50%	50%	50%

Πίνακας 2. Κατά βάρος ανάμιξη των υλικών

	Μίγματα		
	1	2	3
Συντελεστής ^N /T	0,60	0,60	0,70
Τσιμέντο	300Kgr	300Kgr	150Kgr
Ιπταμ. Τέφρα	-	-	115Kgr
Νερό	180lt	180lt	210lt
Χαλίκι, 3/4'- 1/2'	560Kgr	560Kgr	487Kgr
Γαρμπίλι, 1/2'- 4	370kgr	370Kgr	384Kgr
Άμμος, No 4-0	925Kgr	925Kgr	871Kgr

Πίνακας 3. Ποσοστιαίες Αναλογίες ανάμιξης αδρανών

	Μίγματα							
	4	5α	5β	5γ	A	B	C	D
Χαλίκι 3/4' - 1/2'	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
Γαρμπίλι 1/2' - Νο 4	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%	20%
Άμμος, Νο 4 - 0	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%

Πίνακας 4. Κατά βάρος ανάμιξης των υλικών

	Μίγματα							
	4	5α	5β	5γ	A	B	C	D
Συντελεστής ^N /T	0,40	0,40	0,50	0,45	0,45	0,45	0,45	0,45
Τσιμέντο	300Kgr	300Kgr	300Kgr	300Kgr	300Kgr	225Kgr	150Kgr	-
Ιπτάμενη Τέφρα	-	-	-	-	-	55,29 "	110,57"	221,14
Νερό	120lt	120lt	150lt	135lt	135lt	135lt	135lt	135lt
Χαλίκι 3/4' - 1/2'	395Kgr	405Kgr	398Kgr	397Kgr	397Kgr	397Kgr	397Kgr	397Kgr
Γαρμπίλι 1/2-Νο 4	395Kgr	405Kgr	398Kgr	397 "	397Kgr	397Kgr	397Kgr	397Kgr
Άμμος Νο 4 - 0	1186"	1214"	1167"	1190"	1190"	1190"	1190"	1190"

Πίνακας 5. Αποτελέσματα θραύσεων 28 ημερών

ΕΙΔΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΔΟΚΙΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ			
	ΚΑΜΨΗ (ΜΡα)	ΘΛΙΨΗ (ΜΡα)		ΔΙΑΡΡΗΞΗ (ΜΡα)
Πρίσμα (10X10X50)	4,25	30,04	31,42	-
Πρίσμα (10X10X50)	3,915	31,94	34,59	-
Πρίσμα (10X10X50)	5,33	33,08	30,53	-
Κύλινδρος (15/30)	-	-	-	3,41
Κύλινδρος (15/30)	-	-	-	1,36

Πίνακας 6. Αποτελέσματα θραύσεων 28 ημερών

ΕΙΔΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΔΟΚΙΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ			
	ΚΑΜΨΗ (ΜΡα)	ΘΛΙΨΗ (ΜΡα)		ΔΙΑΡΡΗΞΗ (ΜΡα)
Πρίσμα (10X10X50)	3,24	22,04	21,50	-
Πρίσμα (10X10X50)	3,17	21,71	21,92	-
Πρίσμα (10X10X50)	3,58	21,32	17,95	-
Κύλινδρος (15/30)	-	-	-	2,05
Κύλινδρος (15/30)	-	-	-	1,87

Πίνακας 7. Αποτελέσματα θραύσεων 28 ημερών

ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΣΦΥΡΑ (KANGO)				
ΕΙΔΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΔΟΚΙΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ			
	ΚΑΜΨΗ (MPa)	ΘΛΙΨΗ (MPa)		ΔΙΑΡΡΗΞΗ (MPa)
Πρίσμα (10X10X50)	7,97	45,74	38,04	-
Κύλινδρος (10/20)	-	-	-	7,41
ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ ΜΕ ΔΟΝΗΤΙΚΗ ΤΡΑΠΕΖΑ				
ΕΙΔΟΣ ΔΟΚΙΜΙΟΥ	ΔΟΚΙΜΗ ΘΡΑΥΣΗΣ			
	ΚΑΜΨΗ (MPa)	ΘΛΙΨΗ (MPa)		ΔΙΑΡΡΗΞΗ (MPa)
Πρίσμα (10X10X50)	0,00	2,80	2,90	-
Κύλινδρος (10/20)	-	-	-	0,36

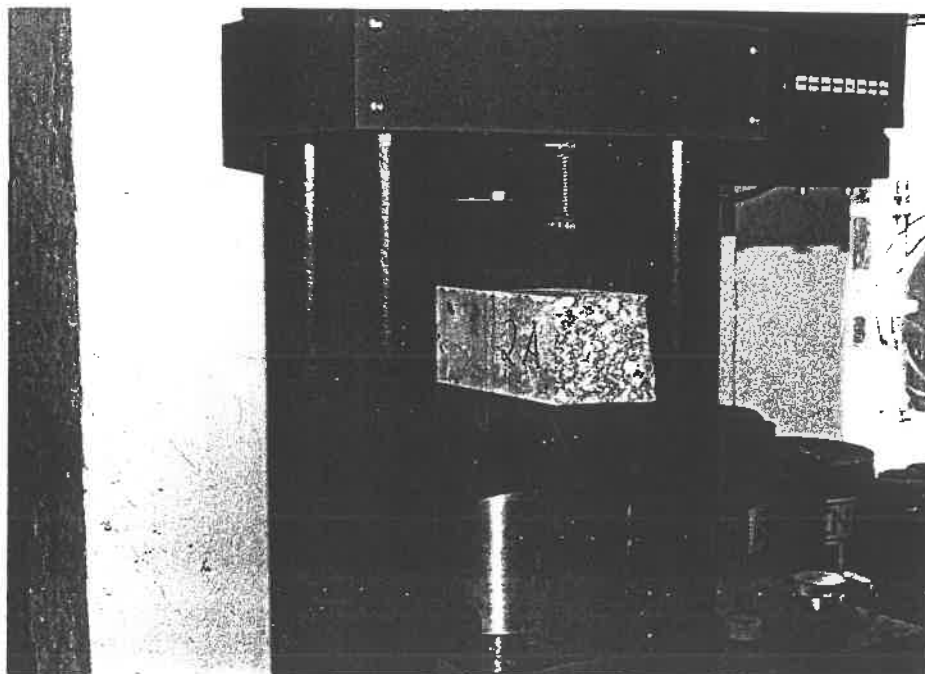
2.4 Δοκιμές

Θλίψη

Προκειμένου να ευρεθεί η αντοχή σε θλίψη των διαφόρων μιγμάτων σκυροδέματος εκτελέσθηκε η δοκιμή των "ισοδύναμων κύβων" σύμφωνα με τον κανονισμό BS 1881, χρησιμοποιώντας τα δύο σπασμένα άκρα των πρισμάτων που είχαν προηγουμένως υποβληθεί σε δοκιμή κάμψης. Αυτά τα άκρα που δεν καταστρέφονται κατά τη διαδικασία της δοκιμής κάμψης φορτίζονται σε θλίψη μεταξύ δύο βοηθητικών χαλύβδινων πλακών σχήματος τετραγώνου, πλευράς 100mm κατάλληλες σε σχέση με το πλάτος του πρίσματος.

Αν και υποστηρίζεται [14] [13] ότι τα αποτελέσματα που προκύπτουν διαφέρουν από αυτά που δίνει μία δοκιμή με κανονικό κύβο, λόγω της συμβολής στην αντοχή του σκυροδέματος που βρίσκεται έξω από τις βοηθητικές πλάκες, άλλοι ερευνητές [23] κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι δεν υπάρχει διαφορά.

Οι φωτογραφίες 1. και 2. δείχνουν έναν "ισοδύναμο κύβο" στη μηχανή θλίψης που χρησιμοποιήθηκε για τις δοκιμές, πριν από τη δοκιμή. Φαίνονται οι ειδικές χαλύβδινες πλάκες διαστάσεων 100 X 100 X 30mm που χρησιμοποιήθηκαν.



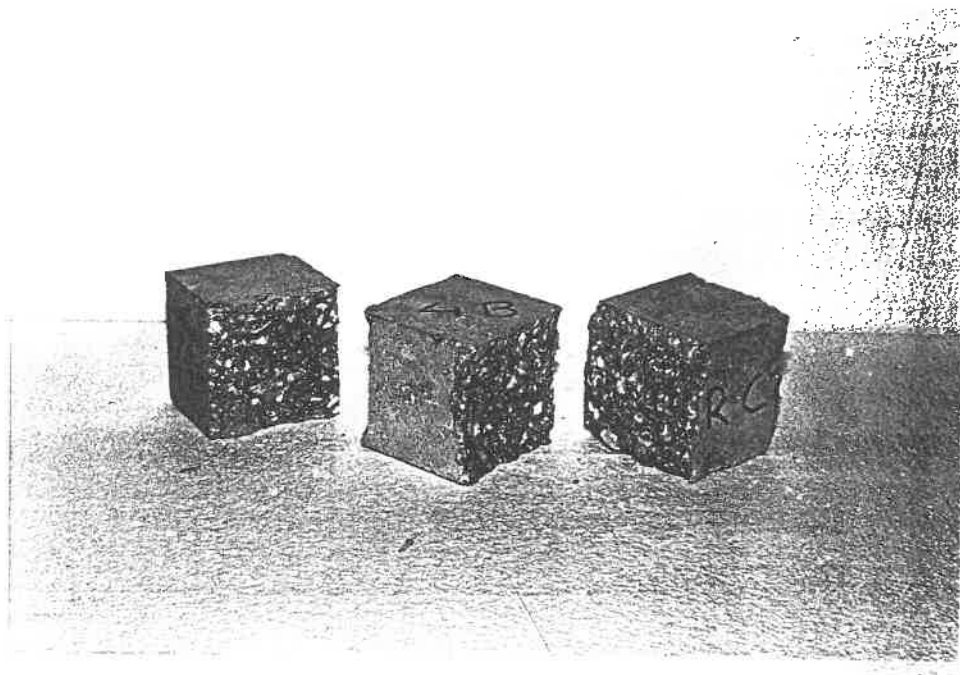
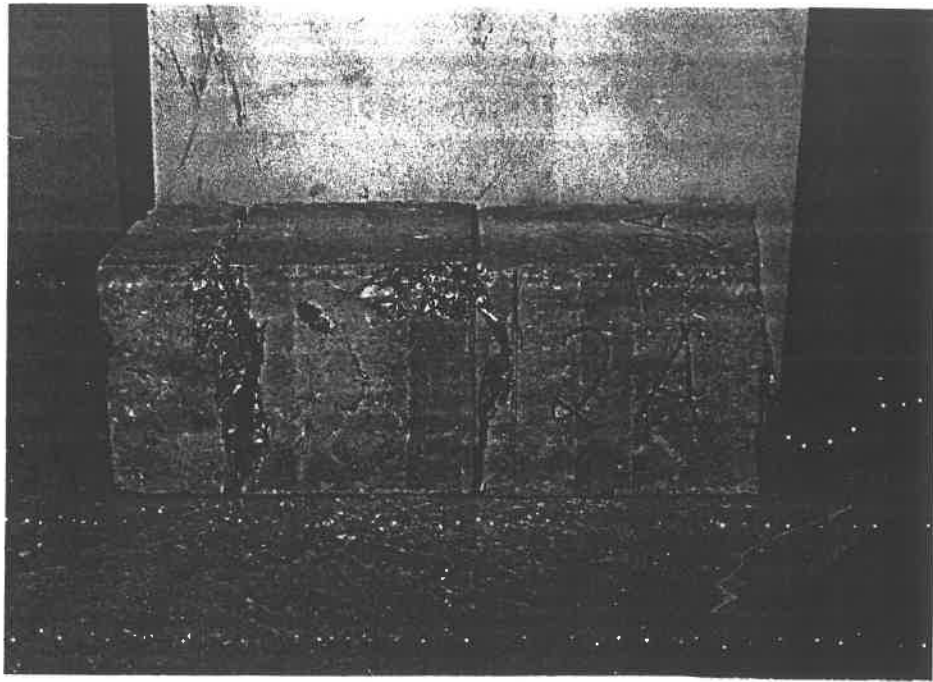
Φωτογραφία 1. Διάταξη για την εκτέλεση της δοκιμής σε θλίψη ισοδύναμων κύβων

Η μηχανή θλίψης που χρησιμοποιήθηκε είχε δυνατότητα επιβολής φορτίου έως 2000KN. Η ταχύτητα φόρτισης ρυθμίστηκε στα 10KN/S τιμή που βρίσκεται εκτός των ορίων του κανονισμού ASTM, για λόγους που σχετίζονται με τις δυνατότητες της μηχανής θλίψης.

Τα δοκίμια εισάγονταν στη μηχανή θλίψης και ο χειριστής εφαρμόζε το αρχικό φορτίο προσέχοντας αυτό να γίνεται με την ελάχιστη δυνατή κρούση. Στη συνέχεια αφηνόταν το φορτίο να αυξάνεται με την ορισμένη σταθερή ταχύτητα φόρτισης μέχρις ότου το δοκίμιο να θραυστεί. Εθεωρείτο ότι το δοκίμιο είχε αστοχήσει όταν οι τιμές του φορτίου που κατέγραφε το ενδεικτικό όργανο της μηχανής θλίψης μειώνονταν διαρκώς. Σαν φορτίο θραύσης λαμβάνονταν η μέγιστη τιμή του θλιπτικού φορτίου. Στις φωτογραφίες 3. και 4. φαίνεται η μορφή θραύσης των ισοδύναμων κύβων. Σημειώνεται η εμφάνιση της χαρακτηριστικής θραύσης υπό μορφή διπλής κόλυρης πυραμίδας που οφείλεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ του δοκιμίου του σκυροδέματος και των χαλύβδινων πλακών μεταξύ των οποίων αυτό θλίβεται.



Φωτογραφία 2. Διάταξη για την εκτέλεση της δοκιμής σε θλίψη ισοδύναμων κύβων



Φωτογραφίες 3., 4. Μορφές θραύσης ισοδύναμων κύβων

Σημειώνεται ιδιαίτερα ότι τα δοκίμια του μίγματος D, που περιείχε αμιγή ιπτάμενη τέφρα παρουσίασαν μία σημαντική διαστολή του όγκου τους που υπερέβαινε το συνηθισμένο ελεύθερο ύψος μεταξύ άνω και κάτω πλάκας της διάταξης θλίψης που ήταν πάντοτε σταθερό. Ειδικά σ' αυτή την περίπτωση χρειάσθηκε να γίνει κατάλληλη αλλαγή στη διάταξη των εξαρτημάτων της μηχανής θλίψης προκειμένου να γίνει η δοκιμή. Η διαστολή αυτή κρίνεται σαν μεγάλη και οπωσδήποτε υπερβαίνει σε μέγεθος αυτή των διαφόρων σκυροδεμάτων σε χρήση. Σε κάθε περίπτωση απαιτείται περαιτέρω έρευνα του φαινομένου και των πιθανών του συνεπειών σε ενδεχόμενη μελλοντική χρήση του υλικού αυτού.

Τελικά υπολογίσθηκε το μέγεθος αντοχή σε θλίψη σύμφωνα με τη σχέση

$$R_C = \frac{P}{S}$$

όπου

P το θλιπτικό φορτίο που εφαρμόζεται στον κύβο σε Newton.

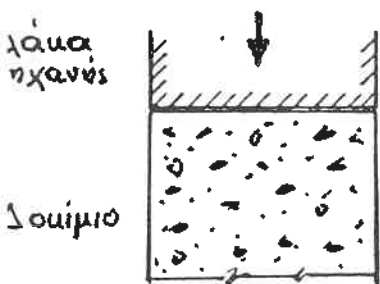
S το εμβαδόν της πλευράς του κύβου σε mm²

Σχόλια πάνω στη δοκιμή σε θλίψη

Το ζητούμενο στη δοκιμή της θλίψης είναι η εκτίμηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος. Ο όρος θλιπτική αντοχή είναι στην πραγματικότητα ανακριβής καθ' ότι το σκυρόδεμα δεν αστοχεί σε καθαρή θλίψη. Η αστοχία κατά τη δοκιμή της θλίψης οφείλεται σε διατμητικές και εφελκυστικές δυνάμεις που εισάγονται στο δοκίμιο από τη θλιπτική δύναμη.

Οι διατμητικές δυνάμεις οφείλονται στη διαφορά μεταξύ της πλευρικής διαστολής των καλύβδινων πλακών μεταξύ των οποίων θλίβεται το δοκίμιο και του σκυροδέματος (Σχήμα 5). Η πλευρική διαστολή εξαρτάται από τις ελαστικές ιδιότητες του υλικού και είναι μεγαλύτερη για υλικά που έχουν μικρότερο μέτρο ελαστικότητας E

Επίδραση συντοριακών συνθηκών



Εγκάρσια παραμόρφωση

$$\text{Πλάκας} : \epsilon_{\pi\lambda} = \mu_{\pi\lambda} \frac{\sigma_1}{E_{\pi\lambda}}$$

(μ = συντελεστής του Poisson)

$$\text{Δοκιμίου} : \epsilon_{\delta} = \mu_{\delta} \frac{\sigma_1}{E_{\delta}}$$

Η εγκάρσια παραμόρφωση είναι μεγαλύτερη

στο δοκίμιο όταν $(\mu/E)_{\delta} > (\mu/E)_{\pi\lambda}$

στην πλάκα $\gg (\mu/E)_{\delta} < (\mu/E)_{\pi\lambda}$

Συνοδόμενα με

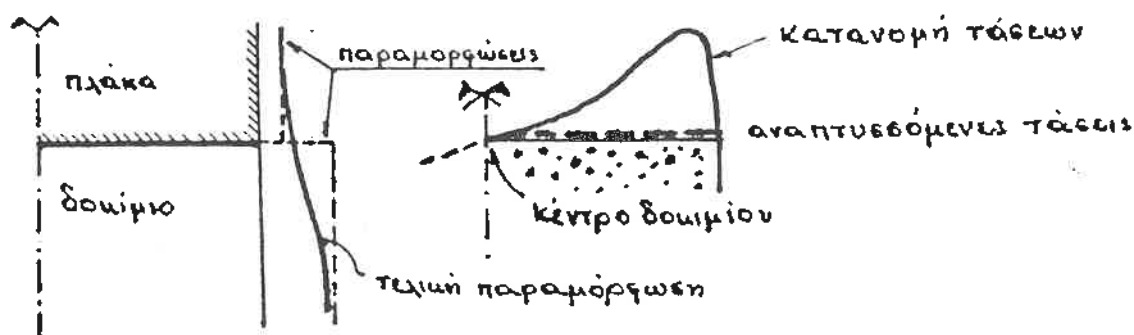
συνήδη αδρανής : $\mu/E = 3,7 \text{ έως } 14,5 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{kg}$

ελαφρά. $\times$: $\mu/E = 7,5 \quad 28,6 \times 10^{-7} \quad "$

Χάλυβες μηχανών : $\mu/E = 1,6 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{kg}$

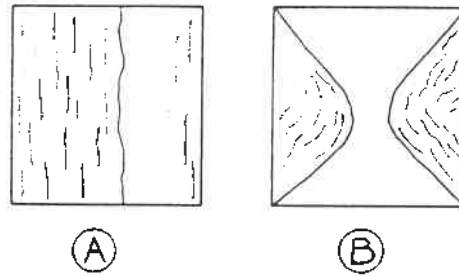
Η αναπτυσσόμενη τριβή μεταξύ επιφανιών δοκιμίου πλάκας παρεμποδίζει την εγκάρσια παραμόρφωση του δοκιμίου

ανάπτυξη εγκάρσιων τάσεων

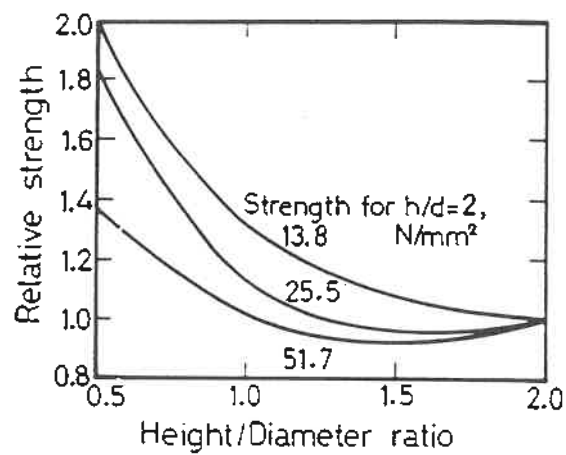


Σχήμα 5. Αλληλεπίδραση πλάκας-μηχανής και δοκιμίου κατά την δοκιμή θλίψης [22]

και μεγαλύτερο λόγο του Poisson ν , δηλαδή μεγαλύτερο λόγο ν/E . Οι χαλύβδινες πλάκες έχουν πλευρική διαστολή μικρότερη από αυτή του σκυροδέματος. Αυτή η μικρότερη πλευρική διαστολή εμποδίζει τη διαστολή του σκυροδέματος, οι ρωγμές οι παράλληλες με τη διεύθυνση του φορτίου εμποδίζονται να επεκταθούν και το δοκίμιο αστοχεί υπό μεγαλύτερο φορτίο. Ο βαθμός της παρεμπόδισης της πλευρικής διαστολής του σκυροδέματος εξαρτάται από την τριβή που αναπτύσσεται μεταξύ των χαλύβδινων πλακών και του δοκιμίου. Η υψηλή τριβή αυξάνει την παρεμπόδιση της πλευρικής διαστολής και δίνει για το λόγο αυτό μεγαλύτερη αντοχή. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα εμφανές όταν η τριβή μειώνεται στο ελάχιστο με την χρήση για παράδειγμα κάποιου λιπαντικού [15]. Στην περίπτωση αυτή παρατηρούνται μεγάλες εγνάρσιες παραμορφώσεις και το δοκίμιο αστοχεί υπό χαμηλότερο φορτίο. Ακόμη η μορφή της θραύσης αλλάζει και χαρακτηρίζεται από ρωγμές παράλληλες με τη διεύθυνση του φορτίου (Σχήμα 6). Η αντοχή που προκύπτει με τέτοιου είδους διατάξεις πλησιάζει τη μονοαξονική αντοχή σε θλίψη στο βαθμό που επιτυγχάνεται με την πειραματική διάταξη η εξάλειψη της τριβής. Στην συνηθισμένη περίπτωση όπου οι χαλύβδινες πλάκες περιορίζουν την πλευρική παραμόρφωση, η θραύση παίρνει την μορφή δύο πυραμίδων οι βάσεις των οποίων συμπίπτουν με την κορυφή και την βάση του κύβου και οι κορυφές τους δείχνουν προς το εσωτερικό του (Σχήμα 6.).



Σχήμα 6. Επίδραση του βαθμού παρεμπόδισης της πλευρικής διαστολής στη μορφή θραύσης του σκυροδέματος. Α: μικρή παρεμπόδιση, Β: μεγάλη παρεμπόδιση [13]



Σχήμα 7. Επίδραση του λόγου h/d στην αντοχή κυλίνδρων από σκυρόδεμα [13]

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

Το μέγεθος της διατμητικής τάσης που εισάγεται με την αλληλεπίδραση μεταξύ δοκιμίου σκυροδέματος και καλύβδινων πλακών της διάταξης θλίψης, μειώνεται και η πλευρική διαστολή αυξάνεται με την αύξηση της απόστασης από τις επιφάνειες φόρτισης του δοκιμίου. Το φαινόμενο γίνεται αμελητέο σε μιά απόσταση $\sqrt{3}/2$ φορές τη μέγιστη πλευρική διάσταση του δοκιμίου. Δηλαδή, εάν ένα κυλινδρικό δοκίμιο είναι μακρύτερο από 1,7 διαμέτρους του, ένα τμήμα του είναι ελεύθερο από πλευρική παρεμπόδιση, και πράγματι δοκίμια μεγαλύτερου μήκους παρουσιάζουν μια περισσότερο ομοιόμορφη αν και μικρότερη αντοχή από αυτά των οποίων το μήκος είναι μικρότερο από περίπου 1,7 διαμέτρους. Στις ΗΠΑ, τον Καναδά και άλλες χώρες, το τυποποιημένο δοκίμιο είναι ένας κύλινδρος με λόγο ύψους προς διάμετρο ίσο με 2, κατασκευασμένο σύμφωνα με τον κανονισμό ASTM C192-69. Στη Γαλλία χρησιμοποιείται ένα πρίσμα με λόγο ύψους προς πλάτος ίσο με 5, αλλά σε πολλές άλλες χώρες έχουν τυποποιηθεί δοκίμια σε σχήμα κύβου. Στο Σχήμα 8. παρατίθενται τα αποτελέσματα της πειραματικής επαλήθευσης του φαινομένου της αλληλεπίδρασης μεταξύ δοκιμίου και πλακών της διάταξης θλίψης για πρισματικό δοκίμιο και για κυλινδρικό δοκίμιο με λόγο ύψους προς πλευρική διάσταση ίσο με δύο. Απεικονίζονται ακόμη οι αντίστοιχες μορφές θραύσης για πρισματικό και κυλινδρικό δοκίμιο κατά τον προσδιορισμό της μονοαξονικής θλιπτικής αντοχής.

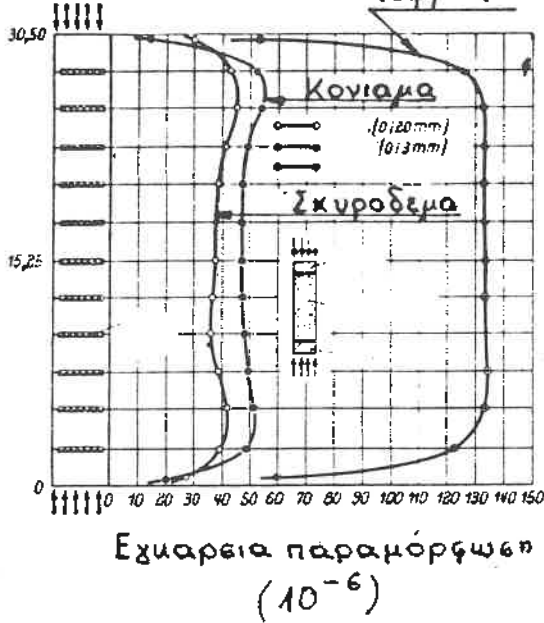
Στο Σχήμα 7. φαίνεται ότι η επίδραση του λόγου ύψους προς διάμετρο μειώνεται όσο η αντοχή του σκυροδέματος αυξάνεται. Αυτό είναι αναμενόμενο διότι ο βαθμός της παρεμπόδισης της πλευρικής

Πειραματική επαλήθευση

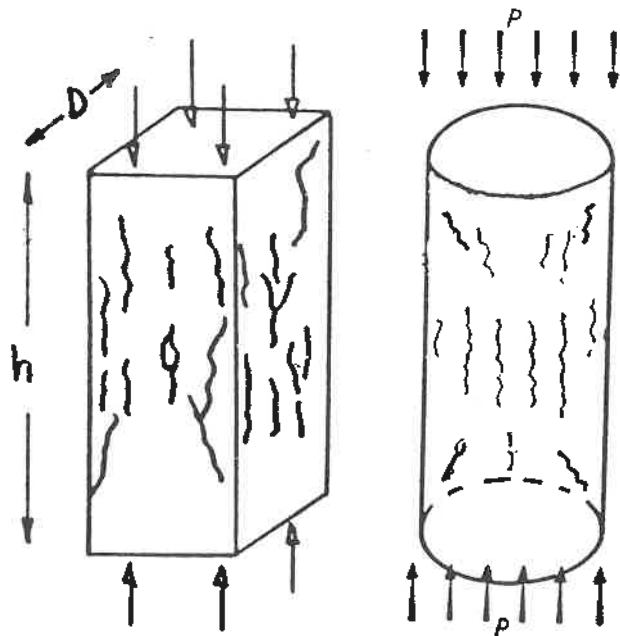
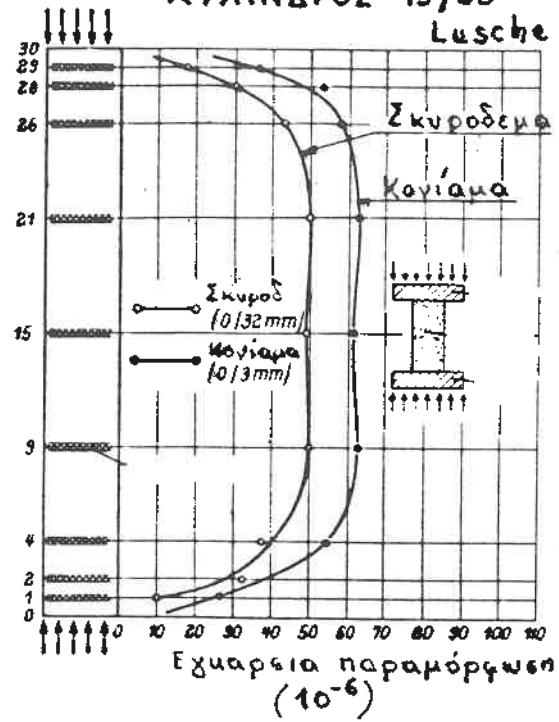
ΠΡΙΣΜΑ

Newman
Lachance

Τέση/ποσότης



ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ 15/30
Lusche



Μονο-αξονική αντοχή f_c

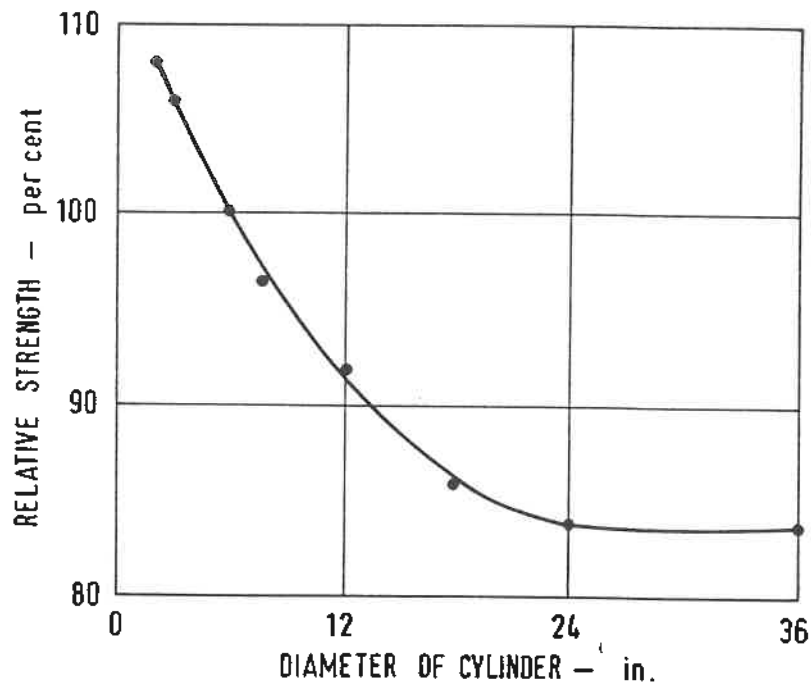
$$\frac{h}{D} \geq 2$$

Σχήμα 8. Εγκάρσιες παραμορφώσεις πρίσματος και κυλίνδρου με $h/D \geq 2$ και μορφές θραύσης αντίστοιχα κατά την θλίψη [22]

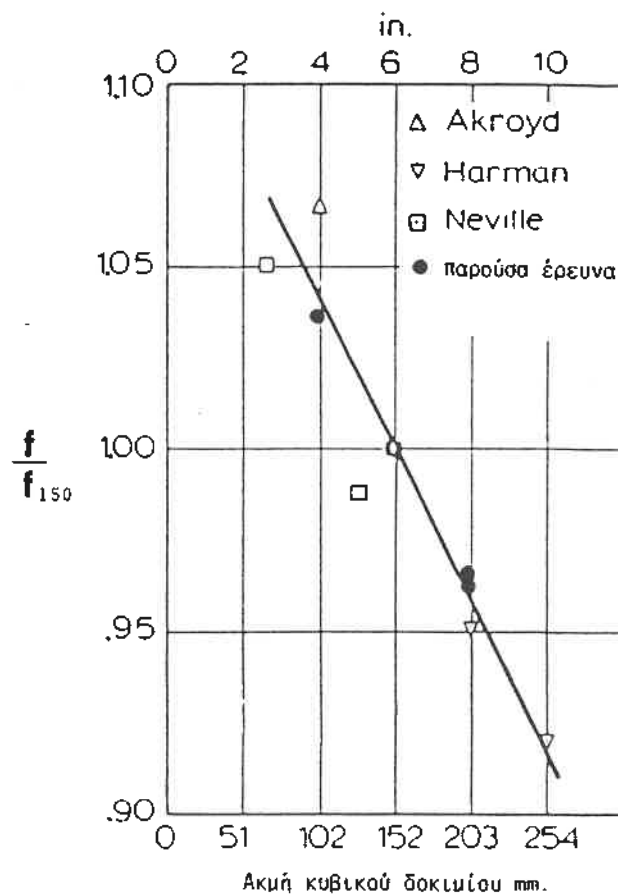
διαστολής είναι μικρότερος όσο μικρότερη είναι η διαφορά μεταξύ των ακαμψιών των πλακών φόρτισης και του δοκιμίου του σκυροδέματος. Είναι φανερό ότι για συνθήκες όπου δεν υπάρχει τριβή μεταξύ πλακών και σκυροδέματος, ο λόγος ύψους προς διάμετρο δεν θα επηρεάζει την προκύπτουσα αντοχή.

Η αντοχή ενός κυλίνδρου με λόγο ύψους προς διάμετρο ίσο με δύο δεν επηρεάζεται από το φαινόμενο παρεμπόδισης της πλευρικής διαστολής και για το λόγο αυτό θα είναι μικρότερη από αυτή ενός παρόμοιου κύβου, δηλαδή ενός κύβου με ακμή ίση με τη διάμετρο του κυλίνδρου. Καθώς ο βαθμός της παρεμπόδισης της πλευρικής διαστολής μειώνεται με την αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος, η διαφορά μεταξύ αντοχών κυλίνδρου και κύβου θα μειώνεται επίσης. Τα αποτελέσματα της εργασίας του Evans [13] για κύβους ακμής έξι ιντσών και κυλίνδρων 6 X 12 ιντσών δείχνουν ότι ο λόγος της αντοχής κυλίνδρου προς αντοχή κύβου κυμαίνεται από 0,75 έως 0,95. Ο κανονισμός BS1881, 1970 αμελεί την επίδραση της αντοχής του σκυροδέματος στο λόγο αυτό και προτείνει μία τιμή ίση με 0,80 για γενική χρήση.

Ένας σημαντικός παράγοντας που επηρεάζει τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης είναι το μέγεθος των δοκιμίων που χρησιμοποιούνται. Στο Σχήμα 9. απεικονίζονται οι αντοχές σε θλίψη κυλίνδρων διαφόρων μεγεθών. Παρατηρείται μία σημαντική αύξηση της θλιπτικής αντοχής με τη μείωση του μεγέθους των δοκιμίων κάτω από ένα όριο. Η εξήγηση του φαινομένου σχετίζεται κυρίως με την πιθανότητα εμφάνισης ενός ασθενούς στοιχείου. Όσο μεγαλύτερος είναι ο όγκος του σκυροδέματος που υποβάλλεται σε μια ορισμένη ένταση τόσο πιθανότερο είναι να περιέχει αυτός ένα στοιχείο μίας ακραίας μικρής αντοχής. Άλλοι λόγοι για τους οποίους τα μικρότερα δοκίμια παρουσιάζουν μεγαλύτερες αντοχές είναι η ενδεχόμενη καλύτερη συμπίκνωση και καλύτερη ενυδάτωση που οδηγούν σ'ένα σκυρόδεμα



Σχήμα 9. Αντοχή σε θλίψη κυλίνδρων διαφόρων μεγεθών [12]



Σχήμα 10. Σχετική αντοχή κύβων σκυροδέματος με διάφορα μήκη ακμών [19]

καλύτερης ποιότητας και κατά συνέπεια μεγαλύτερης αντοχής.

Στην εργασία αυτή οι δοκιμές σε θλίψη έγιναν σε "ισοδύναμους κύβους" ακμής 10cm. Κατά συνέπεια οι τιμές που προκύπτουν για την αντοχή σε θλίψη είναι υψηλότερες από τις περισσότερο διαδεδομένες τιμές αντοχής κυβικών δοκιμίων ακμής 20cm. Η αναγωγή της αντοχής κύβου ακμής 10cm σε αντοχή κύβου ακμής 20 cm μπορεί να γίνει με βάση το Σχήμα 10.

Κάμψη

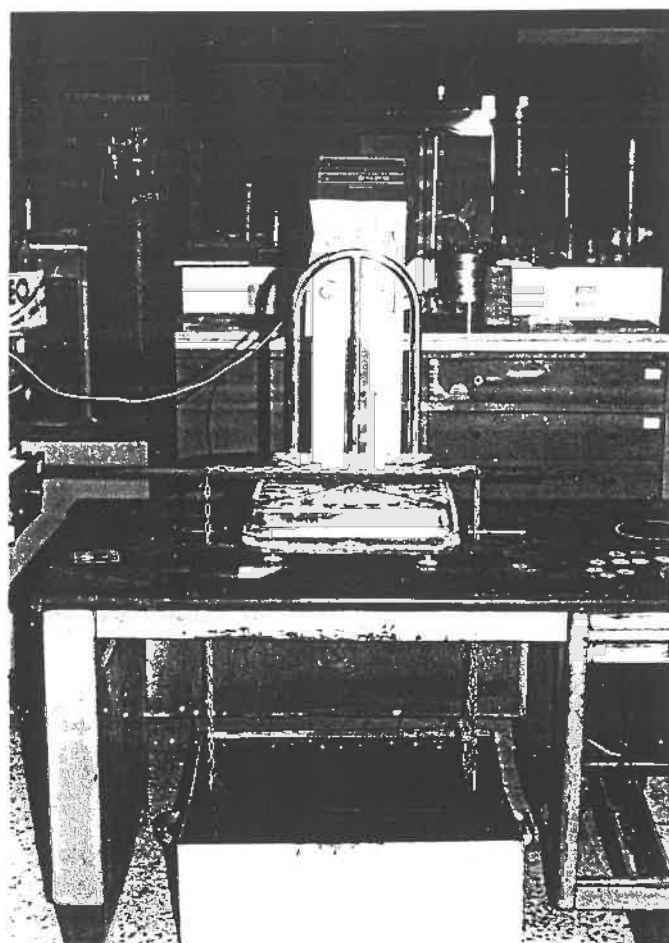
Η κρίσιμη ένταση σε μιά πλάκα από σκυρόδεμα αναπτύσσεται λόγω κάμψης, υπό τα φορτία των τροχών των διερχόμενων οχημάτων αφενός και την διαφορά θερμοκρασίας καθ' ύψος της διατομής αφετέρου. Για το λόγο αυτό η αντοχή σε κάμψη του σκυροδέματος έχει υιοθετηθεί σαν μια αντιπροσωπευτική του ιδιότητα για την μελέτη έργων οδοποιίας από σκυρόδεμα.

Στην δοκιμή αυτή ένα πρίσμα διαστάσεων 10 X 10 X 50 cm, στηρίζεται σε ένα άνοιγμα 45cm και υπόκειται σε κάμψη υπό φορτίο που εφαρμόζεται στο κέντρο του ανοίγματος [21].

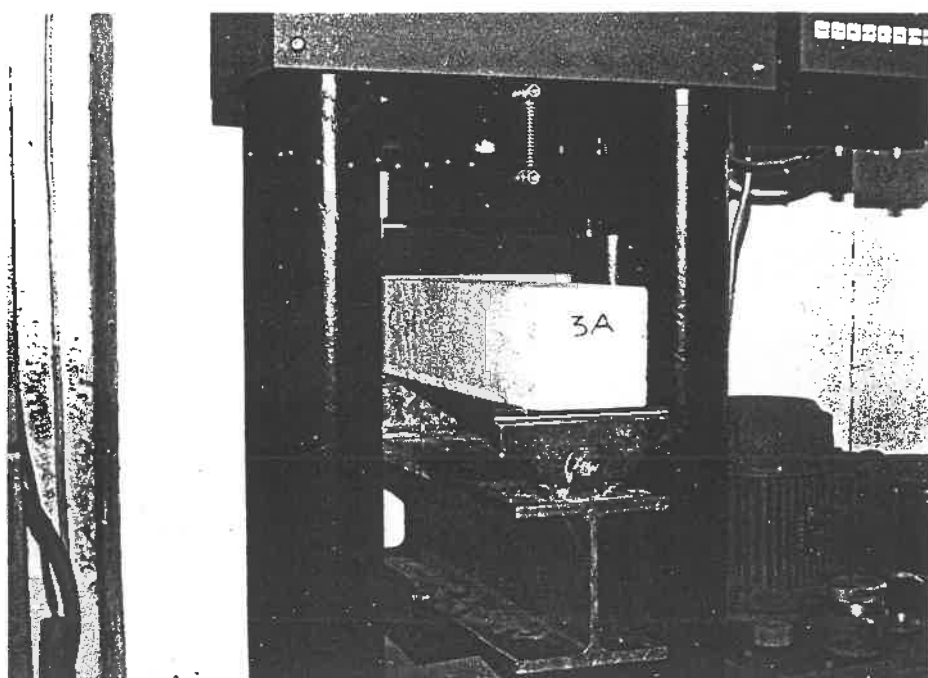
Προκειμένου να εκτελεσθεί η δοκιμή τα πρισματικά δοκίμια εξάγονταν από τη δεξαμενή συντήρησης και αφήνονταν να στεγνώσουν για περίπου μισή ώρα. Στη συνέχεια γινόταν ο προσδιορισμός του φαινομένου ειδικού τους βάρους. Στην φωτογραφία 11 φαίνεται η διάταξη που χρησιμοποιήθηκε. Το δοκίμιο μπαίνει στο καλάθι και ζυγίζεται στον αέρα αρχικά και μέσα στο νερό στη συνέχεια. Το ειδικό του βάρος υπολογίζεται σύμφωνα με τη σχέση

$$\frac{(\text{Βάρος στον αέρα})}{(\text{Βάρος στον αέρα}) - (\text{Βάρος στο νερό})}$$

Τα δοκίμια αφήνονταν και πάλι να στεγνώσουν. Ακολουθούσε η τοποθέτηση του δοκιμίου στο ειδικό εξάρτημα της μηχανής θλίψης όπως φαίνεται στη φωτογραφία 12. Ο χειριστής εφάρμοζε επιμελώς το φορτίο και στη συνέχεια το δοκίμιο φορτίζονταν μέχρι θραύσης



Φωτογραφία 11. Διάταξη ζύγισης δοκιμίων



Φωτογραφία 12. Διάταξη για την εκτέλεση της δοκιμής κάμψης πρίσματος με φόρτιση στο κέντρο του ανοίγματος.

από τη μηχανή θλίψης με σταθερή ταχύτητα 10KN/S.

Στη Φωτογραφία 13. φαίνεται ένα πρίσμα μετά τη θραύση. Σημειώνεται ότι τα δοκίμια του μίγματος D στις ηλικίες των 28 και 60 ημερών έδωσαν αντοχές μικρότερες από την ελάχιστη τιμή του φορτίου που ήταν δυνατόν να καταγράψει η μηχανή θλίψης και που ήταν 2KN.

Στο τέλος υπολογίσθηκε το μέγεθος αντοχή σε εφελκυσμό από κάμψη σύμφωνα με τη σχέση $R_F = \frac{3PL}{2bd^2}$ όπου

P το ελκυστικό φορτίο σε Newton.

L το άνοιγμα των στηρίξεων του πρίσματος ίσο με 450mm.

b & d το πλάτος και το ύψος αντίστοιχα του πρίσματος σε mm.

Σχόλια πάνω στη δοκιμή σε κάμψη

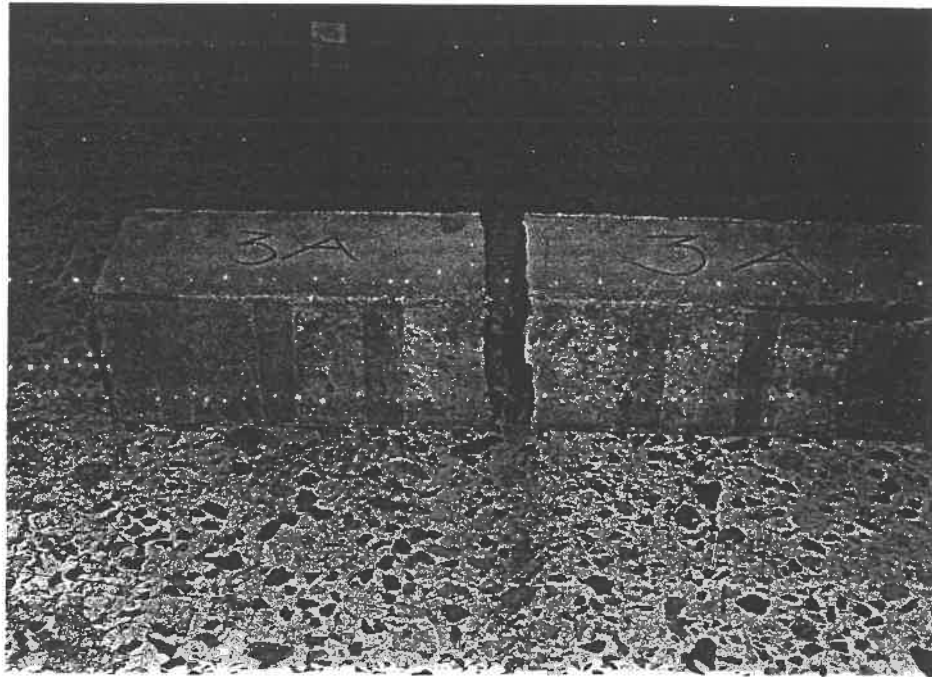
Ο απευθείας προσδιορισμός της εφελκυστικής αντοχής του σκυροδέματος συναντά ορισμένες πρακτικές δυσκολίες όπως η αποφυγή της έκκεντρης επιβολής του φορτίου, και η συγκέντρωση τάσεων στις περιοχές όπου οι αρπάγες εφαρμόζουν το φορτίο στο δοκίμιο. Η δοκιμή σε κάμψη είναι μία έμμεση μέθοδος προσδιορισμού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

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

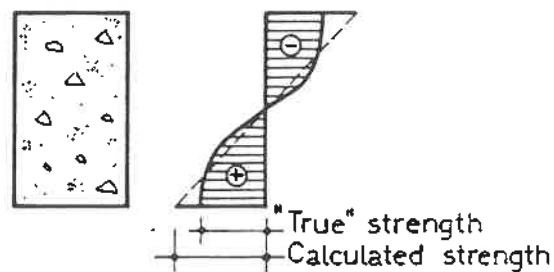
Γιὰ τους επόμενους σημαντικούς λόγους η αντοχή σε εφελκυσμό λόγω κάμψης προκύπτει μεγαλύτερη από την πραγματική εφελκυστική αντοχή του υλικού.

Υπάρχει σημαντική απόκλιση μεταξύ της υποτιθέμενης σαν γραμμικής και της πραγματικής κατανομής των τάσεων στην περιοχή της θραύσης όπως παριστάνεται στο Σχήμα 14.

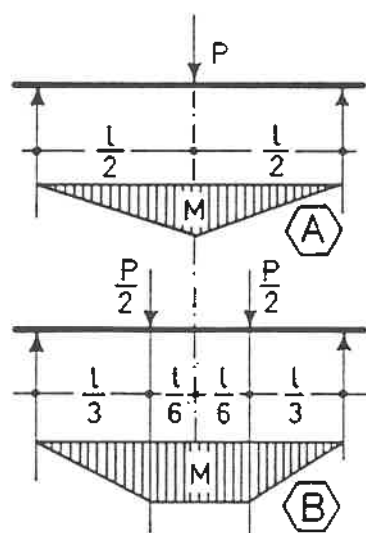
Επιπλέον στην δοκιμή κάμψης η μέγιστη τάση που αναπτύσσεται στην ακρότατη ίνα εμφανίζεται αυξημένη σε σύγκριση με την αντοχή



Φωτογραφία 13. Πρισματικό δοκίμιο για προσδιορισμό της καμπτικής αντοχής μετά τη δοκιμή



Σχήμα 14. Υποτιθέμενη και πραγματική κατανομή των τάσεων σε ένα πρίσμα από σκυρόδεμα που υποβάλλεται σε κάμψη [13]



Σχήμα 15. Διατάξεις φόρτισης για τη δοκιμή σε κάμψη του σκυροδέματος [13]

σε μονοαξονικό εφελκυσμό διότι η διάδοση κάποιας ρωγμής παρεμποδίζεται από το λιγότερο εντεινόμενο υλικό που βρίσκεται στην περιοχή του ουδέτερου άξονα πράγμα που δεν συμβαίνει στην περίπτωση της μονοαξονικής δοκιμής.

Ακόμη αξιοσημείωτη είναι η πιθανότητα της κατανομής ασθενέστερων σημείων του υλικού μέσα στην υψηλά εντεινόμενη ζώνη. Στον καθαρό εφελκυσμό το ασθενέστερο σημείο, οπουδήποτε και αν βρίσκεται αυτό θα σηματοδοτήσει την έναρξη της διαδικασίας της αστοχίας, καθώς όλα τα σημεία του δοκιμίου υπόκεινται στην ίδια μέγιστη τάση. Αντίθετα, στην κάμψη μόνο τα σημεία εκείνα που βρίσκονται μέσα ή κοντά στην ακραία ίνα μπορεί να είναι κρίσιμα και καθώς τα σημεία αυτά αντιπροσωπεύουν μόνο ένα μικρό ποσοστό του όγκου του δοκιμίου, η πιθανότητα να είναι το ασθενέστερο σημείο συγχρόνως αυτό που εντείνεται περισσότερο είναι μικρότερη από ότι στην δοκιμή καθαρού εφελκυσμού.

Ο τελευταίος από τους παραπάνω λόγους εξηγεί επίσης γιατί η εφελκυστική αντοχή λόγω κάμψης προκύπτει σημαντικά υψηλότερη κατά την δοκιμή της κάμψης ενός σημείου από ότι κατά την κάμψη δύο σημείων (περίπου κατά 22% [12]). Κατά την κάμψη ενός σημείου αναπτύσσεται μία μέγιστη ροπή στο μέσο του ανοίγματος της δοκού (Σχήμα 15.A) και υπό αυτές τις συνθήκες θα επέλθει θραύση όταν η τάση στο μέσον ή στην άμεση γειτονιά του μέσου φθάσει την εφελκυστική αντοχή του υλικού. Κατά την κάμψη δύο σημείων αναπτύσσεται η ίδια μέγιστη ροπή μεταξύ των φορτίων (Σχήμα 15.B) και η θραύση θα εμφανιστεί στο ασθενέστερο τμήμα του μέρους της δοκού που υπόκειται στη μέγιστη καμπτική ροπή. Είναι πολύ πιθανό ότι το μέρος αυτό, που συνήθως είναι το ένα τρίτο του ανοίγματος, θα περιέχει τμήματα που είναι ασθενέστερα από την μεσαία διατομή ή την άμεση γειτονιά της. Παρόλο ότι η κάμψη δύο σημείων προσεγγίζει καλύτερα την πραγματική κάμψη μιάς πλάκας

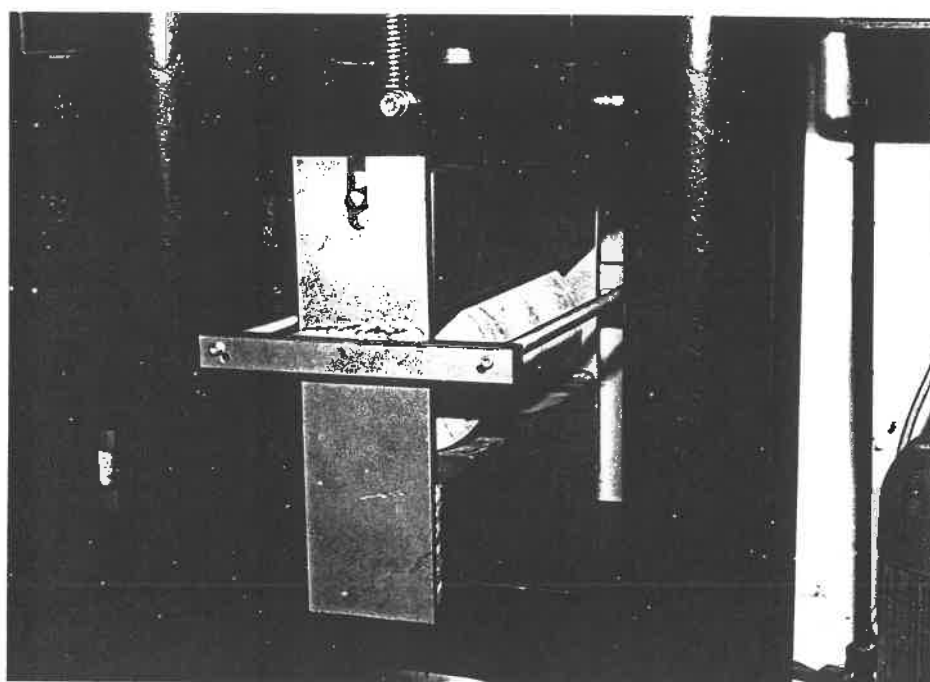
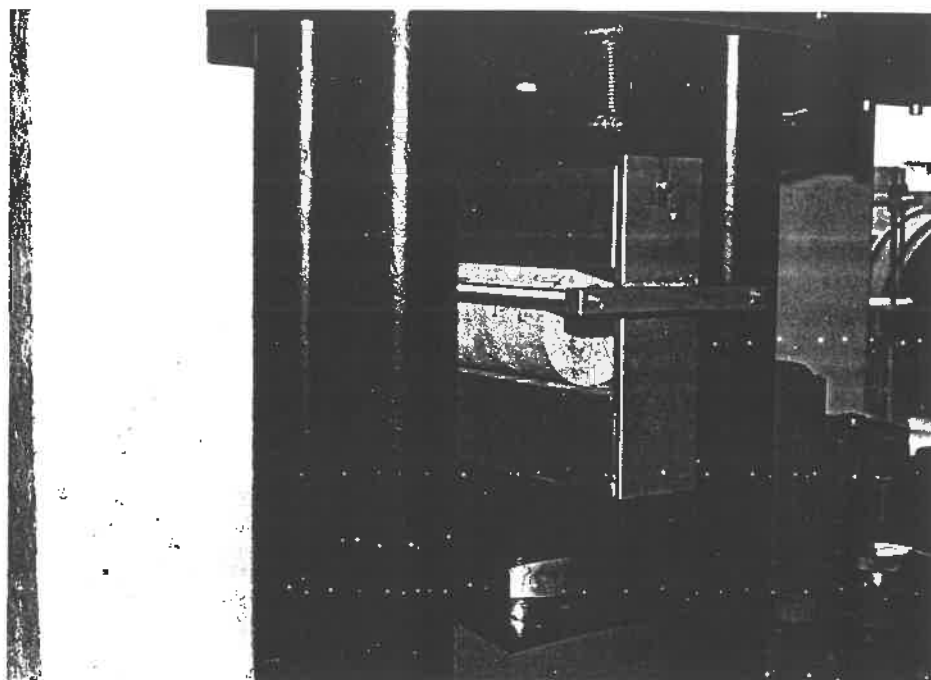
από σκυρόδεμα απ'ότι η κάμψη ενός σημείου και συνεπώς καλό είναι να προτιμάται όταν αυτό είναι δυνατόν, στην εργασία αυτή η δοκιμή της κάμψης έγινε με ένα φορτίο στο μέσο της δοκού καθώς το εργαστήριο ήταν εξοπλισμένο γι'αυτή μόνο τη δοκιμή.

Διάρρηξη

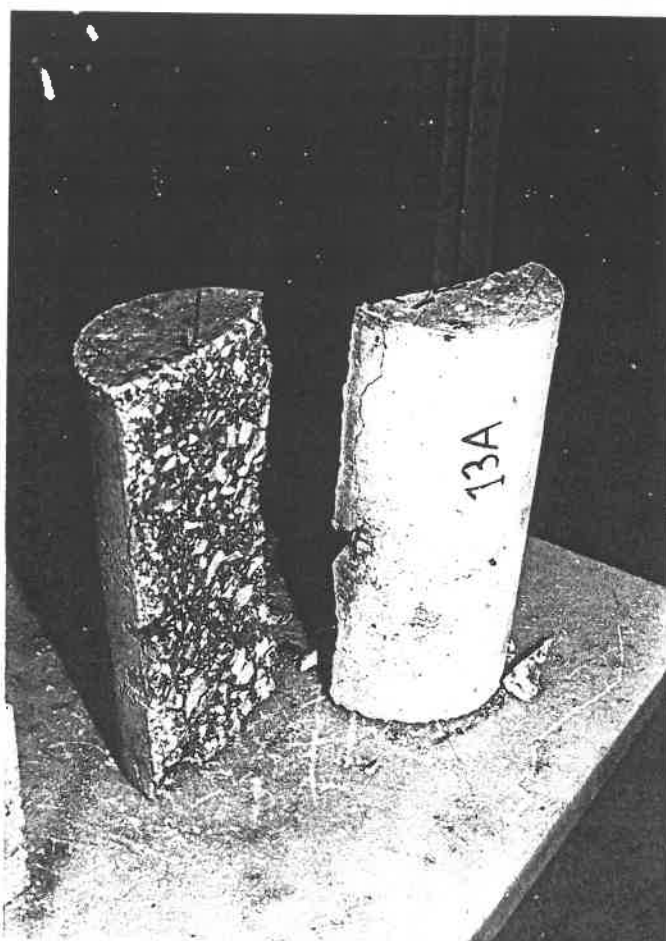
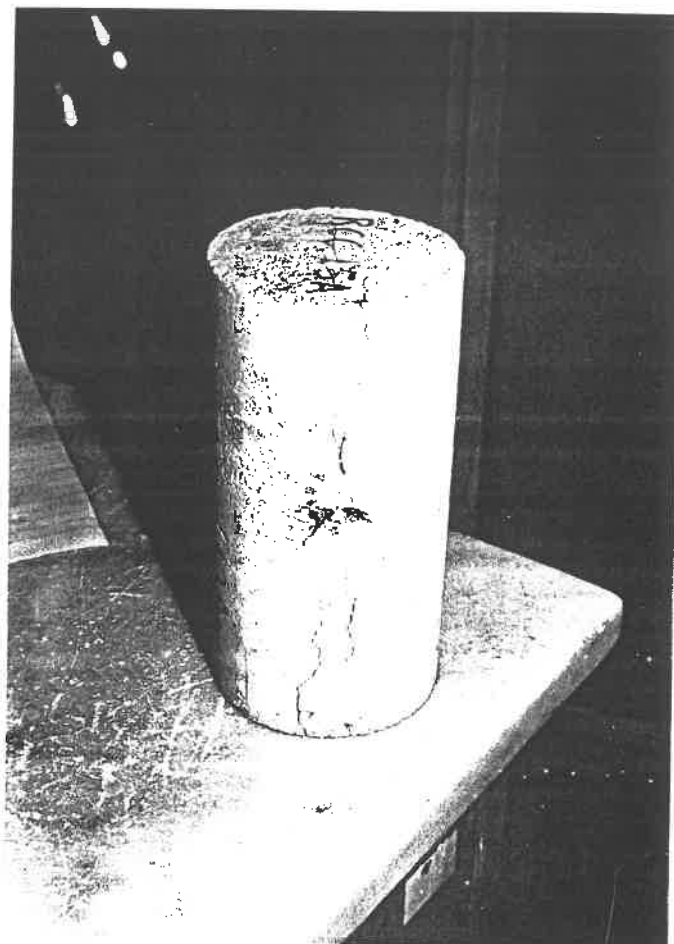
Σκοπός της δοκιμής σε διάρρηξη είναι η εύρεση της αντοχής σε εφελκυσμό από διάρρηξη και στη συνέχεια η εκτίμηση, βάσει αυτού του μεγέθους, της εφελκυστικής αντοχής του υλικού.

Σ'αυτή τη δοκιμή ένας κύλινδρος από σκυρόδεμα διαστάσεων 10 X 20 cm τοποθετείται με τον άξονά του οριζόντιο στη μηχανή θλίψης και φορτίζεται μεταξύ δύο οριζόντων καλύβδινων πλακών έως ότου εμφανιστεί αστοχία σε διάρρηξη κατά μήκος της κατακόρυφης διαμέτρου.

Αρχικά εξάγονταν τα κυλινδρικά δοκίμια από τη δεξαμενή συντήρησης και αφήνονταν να στεγνώσουν για περίπου μισή ώρα. Ακολουθούσε ο προσδιορισμός του ειδικού τους βάρους με τη γνωστή διαδικασία που ακολουθούνταν και στη δοκιμή της κάμψης. Τα δοκίμια αφήνονταν για ακόμη περίπου μισή ώρα να στεγνώσουν. Στη συνέχεια τοποθετούνταν το δοκίμιο στο ειδικό για τη διάρρηξη εξάρτημα που συνόδευε τη μηχανή θλίψης και που εξασφάλιζε την φόρτιση κατά δύο αντιδιαμετρικές γενέτειρες, και ολόκληρη η διάταξη τοποθετούνταν μεταξύ των πλακών της μηχανής θλίψης (φωτογραφίες 16.,17). Στις δοκιμές που εκτελέστηκαν δεν χρησιμοποιήθηκαν παρεμβλήματα και οι πλάκες της διάταξης θλίψης έρχονταν απ'ευθείας σε επαφή με το δοκίμιο. Ακολουθούσε επιμελής εφαρμογή του φορτίου το οποίο αφηνόταν κατόπιν να αυξάνεται με σταθερή ταχύτητα φόρτισης 10KN/S έως ότου το δοκίμιο θραυστεί. Στις φωτογραφίες 18. και 19. φαίνονται κυλινδρικά δοκίμια για διάρρηξη μετά το τέλος της δοκιμής.



Φωτογραφίες 16., 17. Διάταξη της δοκιμής σε διάρρηξη κυλινδρικών δοκιμίων



Φωτογραφίες 18., 19. Κυλινδρικά δοκίμια μετά την δοκιμή τους σε διάρρηξη.

Το μέγεθος αντοχή σε εφελκυσμό από διάρρηξη υπολογίστηκε βάσει της σχέσης

$$R_s = \frac{2P}{\pi \cdot L \cdot D}$$

όπου

P το θλιπτικό φορτίο που εφαρμόζεται στον κύλινδρο σε Newton.

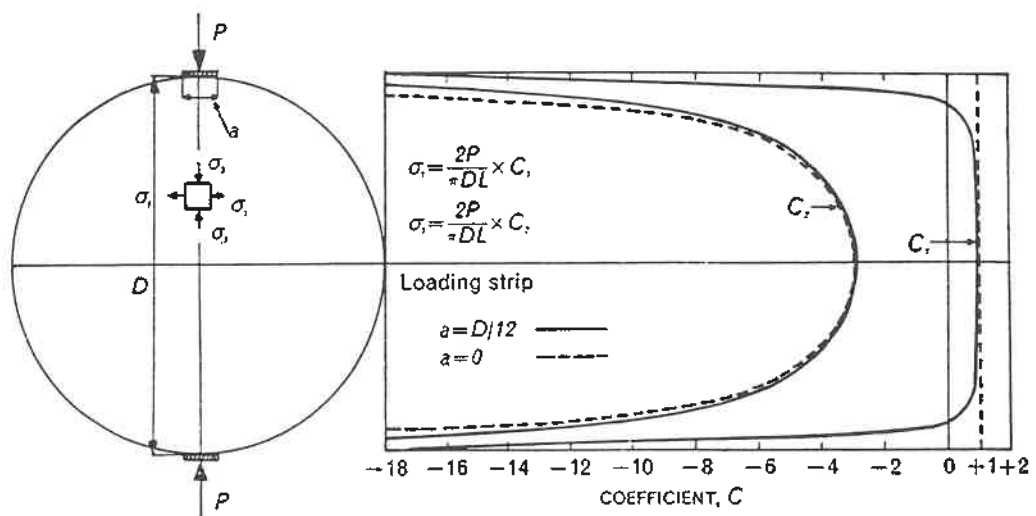
L το μήκος του κυλίνδρου σε mm

D η διάμετρος του σε mm

Σχόλια πάνω στη δοκιμή σε διάρρηξη

Με την δοκιμή σε διάρρηξη το σκυρόδεμα υποβάλλεται σε εφελκυσμό, έμμεσα, με την επιβολή ενός θλιπτικού φορτίου. Η μέθοδος συνίσταται στην επιβολή ενός θλιπτικού φορτίου κατά μήκος δύο αντιδιαμετρικών γενετειρών ενός κυλίνδρου όπως φαίνεται στο Σχήμα 20. Τότε ένα στοιχείο πάνω στην κατακόρυφη διάμετρο υποβάλλεται σε μιά κατακόρυφη θλιπτική τάση και σε μια οριζόντια εφελκυστική τάση το μέγεθος της οποίας κατά τη στιγμή της αστοχίας θεωρείται σαν η εφελκυστική αντοχή. Όπως φαίνεται στο Σχήμα 20., στην άμεση γειτονιά των δύο γενετειρών κατά τις οποίες εφαρμόζεται το φορτίο αναπτύσσονται οριζόντιες θλιπτικές τάσεις που μαζί με τις κατακόρυφες θλιπτικές τάσεις ανάλογου μεγέθους δημιουργούν ένα πεδίο διαξονικής θλίψης με αποτέλεσμα να εμποδίζεται η αστοχία σε θλίψη. Όμως μιά σχεδόν σταθερή εφελκυστική τάση αναπτύσσεται κατά τα τρία τέταρτα περίπου του ύψους του κατακόρυφου επιπέδου που ορίζεται από τις δύο γενέτειρες κατά τις οποίες φορτίζεται το δοκίμιο.

Η δοκιμή της διάρρηξης είναι εύκολο να πραγματοποιηθεί, δεν απαιτεί εξοπλισμό πέρα από αυτόν που χρησιμοποιείται στη δοκιμή της θλίψης εκτός ενδεχομένως του εξαρτήματος που εξασφαλίζει την ορθή τοποθέτηση του δοκιμίου, και το σημαντικότερο δίνει τιμές της αντοχής αντιπροσωπευτικές της αντοχής σε μονοαξονικό



Σχήμα 20. Κατανομή οριζόντιων και κατακόρυφων τάσεων κατά μήκος της κατακόρυφης διαμέτρου του δοκιμίου στην δοκιμή διάρρηξης κυλίνδρου [24]

εφελκυσμό του σκυροδέματος. Στην πραγματικότητα η εντατική κατάσταση στο κέντρο του επιπέδου διάρρηξης είναι διαξονική αποτελούμενη από κατακόρυφη θλίψη-οριζόντιο εφελκυσμό με λόγο του πρώτου προς το δεύτερο περίπου ίσο με τρία. Για το λόγο αυτό η εφελκυστική αντοχή πρέπει να είναι κατά τι μικρότερη από αυτή που θα έδινε μια δοκιμή μονοαξονικού εφελκυσμού.

Η επίδραση του μεγέθους του δοκιμίου είναι γενικά η ίδια στη διάρρηξη όπως και στον εφελκυσμό με τα μικρότερα δοκίμια να δίνουν τη μεγαλύτερη αντοχή αλλά και αποτελέσματα με μεγαλύτερη διασπορά. Η δοκιμή της διάρρηξης επηρεάζεται λιγότερο από τις συνθήκες συντήρησης του δοκιμίου γεγονός που συμβάλλει στη μεγαλύτερη ομοιομορφία των αποτελεσμάτων.

Υπάρχουν ωστόσο σοβαρές επιφυλάξεις για το αν υπάρχει κάποια απλή συσχέτιση μεταξύ της αντοχής σε διάρρηξη κυλίνδρου και της αντοχής σε μονοαξονικό εφελκυσμό. Σύμφωνα με τους Hannant, Buckley & Croft [16] η πολύπλοκη κατανομή της θλιπτικής έντασης στην άμεση γειτονιά των δύο γενετειρών κατά τις οποίες εφαρμόζεται το φορτίο στη δοκιμή της διάρρηξης, μπορεί να έχει μια αξιολογούμενη επίδραση στο φορτίο αστοχίας του κυλίνδρου και κατά συνέπεια και στην έμμεση αντοχή σε εφελκυσμό του υλικού όπως εκτιμάται από τη συνήθη ελαστική ανάλυση. Η κατανομή της έντασης όπως περιγράφηκε παραπάνω, επηρεάζει σκυροδέματα με διάφορα μεγέθη μέγιστου κόκκου αδρανούς σε διαφορετικό βαθμό και κατά συνέπεια δεν μπορεί να υπάρξει μιά απλή συσχέτιση μεταξύ της αντοχής σε διάρρηξη κυλίνδρου και της μονοαξονικής εφελκυστικής αντοχής για ένα ευρύ φάσμα σκυροδεμάτων.

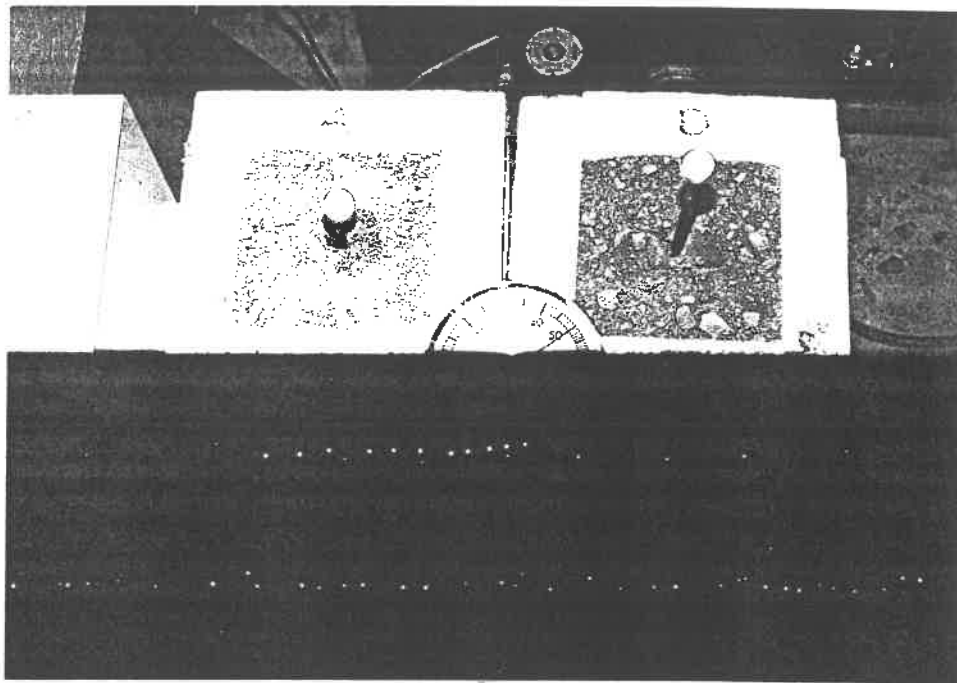
Θερμότητα ενυδάτωσης, Συστολή ξήρανσης

Με την εκτέλεση διαφόρων δοκιμών πάνω σε ειδικά για το σκοπό αυτό κατασκευασμένα δοκίμια επιχειρείται η εκτίμηση των

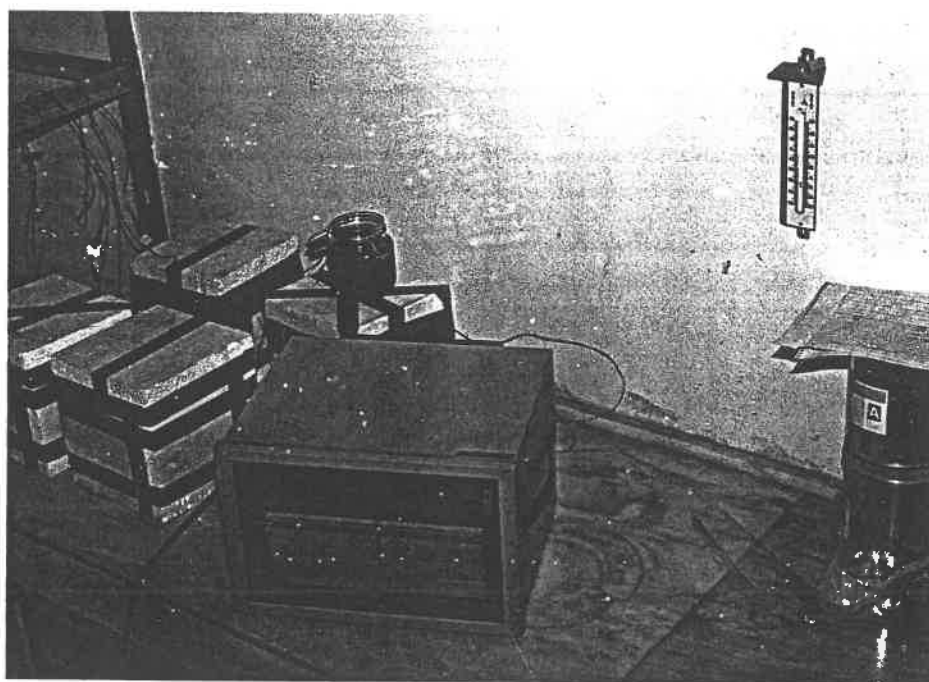
μηχανικών αντοχών ενός υλικού. Όμως η πραγματική χρησιμοποίησιμη αντοχή σ'ένα οδόστρωμα του οποίου παρεμποδίζεται η παραμόρφωση ενδέχεται να είναι σημαντικά μειωμένη λόγω εσωτερικών τάσεων που αναπτύσσονται στη μάζα του λόγω συστολής ξήρανσης ή ψύξης του. Η υπέρβαση της εφελκυστικής αντοχής του υλικού από τις εσωτερικές τάσεις έχει σαν αποτέλεσμα τη ρηγμάτωσή του. Επομένως η μελέτη της θερμότητας ενυδάτωσης και της συστολής ξήρανσης οδηγεί σε ενδιαφέροντα συμπεράσματα σε σχέση με τη συμπεριφορά του υλικού.

Προκειμένου να εκτιμηθεί η επίδραση της ιπτάμενης τέφρας στη θερμοκρασία ενυδάτωσης του Κ.Σ., έγινε καταγραφή των θερμοτήτων των 4 μιγμάτων Α, Β, Γ και Δ και του περιβάλλοντος για περισσότερες από 60 ώρες. Κατασκευάσθηκαν κύβοι από διογκωμένη πολυστερίνη πάχους 5cm (Φωτογραφία 21.), που στεγανοποιήθηκαν και έκλεισαν ερμειτικά αφού προηγουμένως τα μίγματα είχαν συμπυκνωθεί στοιχειωδώς με ραβδισμό και είχε τοποθετηθεί στο καθένα από ένα ηλεκτρόδιο. Η θερμοκρασία του περιβάλλοντος λαμβάνονταν από ένα ηλεκτρόδιο βυθισμένο σ'ένα δοχείο με λάδι. Τα ηλεκτρόδια ήταν συνδεδεμένα με θερμοκαταγραφική ηλεκτρονική συσκευή που κατέγραφε συνεχώς μετρήσεις ανά δέκα πρώτα λεπτά της ώρας. Η διάταξη φαίνεται στη Φωτογραφία 22. Με βάση τα δεδομένα της θερμοκαταγραφικής συσκευής κατασκευάσθηκε το διάγραμμα χρόνου t - θερμοκρασίας ενυδάτωσης $\Delta\theta$ (θερμοκρασία μίγματος - θερμοκρασία περιβάλλοντος).

Στο σημείο αυτό, αναφέρεται ότι η χρήση της θερμοκαταγραφικής συσκευής έλυσε το πρόβλημα της συνεχούς και ακριβούς καταγραφής για ένα μεγάλο χρονικό διάστημα των θερμοκρασιών. Αρχικά το πείραμα εκτελέσθηκε με τη χρήση θερμομέτρων που βυθίστηκαν στα μίγματα του σκυροδέματος. Οι θερμοκρασίες καταγράφονταν ανά μισή ώρα, και στην συνέχεια σε αραιότερα χρονικά διαστήματα, αλλά είναι φανερό ότι αυτό ήταν δυνατό να γίνεται μόνο μέσα



Φωτογραφία 21. Κύβοι από διογκωμένη πολυστερίνη για την καταγραφή της θερμότητας ενυδάτωσης των μιγμάτων



Φωτογραφία 22. Διάταξη για την καταγραφή των θερμοτήτων ενυδάτωσης των μιγμάτων σκυροδέματος.

στα πλαίσια του ωραρίου λειτουργίας του εργαστηρίου με αποτέλεσμα την απώλεια σημαντικού πλήθους χρήσιμων στοιχείων. Επιπλέον τα χρησιμοποιούμενα θερμόμετρα ήταν μικρής ακρίβειας. Στη Φωτογραφία 21. φαίνεται η διάταξη του πειράματος. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αναφέρονται στο Παράρτημα.

Καταβλήθηκε επίσης προσπάθεια να εκτιμηθούν οι συστολές ξήρανσης των διαφόρων μιγμάτων με το χρόνο. Για το σκοπό αυτό κατασκευάσθηκε αριθμός πρισμάτων διαστάσεων 16X16X285mm και επιχειρήθηκε να μετρηθούν οι βραχύνσεις τους σε διάφορες χρονικές στιγμές. Οι μετρήσεις αυτές κρίνονται σαν αναξιόπιστες καθώς δεν δίνουν αξιόλογες διαφορές για τα μήκη των δοκιμίων ενώ παρουσιάζονται και παράδοξα αποτελέσματα (μεταβολές μήκους της ράβδου Invar). Και τα στοιχεία του πειράματος αυτού αναφέρονται στο Παράρτημα.

Σχόλια σχετικά με τη θερμότητα ενυδάτωσης και τη συστολή ξήρανσης

Η εμφάνιση της θερμότητας ενυδάτωσης και της συστολής ξήρανσης προκαλεί στη μάζα του σκυροδέματος την ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων. Το σκυρόδεμα που παραμορφώνεται ελεύθερα μεταβάλλει τον όγκο του χωρίς να εμφανίζει ένταση. Όταν η παραμόρφωσή του παρεμποδίζεται η ένταση που προκύπτει πρέπει να επιφέρει επαρκή παραμόρφωση ώστε να εξισορροπηθεί η αλλαγή του όγκου. Εάν η παραμόρφωση αυτή είναι εφελκυστική και υπερβαίνει την ικανότητα παραμόρφωσης του υλικού τότε θα εμφανιστούν ρωγμές. Παραμορφώσεις αυτής της μορφής αναπτύσσονται στο σκυρόδεμα από την μεταβολή όγκου που προκαλείται από συστολή ξήρανσης ή από ψύξη του. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ικανότητα παραμόρφωσης υπό εσωτερικές τάσεις είναι το είδος του αδρανούς, τα χαρακτηριστικά του σχήματός τους (γωνιώδη θραυστά ή φυσικά στρογγυλά) και η περιεκτικότητα σε τσιμέντο. Η αύξηση της περιεκτικότητας σε τσιμέντο

αυξάνει την ικανότητα παραμόρφωσης του σκυροδέματος διότι αυξάνει την εφελκυστική του αντοχή· όμως αυτή η βελτίωση αντισταθμίζεται εξ'ολοκλήρου από προβλήματα διάχυσης θερμότητας που προκαλούνται από την αύξηση της θερμότητας ενυδάτωσης λόγω μεγαλύτερης περιεκτικότητας σε τσιμέντο.

Ένα οδόστρωμα από σκυρόδεμα δέχεται την επίδραση της θερμοκρασίας με δύο τρόπους. Εσωτερικά εκλύεται η θερμότητα ενυδάτωσης ανεβάζοντας την θερμοκρασία. Εξωτερικά η πλάκα του οδοστρώματος ψύχεται. Αναπτύσσονται έτσι εφελκυστικές τάσεις στην επιφάνεια της πλάκας που είναι δυνατόν να οδηγήσουν σε ρηγμάτωση.

Η ικανότητα παραμόρφωσης υπό εσωτερικές τάσεις του Κ.Σ. προκύπτει μικρότερη καθώς χρησιμοποιούνται μικρότερες περιεκτικότητες σε τσιμέντο και επιπλέον συνήθως ένα μέρος του αντικαθίσταται από ιπτάμενη τέφρα ή ποζολάνη. Αυτή η μικρότερη αντοχή αντισταθμίζεται τις πρώτες ώρες από την μείωση των εσωτερικών τάσεων που αναπτύσσονται, λόγω χαμηλότερης θερμοκρασίας ενυδάτωσης αφού αφ'ενός μεν το τσιμέντο είναι λιγότερο και αφ'ετέρου η ιπτάμενη τέφρα σαν ποζολάνη έχει μειωμένη θερμότητα ενυδάτωσης [5].

Οι μεταβολές όγκου που οφείλονται σε απώλεια νερού ή συστολή ξήρανσής είναι σημαντικά μικρότερες στο Κ.Σ. διότι περιέχει λιγότερο νερό από το συμβατικό σκυρόδεμα.

2.5. Αποτελέσματα

Τα αποτελέσματα της δοκιμής σε θλίψη για κάθε μίγμα φαίνονται στους Πίνακες 1.2.3.

Στον Πίνακα 1. οι τιμές της θλίψης αναφέρονται στην θραύση των δοκιμίων στις επτά ημέρες ενώ στους Πίνακες 2. και 3. αναφέρονται στην θραύση των 28 και 60 ημερών αντίστοιχα.

Το πλήθος των δοκιμίων από κάθε μίγμα (A,B,C,D) είναι τέσσερα για κάθε ημέρα θραύσης (7, 28, 60). Εξαίρεση αποτελεί το μίγμα D όπου από αυτό το μίγμα δεν υπάρχουν τιμές της θλίψης από θραύσεις των δοκιμίων για τις επτά ημέρες, ενώ για τις 28 και 60 ημέρες παρουσιάζονται αντίστοιχα τέσσερις τιμές θλίψης δοκιμίων.

Στους ίδιους πίνακες, αναγράφονται ο μέσος όρος των τιμών της θλίψης των δοκιμίων για κάθε μίγμα καθώς και η τυπική απόκλιση των τιμών της αντοχής. Οι τιμές των αντοχών σε κάμψη αναγράφονται επίσης στους Πίνακες 1,2. και 3.

Για την κάμψη το πλήθος των δοκιμίων ανά μίγμα (A,B,C,D) είναι δύο για κάθε ημέρα θραύσης (7, 28 και 60 ημέρες).

Για το μίγμα D, δεν υπάρχουν τιμές της αντοχής σε κάμψη για τις επτά ημέρες, ενώ για τις 28 και 60 ημέρες οι τιμές της αντοχής είναι πολύ μικρές. Επίσης για τις τιμές της αντοχής σε κάμψη στους ίδιους πίνακες αναγράφονται οι μέσοι όροι για κάθε μίγμα.

Τέλος για την Διάρρηξη στους Πίνακες 1.2 και 3. αναγράφονται οι τιμές της αντοχής τριών δοκιμιων για κάθε μίγμα (A, B, C και D) ανά ημέρα θραύσης (7,28 και 60 ημέρες).

Για το μίγμα D στην θραύση των επτά ημερών δεν υπάρχουν τιμές αντοχής των δοκιμίων ενώ για τις 28 και 60 ημέρες υπάρχουν τιμές για την αντοχή σε διάρρηξη.

Στους Πίνακες 1,2. και 3. αναγράφονται οι μέσοι όροι των τιμών της αντοχής σε διάρρηξη για κάθε μίγμα καθώς και η τυπική τους απόκλιση.

Τέλος για κάθε δοκίμιο από τα τέσσερα μίγματα (A,B,C,D) που υποβλήθηκε σε δοκιμή θραύσης αναγράφεται το ειδικό του βάρος και στους τρεις Πίνακες 1.2. και 3.

Πίνακες

		ΤΙΜΕΣ 7 ΗΜΕΡΩΝ				
		ΔΟΚΙΜΙΟ	ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ (t/m ³)	ΑΝΤΟΧΗ (MPa)	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
A	ΚΑΜΨΗ	3	2,46	6,55	6,45	
		2	2,48	6,35		
	ΘΛΙΨΗ	3	2,46	43,00	42,49	0,7664
		3	2,46	42,51		
		2	2,48	43,05		
		2	2,48	41,40		
B	ΔΙΑΡΡΗΞΗ	10	2,48	2,05	3,13 (3,67)	0,9358
		14	2,49	3,70		
		15	2,48	3,64		
	ΚΑΜΨΗ	4	2,42	5,33	5,43	
		1	2,47	5,53		
	C	ΘΛΙΨΗ	4	2,42	34,97	35,41
4			2,42	36,10		
1			2,47	34,71		
1			2,47	35,85		
ΔΙΑΡΡΗΞΗ		15	2,46	3,12	3,24	0,3787
		13	2,47	2,93		
	14	2,44	3,66			
D	ΚΑΜΨΗ	4	2,39	3,11	3,08	
		3	2,46	3,04		
	ΘΛΙΨΗ	4	2,39	25,61	28,37	3,8905
		4	2,39	24,46		
		3	2,46	31,40		
		3	2,46	32,02		
ΔΙΑΡΡ.	9	2,44	2,33	2,29	0,1387	
	11	2,40	2,41			
	13	2,49	2,14			
E	ΚΑΜΨΗ					
	ΘΛΙΨΗ					
F	ΔΙΑΡΡΗΞΗ					

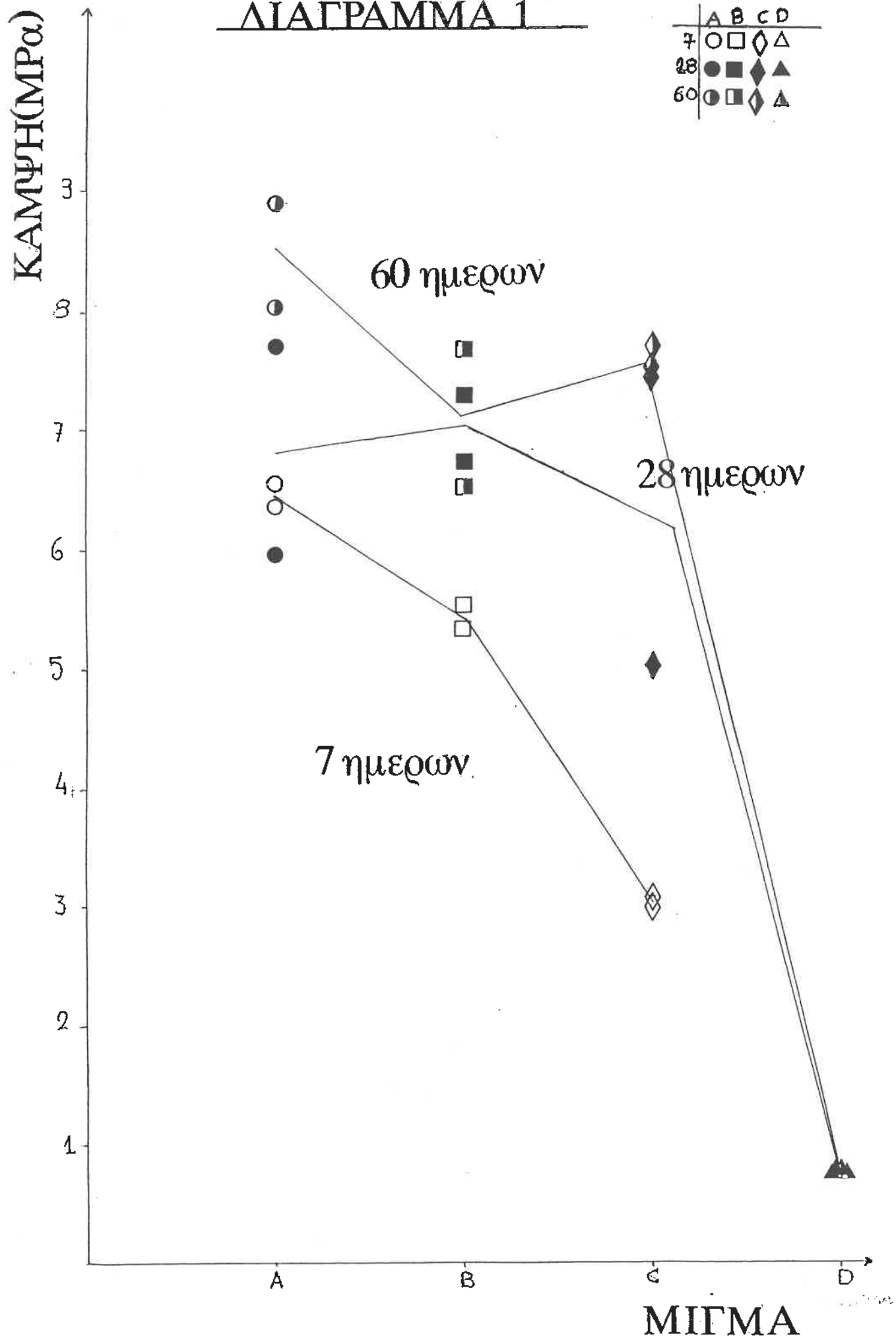
		ΤΙΜΕΣ 28 ΗΜΕΡΩΝ				
		ΔΟΚΙΜΙΟ	ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ (t/m ³)	ΑΝΤΟΧΗ (MPa)	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ
Α	ΚΑΜΨΗ	6	2,46	7,69	6,82	
		5	2,48	5,94		
	ΘΛΙΨΗ	6	2,46	50,84	48,95	1,7720
		6	2,46	48,84		
		5	2,48	49,51		
		5	2,48	46,60		
		13	2,55	4,58		
	ΔΙΑΡΡΗΞΗ	12	2,48	4,71	4,48	0,2987
		8	2,50	4,14		
		ΚΑΜΨΗ	5	2,45	6,75	
6	2,42		7,29			
Β	ΘΛΙΨΗ	5	2,45	40,12	40,21	2,5165
		5	2,45	43,37		
		6	2,42	37,21		
		6	2,42	40,14		
	ΔΙΑΡΡ.	12	2,50	4,05	3,98	0,37
		10	2,45	3,58		
		9	2,42	4,31		
	ΚΑΜΨΗ	5	2,44	7,49	6,28	
		6	2,43	5,06		
	C	ΘΛΙΨΗ	5	2,44	39,40	37,09
5			2,44	40,36		
6			2,43	35,77		
6			2,43	32,82		
ΔΙΑΡΡΗΞΗ		14	2,53	3,73	3,74	0,2802
		12	2,49	4,03		
	7	2,45	3,47			
D	ΚΑΜΨΗ	5	2,32	0 — 1.35	0 — 1.35	
		6	2,29	0 — 1,35		
	ΘΛΙΨΗ	5	2,32	5,88	6,11	1,1070
		5	2,32	4,75		
		6	2,29	6,40		
		6	2,29	7,41		
		13	2,33	0,49		
	ΔΙΑΡΡΗΞΗ	12	2,33	0,53	0,52	0,0264
		15	2,33	0,54		

		ΤΙΜΕΣ 60 ΗΜΕΡΩΝ					
		ΔΟΚΙΜΙΟ	ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ (t/m ³)	ΑΝΤΟΧΗ (MPa)	ΜΕΣΟΣ ΟΡΟΣ	ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ	
A	ΚΑΜΨΗ	4	2,47	8,91	8,47		
		1	2,44	8,03			
	ΘΛΙΨΗ	4	2,47	49,51	49,32	2,6091	
		4	2,47	52,02			
		1	2,44	49,97			
		1	2,44	45,76			
ΔΙΑΡΡΗΞΗ	7	2,51	-	4,06			
	9	2,49	4,59				
	11	2,48	3,53				
B	ΚΑΜΨΗ	2	2,44	6,55	7,12		
		3	2,48	7,70			
	ΘΛΙΨΗ	2	2,44	48,90	49,68	1,7214	
		2	2,44	49,46			
		3	2,48	52,15			
		3	2,48	48,22			
	ΔΙΑΡΡ.	7	2,49	3,15	3,72	0,5338	
		8	2,44	4,21			
		11	2,49	3,79			
	ΚΑΜΨΗ	2	2,45	7,63	7,56		
		1	2,45	7,49			
	C	ΘΛΙΨΗ	2	2,45	48,26	46,81	2,7487
			2	2,45	49,63		
			1	2,45	43,35		
1			2,45	46,01			
ΔΙΑΡΡ.		10	2,46	4,11	4,13	0,2654	
		8	2,41	3,87			
		15	2,42	4,40			
D	ΚΑΜΨΗ	2	2,29	0 — 1.35	0 — 1,35		
		3	2,31	0 — 1.35			
	ΘΛΙΨΗ	2	2,29	5,90	6,41	0,8026	
		2	2,29	5,63			
		3	2,31	7,40			
		3	2,31	6,70			
	ΔΙΑΡΡΗΞΗ	8	2,31	0,75	0,65	0,1193	
		10	2,31	0,69			
		7	2,29	0,52			

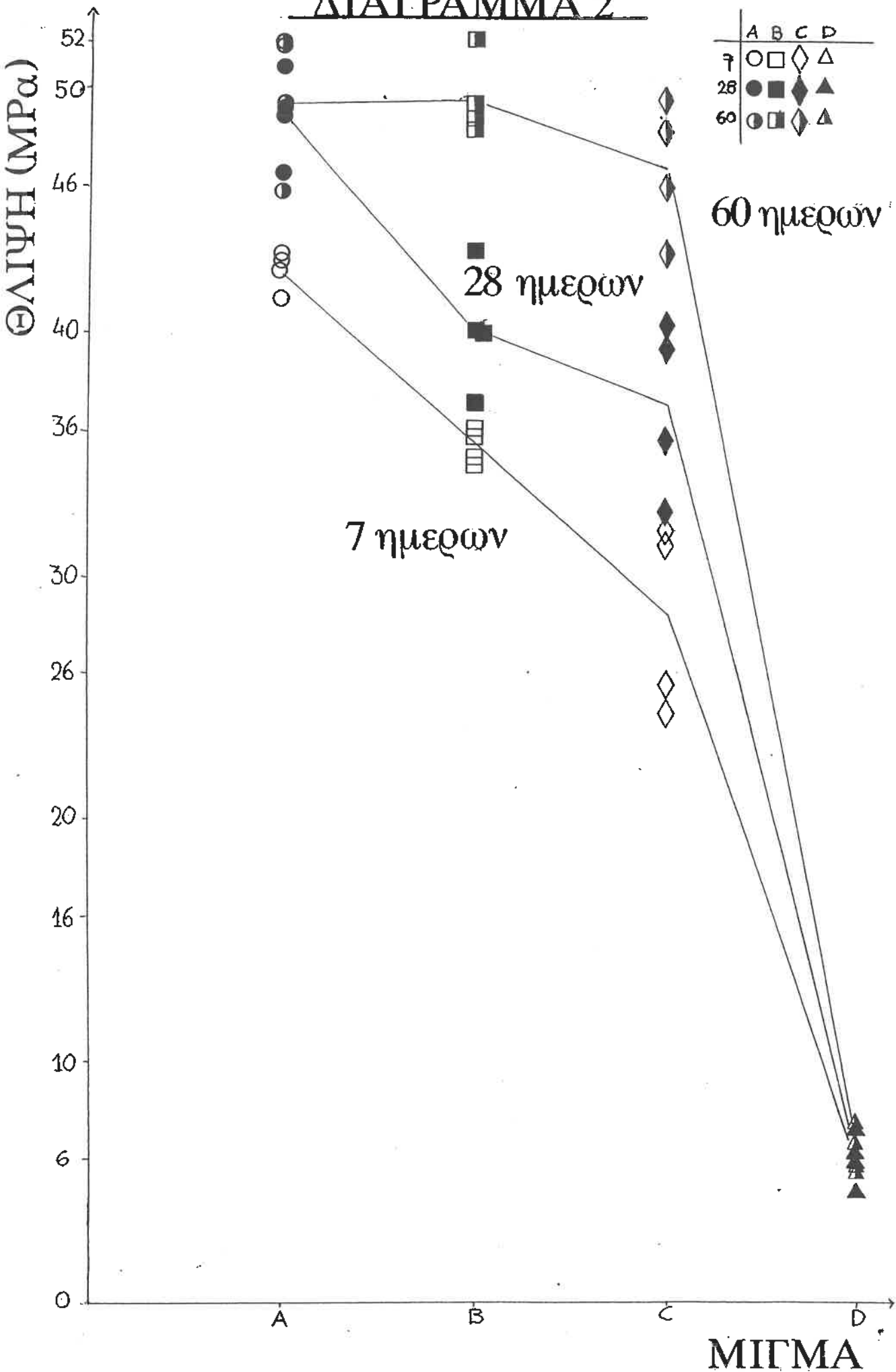
Διαγράμματα

ΛΙΑΓΡΑΜΜΑ 1

	A	B	C	D
7	○	□	◇	△
28	●	■	◆	▲
60	◉	◐	◑	◒

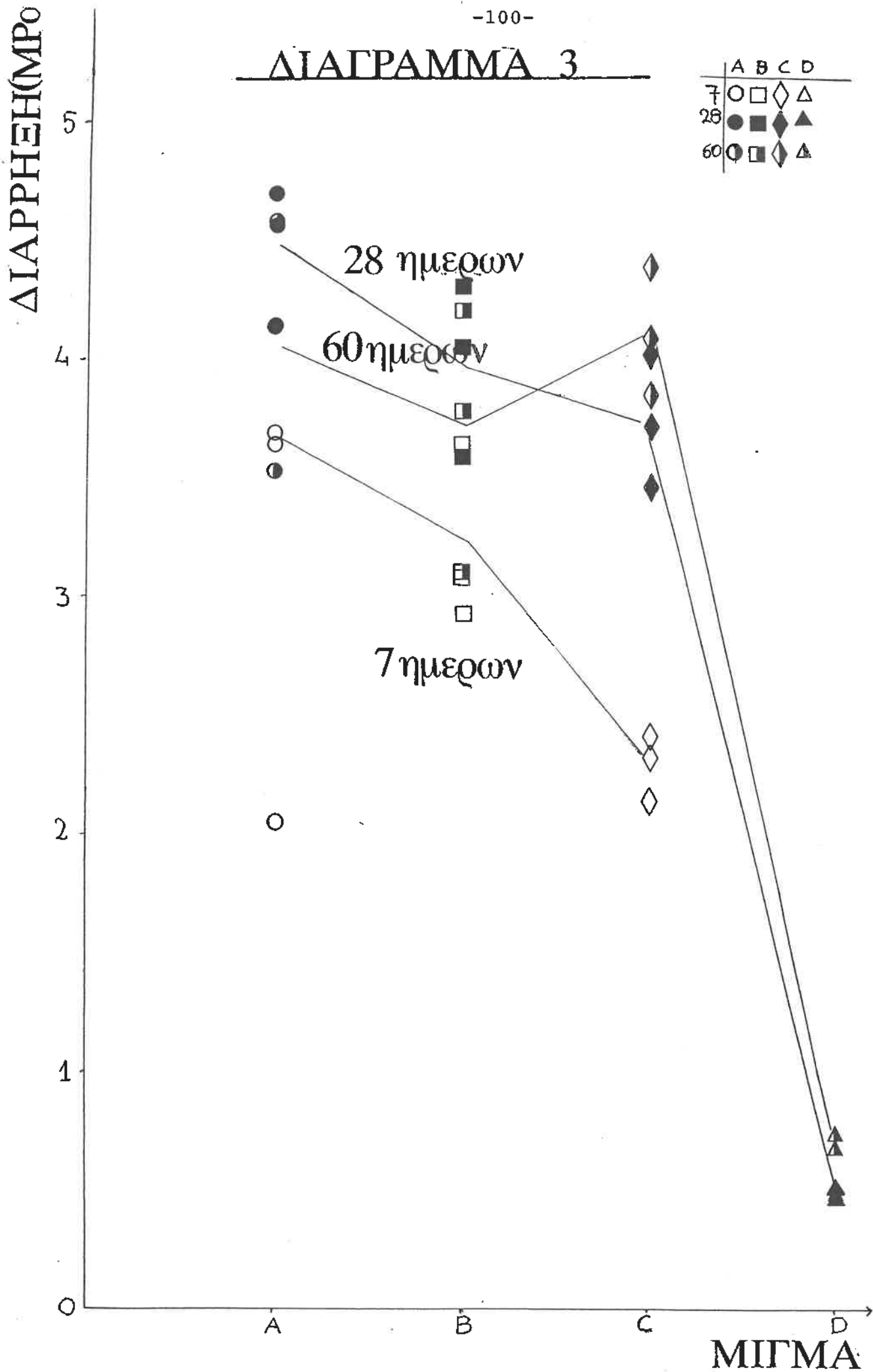


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2

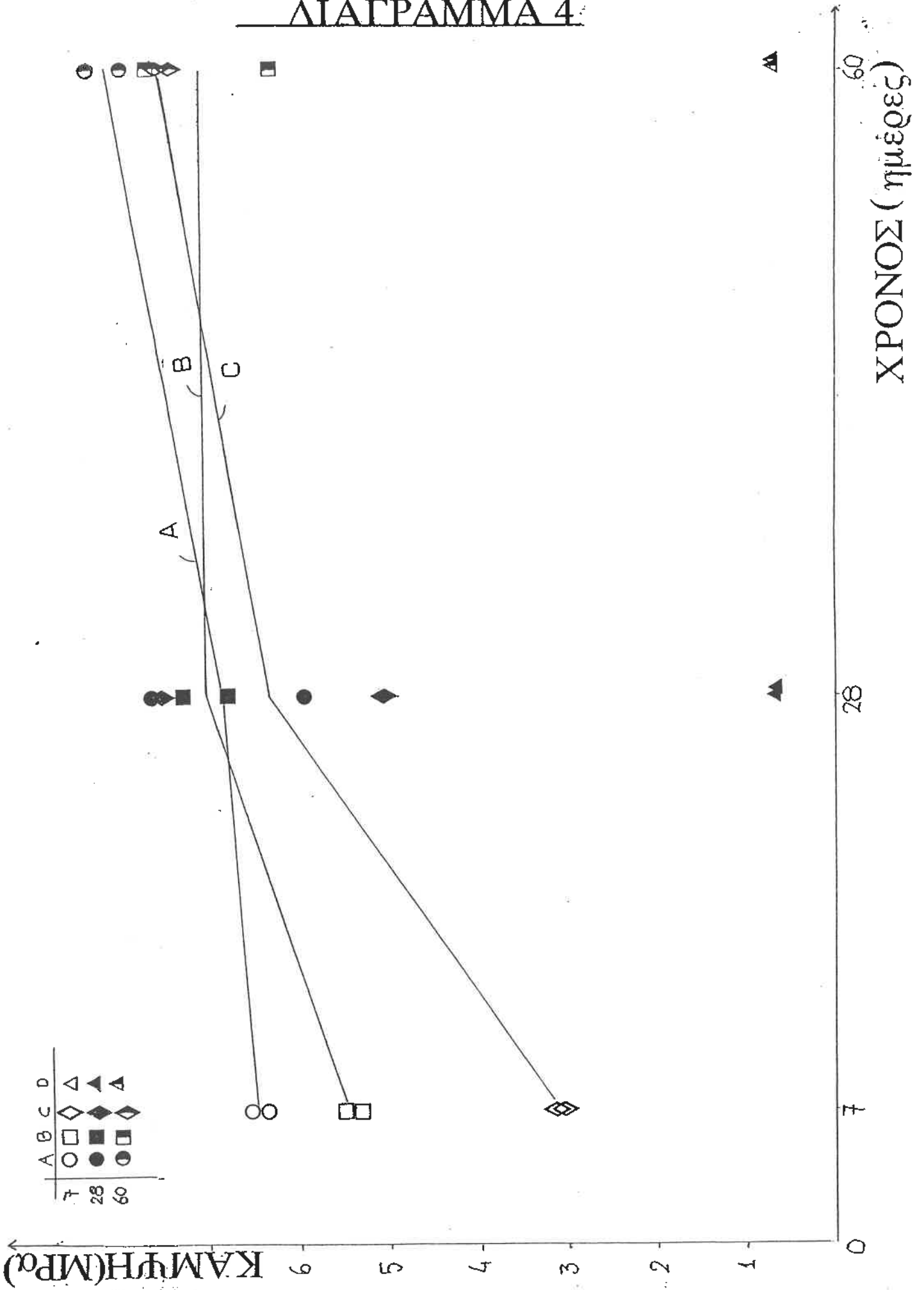


ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 3

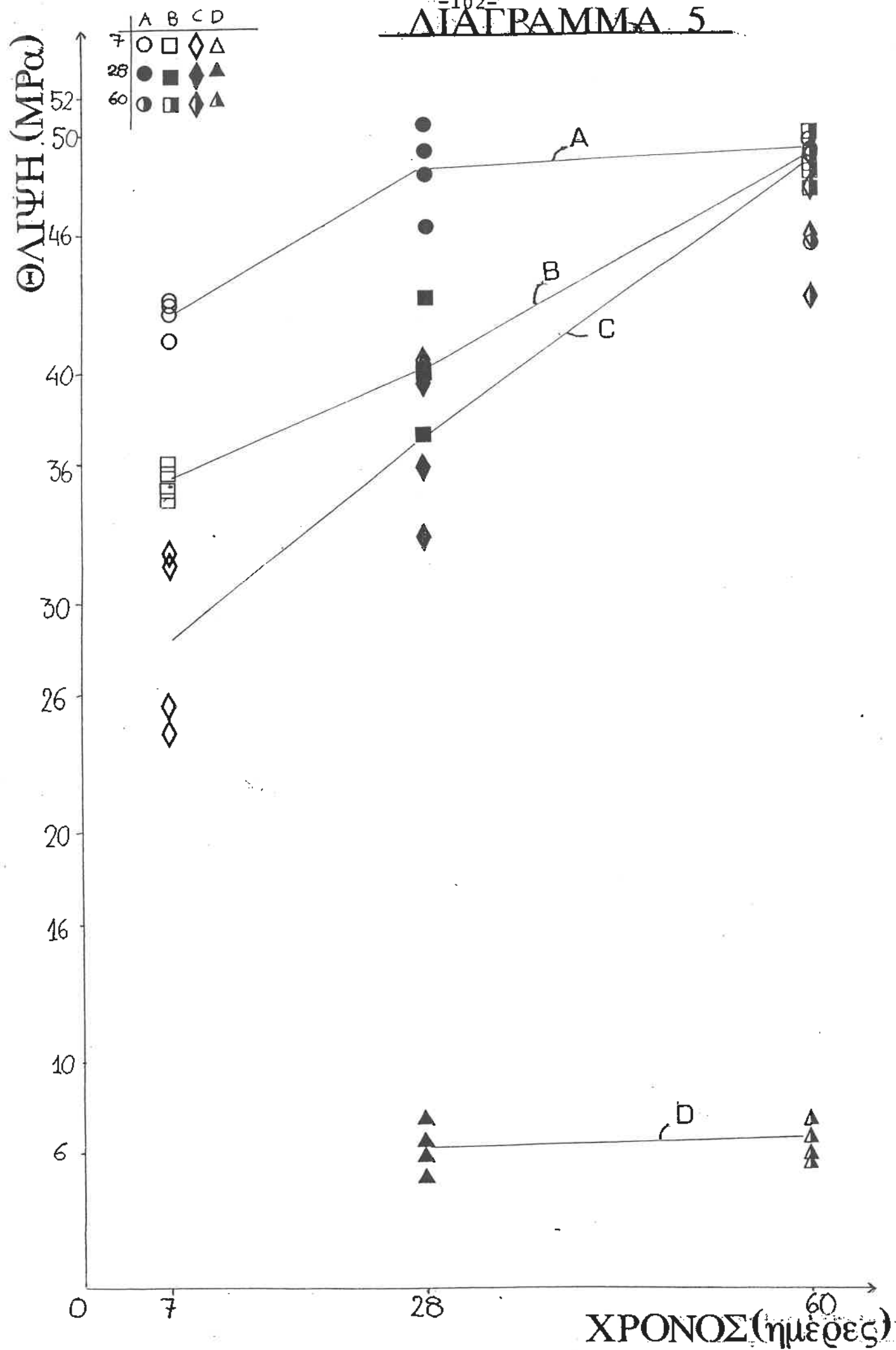
	A	B	C	D
7	○	□	◇	△
28	●	■	◆	▲
60	◉	◐	◑	◒



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 4

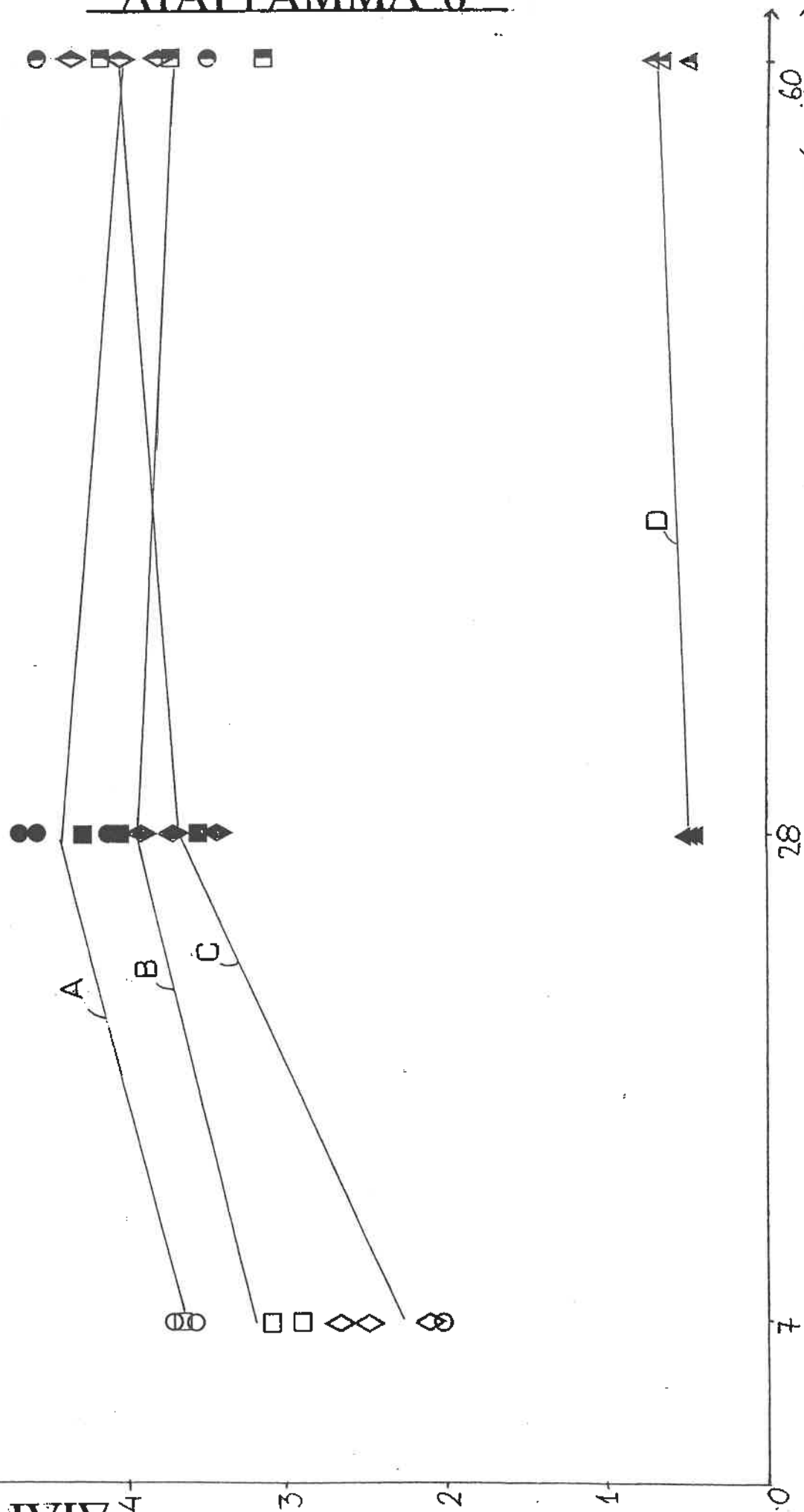


-102-
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 5



ΑΒC D	
7	○ □ ◇ Δ
28	● ■ ◆ ▲
60	○ □ ◇ Δ

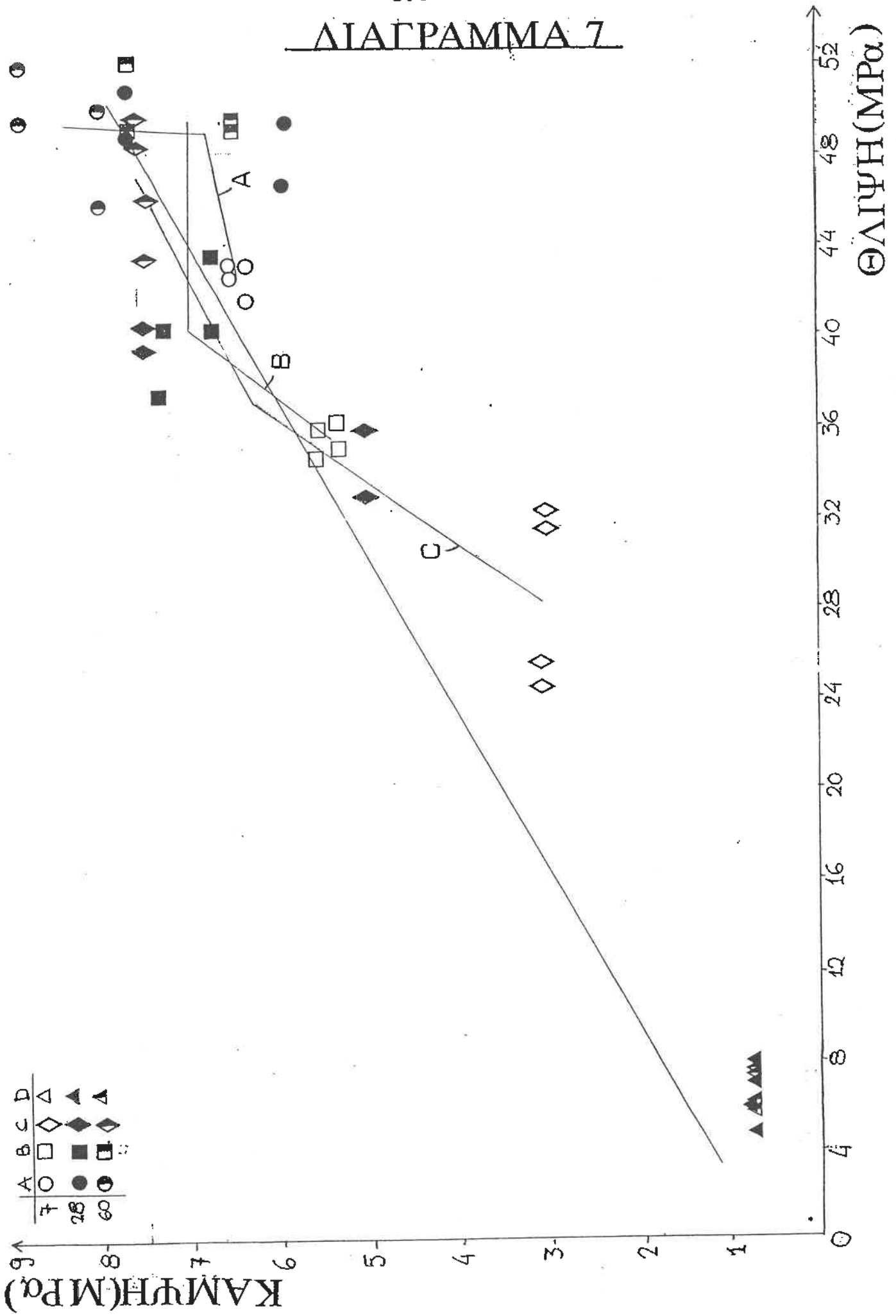
ΔΙΑΡΡΗΗ(Μ)



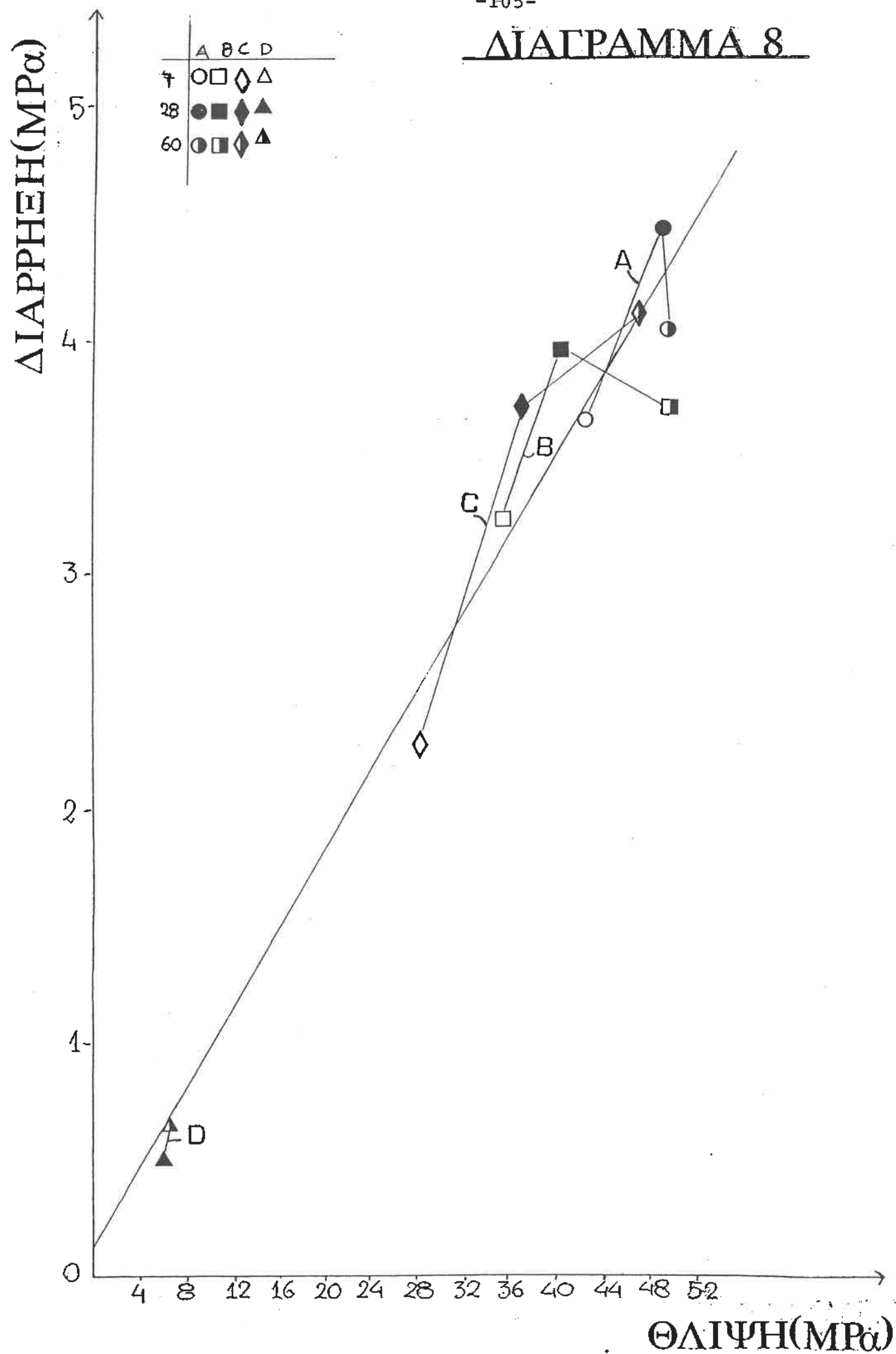
-103-
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 6

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 7

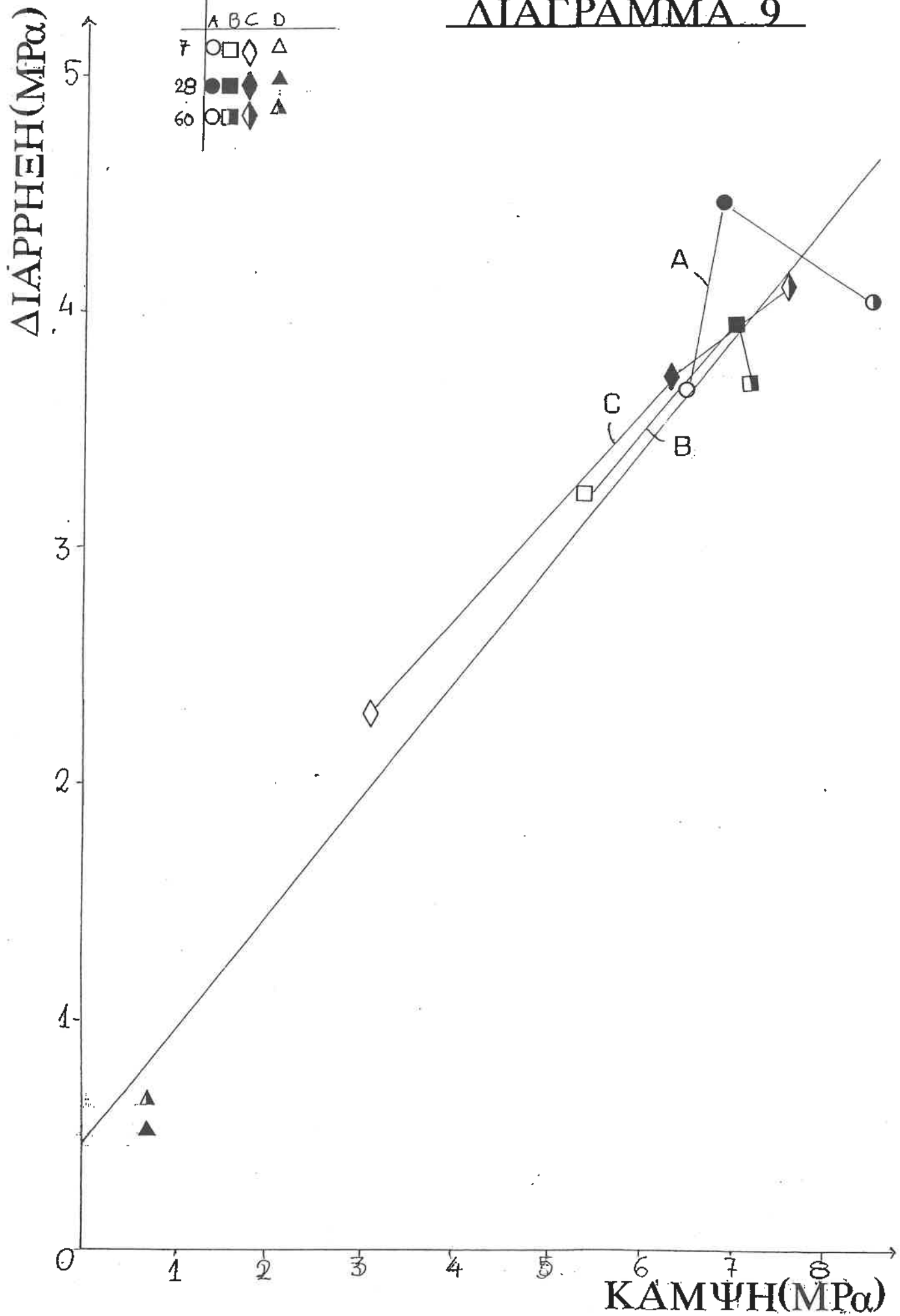
	A	B	C	D
7	○	□	◇	△
28	●	■	◆	▲
60	◐	◑	◒	◓



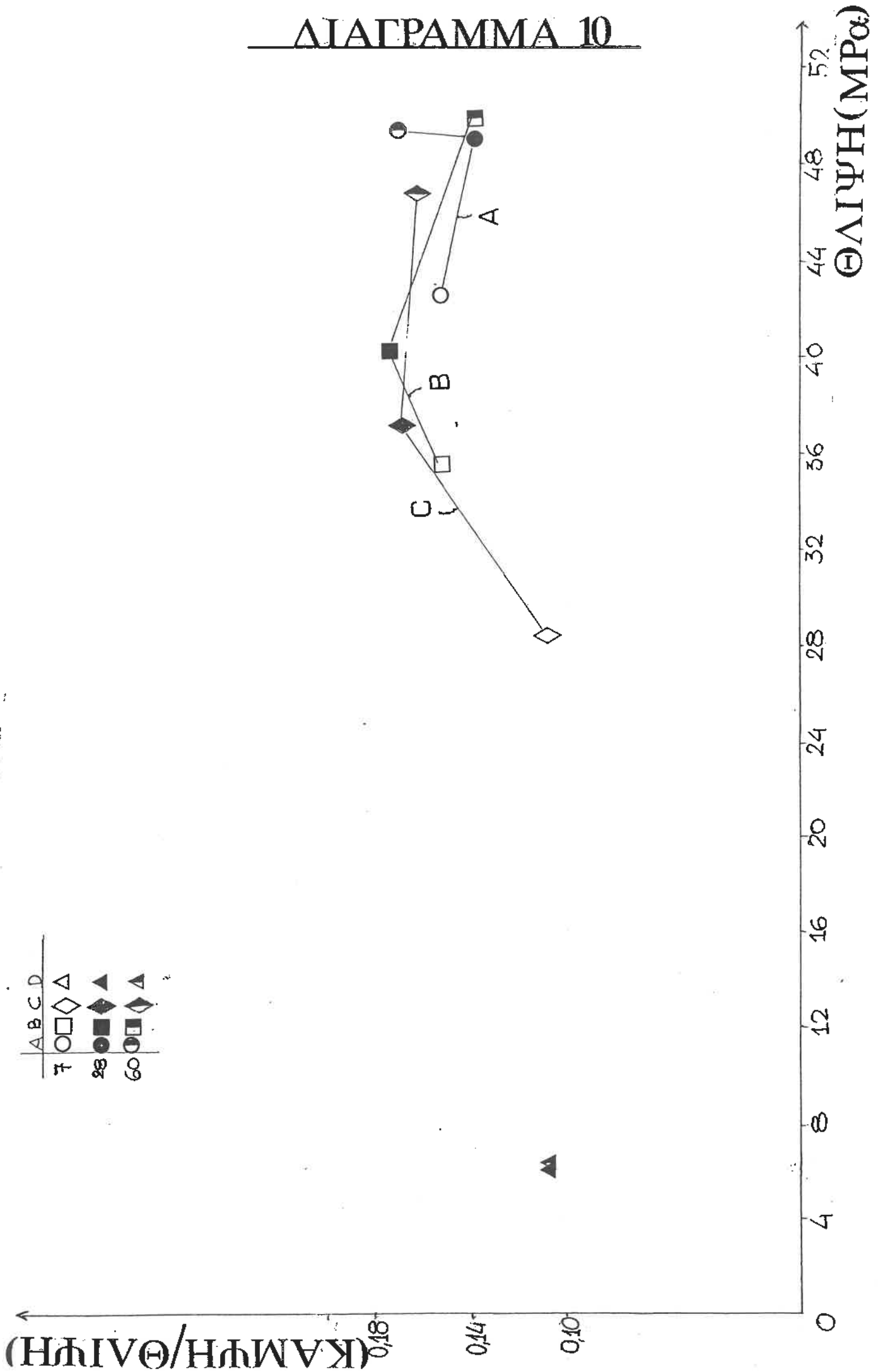
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 8



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 9



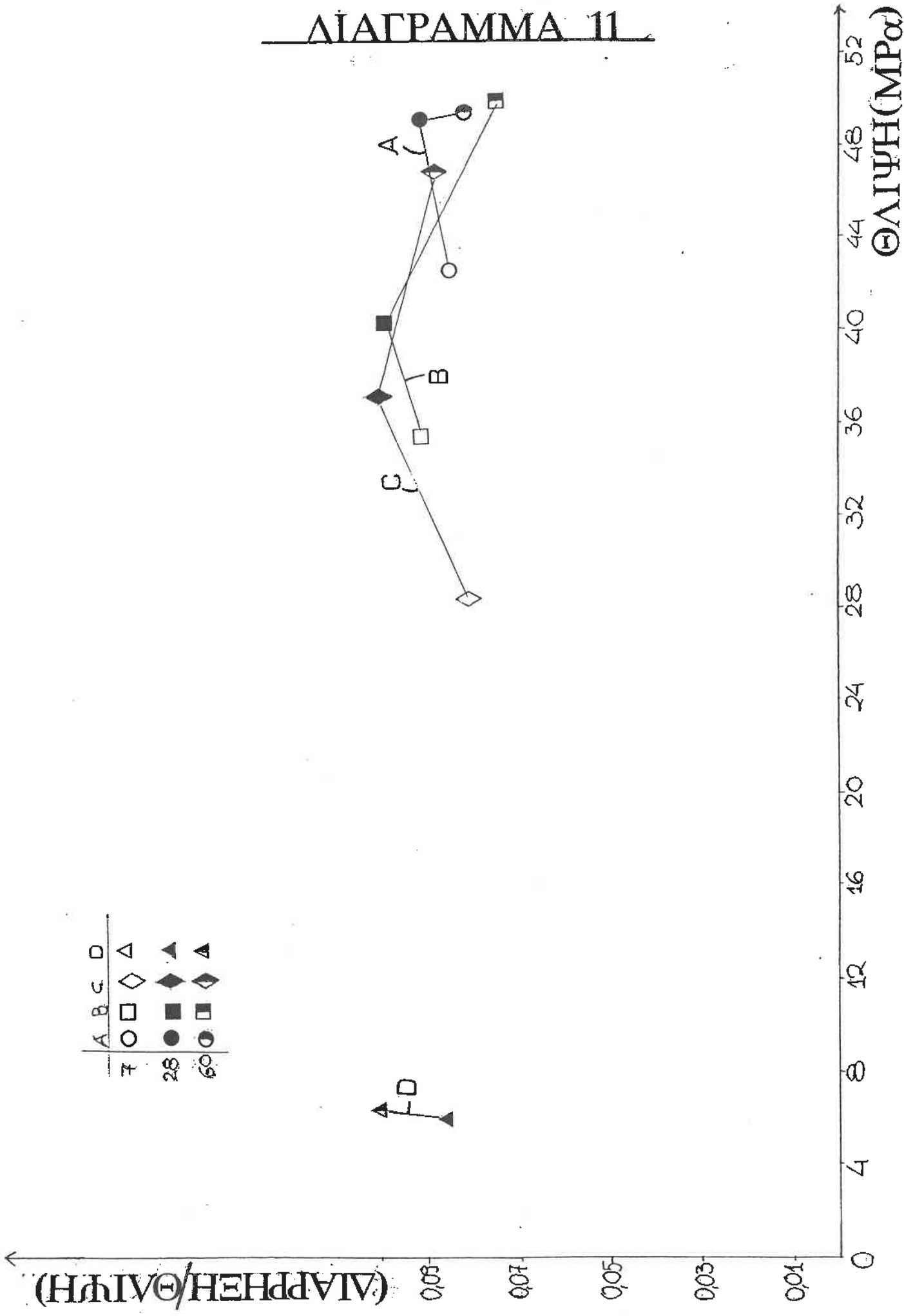
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 10



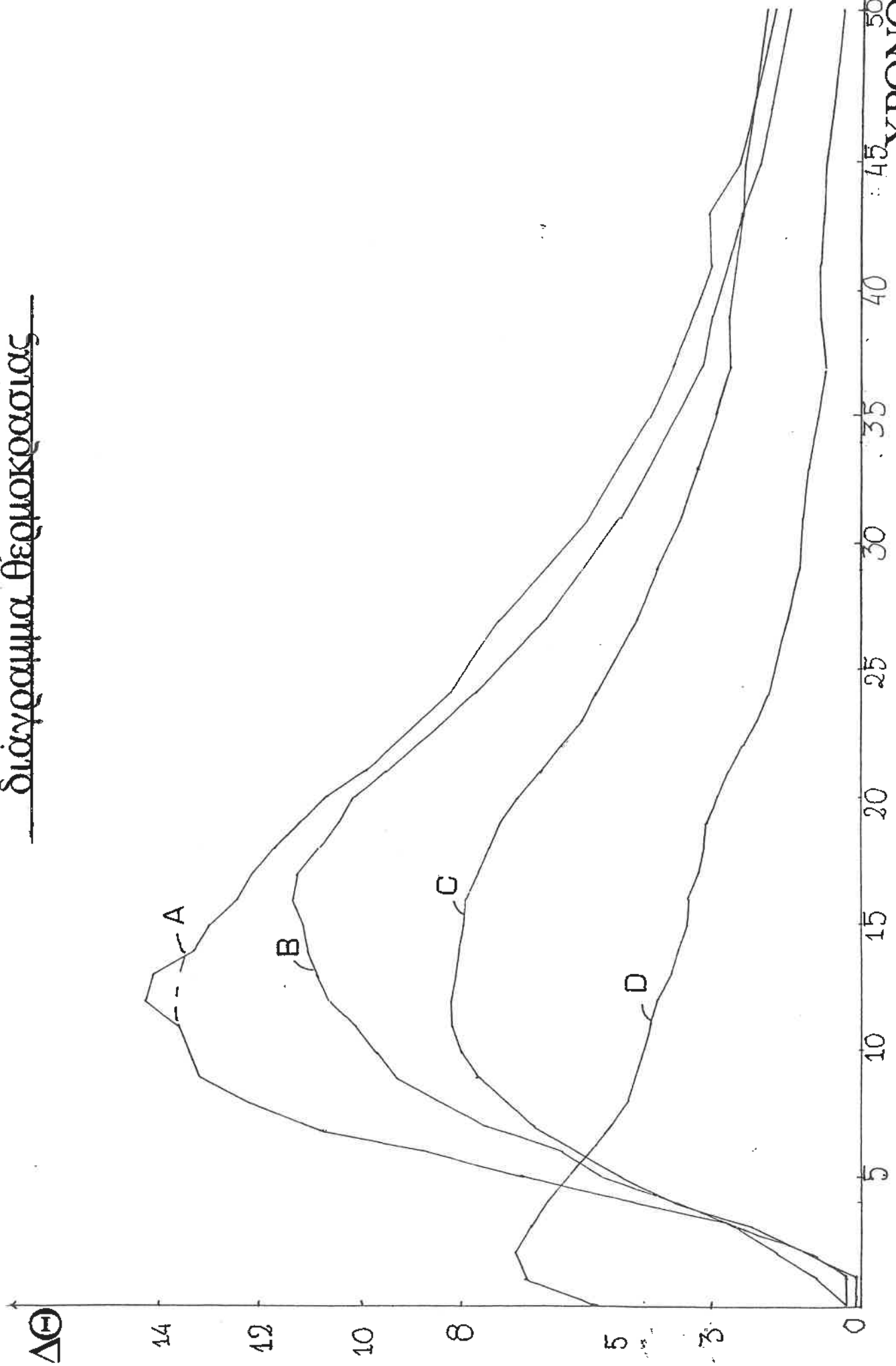
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 11

	A	B	C	D
7	○	□	◇	△
28	●	■	◆	▲
60	⊙	◻	◊	▴

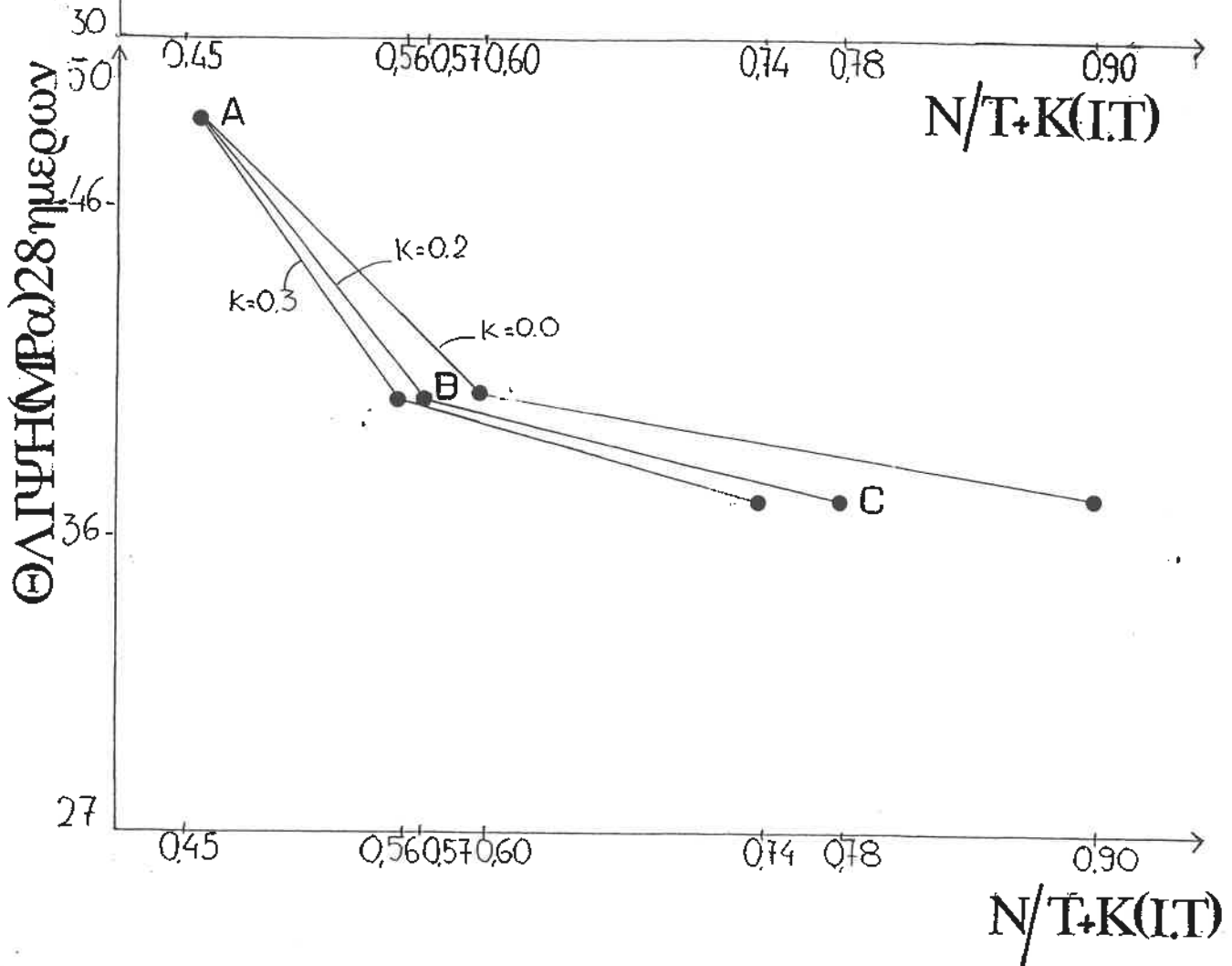
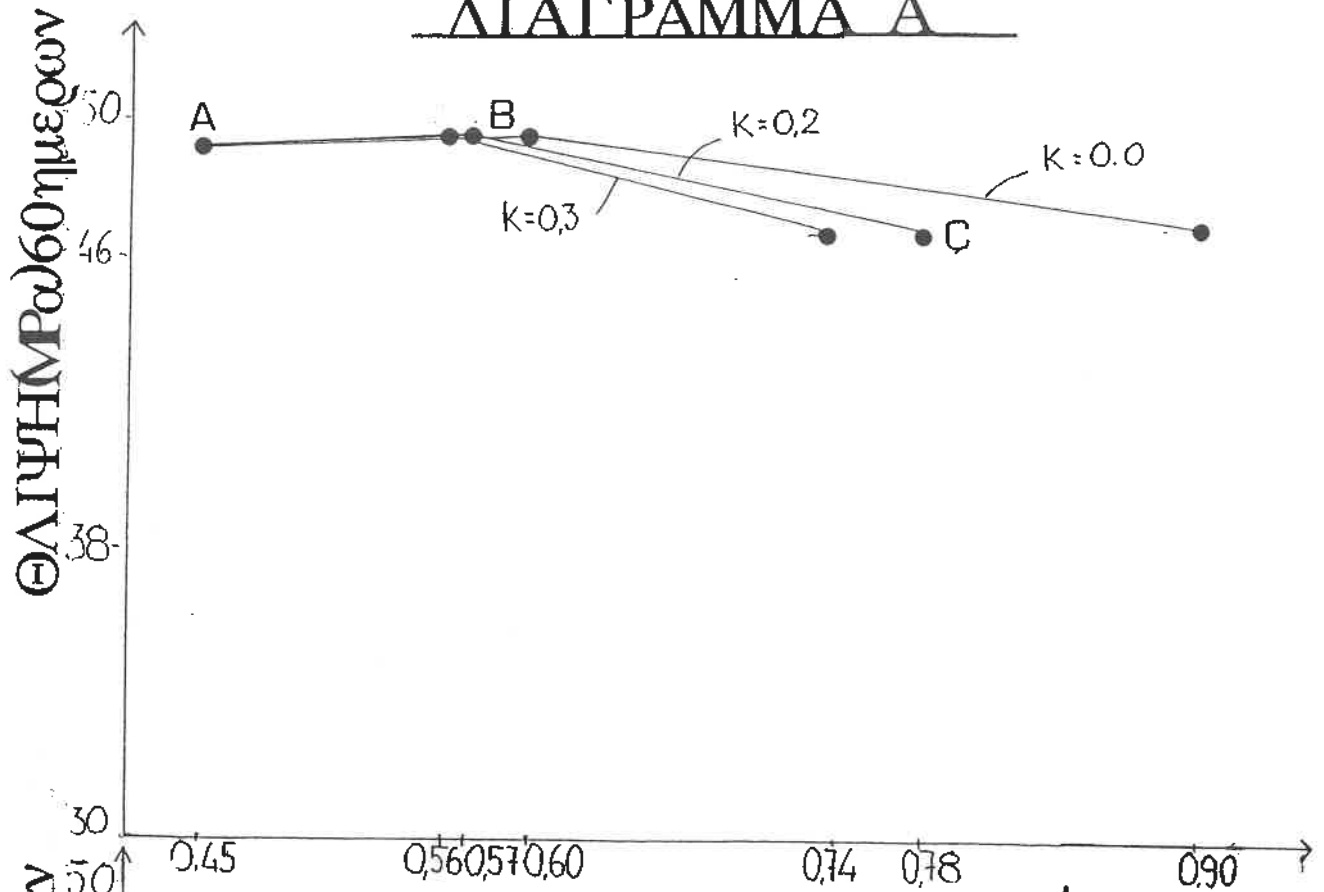
↑ D



διάγραμμα θερμοκρασίας



ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ Α



2.6 Σχόλια Αποτελεσμάτων

Κάμψη

Από τα διαγράμματα 1, 4, παρατηρούμε ότι η αντοχή εφελκυσμού λόγω κάμψης των 7 ημερών για το μίγμα A (100% T. - 0% I.T.) είναι μεγαλύτερη από αυτήν του μίγματος B (75% T. - 25% I.T.) η οποία με την σειρά της είναι μεγαλύτερη από αυτή του μίγματος C (50% T. - 50% I.T.).

Λόγω της μεγάλης διασποράς των τιμών της αντοχής, που αποδίδεται στο είδος της δοκιμής (Κάμψη ενός σημείου), στις 28 και 60 ημέρες, τα σχόλια για τα διαγράμματα 1, και 4, γίνονται με κάποια επιφύλαξη. Η αντοχή στις 28 ημέρες παρουσιάζει μία αύξηση και για τα τρία μίγματα που όμως είναι πιο σημαντική για τα μίγματα B και C. Επίσης οι διαφορές μεταξύ των τιμών της αντοχής για τα μίγματα δεν είναι σημαντικές όπως είναι στις 7 ημέρες. Βέβαια το γεγονός ότι το μίγμα B παρουσιάζει τιμή αντοχής μεγαλύτερη από το μίγμα A αποδίδεται στην μεγάλη διασπορά που υπάρχει στις τιμές του μίγματος A.

Στις 60 ημέρες η αντοχή εφελκυσμού λόγω κάμψης συνεχίζει να παρουσιάζει μία αύξηση και για τα τρία μίγματα που όμως είναι πιο σημαντική για τα μίγματα A και C ενώ για το μίγμα B η αύξηση είναι μικρή. Για το μίγμα D (0% T. - 100% I.T.) δεν δίνονται τιμές αντοχής εφελκυσμού λόγω κάμψης επειδή τα δοκίμια παρουσιάζουν πολύ μικρές αντοχές για τις 7, 28 και 60 ημέρες που ήταν μικρότερες από τα όρια ακριβείας της μηχανής θραύσης που χρησιμοποιήθηκε.

Θλίψη

Από το διαγράμμα 2, 5, παρατηρούμε ότι για το μίγμα A (100% T.-0% I.T.) η αντοχή λόγω θλίψης παρουσιάζει μία αύξηση από την τιμή

των 7 ημερών στην τιμή των 28 ημερών, ενώ η αύξηση στην τιμή των 60 ημερών είναι σχεδόν ασήμαντη. Το φαινόμενο αυτό θα μπορούσε να αποδοθεί στο γεγονός ότι αναμίγματα σκυροδέματος που έχουν καθαρό τσιμέντο (O.P.C.) αποκτούν το σύνολο σχεδόν των αντοχών στις 28 ημέρες.

Αντίθετα για τα μίγματα Β (75% Τ - 25% Ι.Τ.) και C (50%Τ - 50 Ι.Τ.) παρατηρείται βελτίωση της αντοχής λόγω θλίψης από τις 28 στις 60 ημέρες. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι η Ιπτάμενη Τέφρα συνεισφέρει στην αύξηση των αντοχών του σκυροδέματος μετά τις 28 ημέρες λόγω πιθανής πουζολανικής αντιδράσεως. Αξιοσημείωτο είναι το φαινόμενο που παρατηρείται στο διάγραμμα 5 ότι οι τιμές των θλιπτικών αντοχών των μιγμάτων Β και C στις 60 ημέρες τείνουν να φτάσουν και είναι πολύ κοντά στις τιμές του μίγματος Α. Αντίθετα για τις 28 ημέρες η αντικατάσταση καθαρού τσιμέντου κατά 25% και 50% με Ιπτάμενη Τέφρα μειώνει την αντοχή σε θλίψη κατά 18% και 24% αντίστοιχα σε σύγκριση με το Α. Αυτό είναι χαρακτηριστικό φαινόμενο της πουζολανικής αντίδρασης που οι συνέπειές της φαίνονται σε μεγαλύτερο χρόνο. Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός που παρατηρείται στο διαγράμμα 5 ότι οι αντοχές στις 7 ημέρες (Α,Β,С) διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους, για δε το μίγμα D (0%Τ - 100% Ι.Τ.) η αντοχή ήταν μηδενική (εκτός ακριβείας Πρέσσας). Στις 28 ημέρες η διαφορά αυτή φαίνεται ότι ίσως μειώνεται όσο αφορά τα μίγματα Β και C ενώ ίσως αυξάνει μεταξύ Α και Β, C.

Δηλαδή ο ρυθμός αύξησης της αντοχής μεταξύ 7 και 28 των Β, C έπρεπε να είναι ίδιος και μικρότερος από τον ρυθμό αύξησης της αντοχής του Α, γεγονός που αποδίδεται στα πειραματικά σφάλματα ακριβείας. Ενώ από τις 28 έως τις 60 ημέρες ο ρυθμός αυξήσεως της αντοχής των μιγμάτων Β και C είναι σαφώς αυξητικός σε βαθμό τέτοιο που οι αντοχές πλησιάζουν μεταξύ τους, γεγονός

που είναι ενδεικτικό στην εμφάνιση των αποτελεσμάτων της πουζο-
λανικής δράσης. Με αυτή την έννοια το μίγμα D έπρεπε να δείχνει
μία παράλληλη αύξηση αλλά αυτό δεν είναι δυνατόν να φανεί διότι
η αντοχή του υλικού ήταν στα όρια της ακρίβειας της μηχανής
θραύσης.

Τα παραπάνω σχόλια αυτά αφορούν την πρακτική εφαρμογή
των μιγμάτων A, B, C και D, ακριβέστερα σχόλια θα μπορούσε να
γίνει με βάση τον λόγο N/T που καθορίζει την συγκολλητική ικα-
νότητα του συνδετικού μέσου που εν προκειμένω είναι το τσιμέντο
αλλά και η Ιπτάμενη Τέφρα σε κάποιο ποσοστό. Άρα ο λόγος N/T
πρέπει να γίνει $N/T+K(I.T.)$ όπου ο συντελεστής K εκφράζει
την σχετική μεταξύ T και IT συνδετική ικανότητα. Στο διάγραμμα
A φαίνεται η σχέση που υπάρχει ανάμεσα στην αντοχή σε θλίψη
των δοκιμών (A, B και C) για τις 60 και 28 ημέρες και του λόγου
 $N/T + K (I.T.)$ · το K παίρνει τρεις τιμές: 0,0,2 και 0,3. Σημειώ-
νεται ότι ακριβείς τιμές του συντελεστή K δεν είναι γνωστές
για τις Ελληνικές τέφρες. Η αύξηση της τιμής του K από την
τιμή 0 σε 0,2 και 0,3 προκαλεί μία μετατόπιση της ευθείας προς
τα αριστερά. Το σημείο A παραμένει σταθερό μια και αναφέρεται
στο σκυρόδεμα με 100% τσιμέντο και 0% Ιπτάμενη Τέφρα.

Όταν αυξάνει ο λόγος λόγω της συμμετοχής της Ιπτάμενης
Τέφρας παρατηρείται μία μείωση της αντοχής της θλίψης για τα
δοκίμια B και C. Όμως για τις 60 ημέρες η αντοχή σε θλίψη του
δοκιμίου B είναι μεγαλύτερη από αυτή του δοκιμίου A έστω και
αν ο λόγος $N/T+K(I.T.)$ ^{αποδίδεται} μεγαλώνει. Το γεγονός αυτό στη μεγάλη
διασπορά των αποτελεσμάτων των θραύσεων των δοκιμών.

Διάρρηξη

Για τα μίγματα A (100%T-0%I.T.) και B (75%T-25%I.T.) παρα-
τηρείται στα διαγράμματα 3,4,6, ότι η αντοχή σε διάρρηξη των 60

ημερών είναι μικρότερη από την αντοχή των 28 ημερών, γεγονός που αποδίδεται στην μεγάλη διασπορά που υπάρχει ανάμεσα στις τιμές των αντοχών των δοκιμίων.

Από τα διαγράμματα 3,6 παρατηρείται ότι η αντοχή σε διάρρηξη για τα μίγματα Α, Β και C (50%Τ. - 50%Ι.Τ.) κυμαίνεται στα ίδια σχεδόν επίπεδα. Για το μίγμα C αυξάνεται η μηχανική του αντοχή και μετά τις 28 ημέρες γεγονός που αποδίδεται στην συμμετοχή της Ιπτάμενης Τέφρας στην αύξηση της αντοχής λόγω πιθανής πουζολανικής αντιδράσεως.

Το μίγμα D (0%Τ.-100%Ι.Τ.) παρουσιάζει πολύ μικρότερη αντοχή σε διάρρηξη έναντι των άλλων μιγμάτων, ενώ και η αύξηση της αντοχής από τις 28 ημέρες στις 60 ημέρες είναι πολύ μικρή, γεγονός που δικαιολογείται στο προηγούμενο κεφάλαιο.

Σχέση μεταξύ αντοχών σε θλίψη και σε κάμψη

Στον Πίνακα 1. παρουσιάζονται οι αντοχές σε κάμψη και σε θλίψη των 4 μιγμάτων Α,Β,С και D σε 7,28 και 60 ημέρες καθώς και οι αντίστοιχοι λόγοι κάμψης προς θλίψη.

Πίνακας 1. Αντοχή σε κάμψη και σε θλίψη και λόγος κάμψης προς θλίψη των διαφόρων μιγμάτων σε 7,28 και 60 ημέρες.

ΜΙΓΜΑ	Α			Β			C			D		
ΗΛΙΚΙΑ	7	28	60	7	28	60	7	28	60	7	28	60
ΚΑΜΨΗ	6,45	6,82	8,47	5,43	7,02	7,12	3,08	6,28	7,56	-	0-1,35	0-1,35
ΘΛΙΨΗ	42,49	48,95	49,32	35,41	40,21	49,68	28,37	37,10	46,81	-	6,11	6,41
Κ/Θ	0,152	0,139	0,170	0,153	0,174	0,143	0,108	0,169	0,162	-	0,110	0,105

Τα στοιχεία αυτά φαίνονται επίσης στο Διάγραμμα 7. Στο Διάγραμμα 10. απεικονίζεται γραφικά η σχέση μεταξύ της αντοχής σε θλίψη και του λόγου των αντοχών σε κάμψη προς θλίψη.

Από το Διάγραμμα 7. προκύπτει ότι η αντοχή σε κάμψη αυξάνεται γενικά με την αύξηση της αντοχής σε θλίψη. Στο μίγμα Α ο λόγος κάμψης προς θλίψη μειώνεται από 0,152 σε 0,139 και στη συνέχεια αυξάνεται σε 0,170. Αντίθετα στα μίγματα Β και C παρατηρείται αρχικά αύξηση και στη συνέχεια μείωση του λόγου.

Το μίγμα Α αναπτύσσει το σύνολο σχεδόν της αντοχής του σε θλίψη σε 28 ημέρες όπως αναμενόταν, ενώ η αντοχή του σε κάμψη παρουσιάζει και περαιτέρω σημαντική αύξηση. Τα μίγματα Β & C αποδίδουν την πλήρη θλιπτική αντοχή τους σε 60 ημέρες γεγονός που οφείλεται στις ποζολανικές ιδιότητες της ιπτάμενης τέφρας που περιέχουν. Η αύξηση της αντοχής τους σε κάμψη από τις 28 στις 60 ημέρες είναι μικρότερη.

Για το μίγμα D δεν προκύπτουν σαφή συμπεράσματα λόγω της εξαιρετικά χαμηλής καμπτικής του αντοχής σε όλες τις ηλικίες.

Σύμφωνα με ορισμένους ερευνητές δεν υπάρχει μιά απευθείας αναλογία μεταξύ της θλιπτικής και της εφελκυστικής αντοχής, όπως προκύπτει από τη δοκιμή σε κάμψη, για το σκυρόδεμα. Ο λόγος της εφελκυστικής προς την θλιπτική αντοχή μειώνεται με την αύξηση της αντοχής σε θλίψη [12].

Άλλες έρευνες [18] κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η σχέση μεταξύ των δύο αυτών αντοχών προσεγγίζεται πολύ καλά σ'ένα διάγραμμα από μια ευθεία γραμμή. Στην εργασία αυτή έχοντας υπόψη τα παραπάνω στοιχεία, επιχειρήθηκε να προσεγγιστεί η σχέση μεταξύ θλιπτικής και καμπτικής αντοχής από μιά ευθεία γραμμή με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης. Το αποτέλεσμα κρίνεται ως μάλλον ικανοποιητικό (τιμή συντελεστή συσχέτισης $R^2 = 0,943$). Ωστόσο, τόσο οι καμπύλες για το κάθε μίγμα, όσο και η προσεγγιστική ευθεία γραμμή στηρίζονται σε λίγες αριθμητικά μετρήσεις

των οποίων οι τιμές παρουσιάζουν μιά σημαντική διασπορά που αποδίδεται και σε πειραματικά σφάλματα και ως εκ τούτου είναι ενδεικτικές και μόνο. Η εφαρμογή και τα πλήρη στοιχεία της γραμμικής παλινδρόμησης παρατίθενται στο Παράρτημα.

Σχέση μεταξύ αντοχών σε θλίψη και σε διάρρηξη

Στον Πίνακα 2. παρατίθενται οι αντοχές σε θλίψη και σε διάρρηξη των 4 μιγμάτων Α, Β, Γ και Δ σε 7, 28 και 60 ημέρες καθώς και οι αντίστοιχοι λόγοι διάρρηξης προς θλίψη.

Πίνακας 2. Αντοχή σε διάρρηξη και σε θλίψη και λόγος διάρρηξης προς θλίψη των διαφόρων μιγμάτων σε 7, 28 και 60 ημέρες

ΜΙΓΜΑ	Α			Β			Γ			Δ		
ΗΛΙΚΙΑ	7	28	60	7	28	60	7	28	60	7	28	60
ΔΙΑΡΡΗΞΗ	3,67	4,48	4,06	3,24	3,98	3,72	2,29	3,74	4,13	-	0,52	0,65
ΘΛΙΨΗ	42,49	48,95	49,32	35,41	40,21	49,68	28,37	37,09	46,81	-	6,11	6,41
Δ/Θ	0,086	0,092	0,082	0,091	0,099	0,075	0,087	0,101	0,088	-	0,085	0,100

Τα στοιχεία αυτά απεικονίζονται και στα Διαγράμματα 8. και 11.

Οι καμπύλες για τα μίγματα Α και Β δείχνουν αύξηση της αντοχής σε διάρρηξη μαζί με την αύξηση της αντοχής σε θλίψη για τις ηλικίες από 7 σε 28 ημέρες. Από 28 σε 60 ημέρες οι αντοχές σε διάρρηξη μειώνονται ενώ οι θλιπτικές αντοχές αυξάνουν. Τα στοιχεία αυτά προκύπτουν και από την μελέτη των λόγων των αντοχών διάρρηξης προς θλίψη. Η μείωση των αντοχών σε διάρρηξη για τις ηλικίες από τις 28 στις 60 ημέρες αποδίδεται σε πειραματικά σφάλματα. Συγκεκριμένα είναι πιθανό η μηχανή θλίψης να μην λειτούργησε σε ορισμένες περιπτώσεις όπως θα έπρεπε, κρίνοντας από τον τρόπο με τον οποίο αύξανε το φορτίο, με αποτέλεσμα δεδομένα μειωμένης ακρίβειας.

Το μίγμα C παρουσιάζει μία σχετικά ομαλή καμπύλη συνεχούς παράλληλης αύξησης των δύο αντοχών. Σχετικά με το μίγμα D παρατηρούμε ότι εμφανίζει έναν αξιόλογο λόγο εφελκυστικής αντοχής λόγω διάρρηξης προς αντοχή σε θλίψη ο οποίος είναι 0,085 και 0,100 για τις ηλικίες 28 και 60 ημερών αντίστοιχα, ενώ εκ πρώτης όψεως κάτι τέτοιο δεν θα αναμενόταν.

Στην βιβλιογραφία υπάρχουν στοιχεία για τη σχέση αντοχή σε θλίψη - αντοχή σε διάρρηξη [12]. Οι εργασίες [18] & [17] προτείνουν μία γραμμική σχέση μεταξύ αυτών των δύο μεγεθών. Έχοντας υπόψη τα δεδομένα των εργασιών αυτών επιχειρήθηκε η προσέγγιση των αποτελεσμάτων των δοκιμών αντοχής από μία ευθεία γραμμή με τη μέθοδο της γραμμικής παλινδρόμησης. Ο υψηλός συντελεστής συσχέτισης ($R^2=0,948$) βεβαιώνει την καλή προσαρμογή. Η εφαρμογή και τα πλήρη στοιχεία της γραμμικής παλινδρόμησης υπάρχουν στο Παράρτημα.

Σχέση μεταξύ αντοχών σε κάμψη και σε διάρρηξη

Στον Πίνακα 3. παρουσιάζονται οι τιμές των αντοχών σε κάμψη και σε διάρρηξη για τα μίγματα Α, Β, C & D για τις ηλικίες των 7, 28 και 60 ημερών.

Πίνακας 3. Αντοχή σε διάρρηξη και σε κάμψη των διαφόρων μιγμάτων σε 7,28 και 60 ημέρες

ΜΙΓΜΑ	Α			Β			C			D		
ΗΛΙΚΙΑ	7	28	60	7	28	60	7	28	60	7	28	60
ΔΙΑΡΡΗΞΗ	3,67	4,48	4,06	3,24	3,98	3,72	2,29	3,74	4,13	-	0,52	0,65
ΚΑΜΨΗ	6,45	6,82	8,47	5,43	7,02	7,12	3,08	6,28	7,56	-	0-1,35	0-1,35

Η γραφική απεικόνιση των αποτελεσμάτων του πίνακα γίνεται στο Διάγραμμα 9.

Τα μίγματα Α και Β εμφανίζουν αύξηση της αντοχής σε διάρρηξη μαζί με την αντοχή σε κάμψη από τις 7 στις 28 ημέρες, και μείωση της αντοχής σε διάρρηξη ενώ η αντοχή σε κάμψη εμφανίζει περαιτέρω αύξηση από τις 28 στις 60 ημέρες. Η αιτία για την μείωση των τιμών της αντοχής σε διάρρηξη έχει ήδη αναφερθεί.

Το μίγμα C παρουσιάζει και εδώ όπως και στις καμπύλες που απεικονίζουν τις σχέσεις θλίψης - κάμψης και θλίψης - διάρρηξης, μία ιδιαίτερα ομαλή καμπύλη που προσεγγίζει σχεδόν την ευθεία.

Για την συμπεριφορά του μίγματος D δεν μπορούν να γίνουν παρατηρήσεις, εκτός ίσως της μικρής αύξησης της εφελκυστικής του αντοχής λόγω διάρρηξης, διότι η καμπτική αντοχή του έχει τιμή μικρότερη της μικρότερης μετρήσιμης τιμής από την μηχανή θλίψης.

Υπάρχουν και στην περίπτωση αυτή στοιχεία από μελέτες για τη σχέση μεταξύ αντοχής σε κάμψη και αντοχής σε διάρρηξη, που φαίνεται να είναι γραμμική [12] [18]. Αυτό επαληθεύεται και από τα αποτελέσματα αυτής της εργασίας. Ο συντελεστής συσχέτισης είναι $R^2 = 0,944$. Τα στοιχεία της γραμμικής παλινδρόμησης αναφέρονται στο Παράρτημα .

Ανάπτυξη θερμοκρασίας κατά τις πρώτες ώρες μετά την παρασκευή.

Σχετικά με το διάγραμμα χρόνου t - διαφοράς θερμοκρασίας $\Delta\theta$ (θερμοκρασία μίγματος - θερμοκρασία περιβάλλοντος) για τα διάφορα μίγματα έχουμε να παρατηρήσουμε τα εξής: Το μίγμα D αναπτύσσει την μέγιστη θερμοκρασία ταχύτατα, σε 2 ώρες από την στιγμή παρασκευής του και στη συνέχεια παρουσιάζεται μία συνεχής ομαλή πτώση. Το μίγμα Α από τη στιγμή της παρα-

σκευής του παρουσιάζει μία βαθμιαία αύξηση της θερμοκρασίας φθάνοντας τη μέγιστη τιμή στις 12 ώρες. Για λόγους που μπορεί να οφείλονται σε δυσλειτουργία του θερμοκαταγραφικού μηχανήματος ή σε άλλους εξωγενείς παράγοντες παρουσιάζεται μία όχι ομαλή διαδοχή τιμών στην περιοχή της μέγιστης τιμής. Οι τιμές αυτές θεωρούνται ανακριβείς και δεν λαμβάνονται υπόψη στη χάραξη του διαγράμματος. Με προσθήκη αυξανόμενου ποσοστού ιπτάμενης τέφρας παρατηρείται μία αντίστοιχη πτώση των μέγιστων τιμών των θερμοκρασιών στα μίγματα Β και C, δηλαδή τα μέγιστα των καμπυλών τους βρίσκονται μεταξύ των μέγιστων των καμπυλών των μιγμάτων Α και D. Ως προς το χρόνο από τη στιγμή της παρασκευής στον οποίο τα μίγματα φθάνουν τις μέγιστες θερμοκρασίες τους μπορούμε να παρατηρήσουμε για το μίγμα C ότι αυτός (11.30-12.30h) συμπίπτει περίπου με του μίγματος Α, για δε το μίγμα Β ότι ενώ θα αναμενόταν αυτός να βρίσκεται επίσης στην περιοχή του μίγματος Α αυτό δεν συμβαίνει. Δηλαδή παρουσιάζει μία μετατόπιση προς τα δεξιά φθάνοντας στις 16 ώρες. Γενικά παρατηρούμε ότι η προσθήκη ιπτάμενης τέφρας σε αυξανόμενα ποσοστά δημιουργεί αντίστοιχη μείωση των μέγιστων τιμών των θερμοκρασιών που αναπτύσσονται στα μίγματα, ενώ ο χρόνος στον οποίο εμφανίζονται οι θερμοκρασίες αυτές δεν φαίνεται να επηρεάζεται σημαντικά. Είναι φανερό ότι η ομαλότερη καμπύλη της ανάπτυξης της θερμοκρασίας ενυδάτωσης που συμβαίνει με την προσθήκη ιπτάμενης τέφρας, είναι ιδιαίτερα επωφελής στην μείωση των εσωτερικών τάσεων που αναπτύσσονται σε ένα οδόστρωμα από σκυρόδεμα λόγω διαφοράς θερμοκρασίας καθ' ύψος της διατομής.

Το μίγμα που περιέχει μόνο ιπτάμενη τέφρα παρουσιάζει μία δική του ιδιόμορφη συμπεριφορά που δεν φαίνεται να έχει σχέση με τα άλλα μίγματα (Α, Β, C)

2.7. Συμπεράσματα

Η μελέτη του Κ.Σ. με βάση τις δοκιμές στις οποίες υποβλήθηκαν διάφορα μίγματα μας οδηγεί στα εξής συμπεράσματα και προτάσεις. Η αντοχή σε κάμψη, σε μίγματα όπου η ιπτάμενη τέφρα συμμετέχει στην κονία σε ποσοστό που φθάνει το 50%, υπερκαλύπτει το σύνολο των ευρωπαϊκών προδιαγραφών για δρόμους από σκυρόδεμα. Αξιόλογες είναι και οι τιμές των αντοχών σε θλίψη και σε διάρρηξη. Τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των δοκιμών αντοχής (μ.ο) παρατίθενται στον Πίνακα 1.

Πίνακας 1. Αποτελέσματα δοκιμών θραύσης (MPa)

ΜΙΓΜΑ	Α			Β			C			D		
ΗΛΙΚΙΑ	7	28	60	7	28	60	7	28	60	7	28	60
ΘΛΙΨΗ	42,49	48,95	49,32	35,41	40,21	49,68	28,37	37,10	46,81	-	6,11	6,41
ΚΑΜΨΗ	6,45	6,82	8,47	5,43	7,02	7,12	3,08	6,28	7,56	-	0-1,35	0-1,35
ΔΙΑΡΡΗΞΗ	3,67	4,48	4,06	3,24	3,98	3,72	2,29	3,74	4,13	-	0,52	0,65

Αν και οι τιμές της αντοχής σε κάμψη προέκυψαν από δοκιμές που έγιναν με φόρτιση ενός σημείου, πιστεύεται ότι και η δοκιμή κάμψης με φόρτιση δύο σημείων θα έδινε τιμές που βρίσκονται μέσα στα όρια των κανονισμών. Η επαλήθευση αυτή προτείνεται για περαιτέρω έρευνα.

Με εφαρμογή της μεθόδου της γραμμικής παλινδρόμησης βρέθηκε ότι οι σχέσεις μεταξύ των αντοχών είναι με πολύ καλή προσέγγιση γραμμικές. Συγκεκριμένα προέκυψαν: Λόγος κάμψης προς θλίψη 0,16, λόγος διάρρηξης προς θλίψη 0,08 και λόγος διάρρηξης προς κάμψη 0,49.

Η μελέτη της κατανομής της θερμότητας ενυδάτωσης στο χρόνο έδειξε ότι η προσθήκη ιπτάμενης τέφρας σε αυξανόμενα ποσοστά δημιουργεί ανίστοικη μείωση της μέγιστης τιμής της θερμοκρασίας που αναπτύσσεται κατά τις πρώτες ώρες της ενυδάτωσης, ενώ ο χρόνος στον οποίο αυτή εμφανίζεται παραμένει πρακτικά αμετάβλητος.

Όλες οι δοκιμές στην εργασία αυτή έγιναν με χρήση ενός μόνο είδους ιπτάμενης τέφρας και ενός αδρανούς. Θα ήταν απαραίτητο να εξετασθεί η καταλληλότητα και άλλων ιπτάμενων τεφρών από άλλους σταθμούς της ΔΕΗ, καθώς η συμμετοχή της στο σκυρόδεμα συμβάλλει στην επίλυση του προβλήματος της διάθεσής της κατά τρόπο ώστε να μην επιβαρύνεται το περιβάλλον.

Όσον αφορά το αδρανές είναι ενδιαφέρον να επαληθευθούν οι υψηλές αντοχές που έδωσαν στο εξωτερικό μίγματα [4] που περιείχαν ένα ασυνήθιστα υψηλό ποσοστό λεπτόκοκκου υλικού και των οποίων το αδρανές απόκλινε από την ιδανική κοκκομετρική καμπύλη. Ένα φαινόμενο το οποίο αξίζει περισσότερης προσοχής, είναι η διόγκωση των δοκιμίων που περιείχαν μόνο ιπτάμενη τέφρα σαν κονία. Αν και στα δοκίμια των άλλων μιγμάτων δεν παρατηρήθηκε κάποιο σχετικό φαινόμενο σε εμφανή τουλάχιστον βαθμό, πιστεύεται ότι μιά μελέτη του φαινομένου θα ήταν χρήσιμη. Τέλος πιστεύουμε ότι

η κατασκευή ενός δοκιμαστικού οδοστρώματος από τη ΔΕΗ θα ήταν ιδιαίτερα χρήσιμη. Το υλικό θα μπορούσε να δοκιμαστεί υπό πραγματικές συνθήκες ενώ επιπλέον θα υπήρχε η δυνατότητα να διερευνηθούν και άλλα σημαντικά θέματα όπως η ρηγμάτωση και η κοπή αρμών.

1

Παράρτημα

PUBLIC POWER CORPORATION
CENTER FOR TESTING RESEARCH & STANDARDS
SOILS LABORATORY

* CLASSIFICATION RESULTS *

ERGO.....: -
THESI.....: -
BATHOS.....: -

SIEVE'S ANALYSIS

NO	SIEVE'S NUMBER	DIAMETER (MM)	PERCENTAGE PASSING
1	1/4"	6.350	100.000
2	4	4.750	90.480
3	8	2.360	63.515
4	16	1.180	45.920
5	30	0.590	32.170
6	50	0.297	26.060
7	100	0.147	16.780
8	200	0.074	13.620

CLASSIFIED ACCORDING TO A.U.S.C.S. AS : ** AUTOMATIC CLASSIFICATION REJECTED **

CENTER FOR TESTING RESEARCH & STANDARDS

SOILS LABORATORY

 * CLASSIFICATION RESULTS *

ER80..... -
 THES1..... -
 BATH08..... -

SIEME'S ANALYSIS

NO	SIEME'S NUMBER	DIAMETER (MM)	PERCENTAGE PASSING
1	5/8"	15.880	100.000
2	1/2"	12.700	99.704
3	3/8"	9.530	94.075
4	1/4"	6.350	50.025
5	4	4.750	26.254

CLASSIFIED ACCORDING TO A.U.S.C.S. AS : GW,GP
 GRAVELS, GRAVEL-SAND MIXTURES , LITTLE OR NO FINES

* CLASSIFICATION RESULTS *

ERGO.....: -
THESI.....: -
BATHOS.....: -

SIEVE'S ANALYSIS

NO	STEEVE'S NUMBER	DIAMETER (MM)	PERCENTAGE PASSING
1	1.5"	38.100	100.000
2	1.25"	31.750	99.796
3	1"	25.400	98.597
4	3/4"	19.050	68.024
5	1/2"	12.700	23.134

CLASSIFIED ACCORDING TO A.U.S.C.S. AS : GW, GP
GRAVELS, GRAVEL-SAND MIXTURES , LITTLE OR NO FINES

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΕΡΓΟ:
ΟΔΗΓ.

ΧΑΛΙΖΙ

ΒΑΡΟΣ:

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 3/5/91

ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΗΣΗ

ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ

ΚΟΣΚΙΝΑ

ΠΥΚΝΟΜΕΤΡΟ

Gs

ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΟΣΚΙΝΟΥ ΑΣΤΗ	ΕΥΣΚΡΑΤΟΥΜΕΝΟ ΒΑΡΟΣ (gr)	ΧΡΟΝΟΣ (MIN)	ΜΕΤΡΗΣΗ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΙΑΛΗΣ	
8'		0.25		ΒΑΡΟΣ	
4'		0.50		ΕΙΡΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ (gr)	
3'		0.75		ΒΑΡΟΣ	
2 1/2'		1.00			
2'		2.00			
1 1/2'		5.00			
1 1/4'	30.5	15.00		ΒΑΡΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ (gr)	
1'	929.9	30.00		ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	
3/4'	3835.9	60.00			
3/8'		120.00		ΥΛΙΚΟ ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟ ΑΠΟ ΚΟΣΚΙΝΟ N°	
1/2'	6883.5	180.00			
3/16'		240.00			
1/4'		300.00			
N° 4		440.00			

* 3254.4 gr: Παιχνάλη

OPIA ATTERBERG

		LL		PL	
ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΑΣΑΙ					
ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΤΥΠΩΝ					
ΒΑΡΟΣ ΓΡΟ. ΚΑΣΑ (gr)					
ΒΑΡΟΣ ΕΙΡΟ. ΚΑΣΑ (gr)					

ΒΑΡΟΣ 15.000 ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ

ΧΥΜ: 116798gr (gr)

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΕΡΓΟ: ΓΑΡΜΠΙΧΙ

ΟΔΗΓ:

ΒΑΘΟΣ:

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 3 / 5 / 91

ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΗΣΗ

ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ

ΚΟΣΚΙΝΑ

ΠΥΚΝΟΜΕΤΡΟ

Gs

ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΟΣΚΙΝΟΥ ΑΣΤΗ	ΣΥΓΚΡΑΤΟΥΜΕΝΟ ΒΑΡΟΣ (gr)	ΧΡΟΝΟΣ (MIN)	ΜΕΤΡΗΣΗ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΙΑΛΗΣ	
8		0.25		ΒΑΡΟΣ	
15		0.50		ΞΗΡΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ (gr)	
20		0.75		ΒΑΡΟΣ	
25		2.0			
30		5.0			
1/2		15.0		ΒΑΡΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ (gr)	
1		30.0		ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	
3/4		60.0			
3/8		120.0		ΥΛΙΚΟ ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟ ΑΠΟ ΚΟΣΚΙΝΟ N° 2	
1/2	2070	180.0			
3/8	394.00	240.0			
1/4	3083.50	300.0			
N° 4	1622.0	1440.0			
N° 8					
N° 10					
N° 16					
N° 20					
N° 30					
N° 40					
N° 50					
N° 60					
N° 100					
N° 200					
ΒΑΡΟΣ 7.000 ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΣΥΝ: 5.120 (gr)	82 ΒΑΡΟΣ ΞΗΡΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ (gr)			

* 1859.9 gr : Παιχνίδι

OPIA ATTERBERG

	LL	PL
ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΑΨΑΣ		
ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΤΥΠΩΝ		
ΒΑΡΟΣ ΥΓΡΟΥ-ΚΑΨΑΣ (gr)		
ΒΑΡΟΣ ΞΗΡΟΥ-ΚΑΨΑΣ (gr)		

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΕΡΓΟ:
ΟΜΑΔΑ:

ΑΜΜΟΣ

ΒΑΡΟΣ:

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ:

3/5/91

ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΗΣΗ

ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ

Gs

ΚΟΣΚΙΝΑ

ΠΥΚΝΟΜΕΤΡΟ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΟΣΚΙΝΟΥ ΑΣΤΜ	ΣΥΓΚΡΑΤΟΥΜΕΝΟ ΒΑΡΟΣ (gr)	ΧΡΟΝΟΣ (MIN)	ΜΕΤΡΗΣΗ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΙΑΛΗΣ	
X		0.25		ΒΑΡΟΣ ΞΗΡΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ (gr)	
X		0.50		ΒΑΡΟΣ ΕΠΙΧΡΩΜΗΤΟΥ	
X		0.75			
X		1.0			
X		2.0			
X		5.0		ΒΑΡΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ (gr)	
1/2		15.0			
1		30.0		ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	
3/4		60.0			
X		120.0		ΥΛΙΚΟ ΔΙΕΡΚΟΜΕΝΟ ΑΠΟ ΚΟΣΚΙΝΟ N°2	
1/2		180.0			
3/8		240.0			
1/4		300.0			
N° 4	190,40	1440.0			
N° 8	539,30				
N° 10					
N° 15	351,90				
N° 20					
N° 30	275,00				
N° 40					
N° 50	122,20				
N° 60					
N° 100	185,60				
N° 200	63,20				

* Παύσιμη = 267,60 gr.

ΟΡΙΑ ATTERBERG

	LL	PL
ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΕΤΑΣ		
ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΤΥΡΩΝ		
ΒΑΡΟΣ ΥΠΕΡΟΚΑΤΑ (gr)		
ΒΑΡΟΣ ΕΠΙΧΡΩΜΗΤΑ (gr)		

ΒΑΡΟΣ 2.000gr
ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ

ΣΥΝ: 1727,60
(gr)

PUBLIC POWER CORPORATION
CENTER FOR TESTING RESEARCH & STANDARDS
SOILS LABORATORY

* CLASSIFICATION RESULTS *

ERGO.....: -
THESI.....: -
BATHOS.....: -

SIEVE'S ANALYSIS

NO	SIEVE'S NUMBER	DIAMETER (MM)	PERCENTAGE PASSING
1	1"	25.400	100.000
2	3/4"	19.050	98.973
3	1/2"	12.700	26.452
4	3/8"	9.530	3.299

UNIFORMITY COEFFICIENT = 1.480
CURVATURE COEFFICIENT = 1.048

CLASSIFIED ACCORDING TO A.U.S.C.S. AS : GW,GP
GRAVELS, GRAVEL-SAND MIXTURES ,LITTLE OR NO FINES

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΔΑΦΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

ΕΡΓΟ:
ΜΕΝ:

ΧΑΛΙΚΙ

ΒΑΡΟΣ:

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ: 10/5/91

ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΗΣΗ

ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ

Gs

ΚΟΚΚΙΝΑ

ΠΥΚΝΟΜΕΤΡΟ

ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΟΚΚΙΝΟΥ ΔΣΤΗ	ΣΥΓΚΡΑΤΟΥΜΕΝΟ ΒΑΡΟΣ (gr)	ΧΡΟΝΟΣ (MIN)	ΜΕΤΡΗΣΗ	ΑΡΙΘΜΟΣ ΦΙΑΛΗΣ	
8'		0.25		ΒΑΡΟΣ ΕΠΡΟΥ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ (gr)	
4'		0.50		ΒΑΡΟΣ	
3'		0.75			
2'		1.0			
1 1/2'		2.0		ΒΑΡΟΣ ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ (gr)	
1 1/4'		5.0			
1 1/2'		15.0		ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ (°C)	
1'		30.0			
3/4'	66,70	60.0		ΥΛΙΚΟ ΔΙΕΡΧΟΜΕΝΟ ΑΠΟ ΚΟΚΚΙΝΟ Ν°:	
3/8'		120.0			
1/2'	4583,90	180.0			
3/8'	1634,90	240.0			
1/4'		300.0			
N° 4		1440.0			
N° 8					
N° 10					
N° 15					
N° 20					
N° 30					
N° 40					
N° 50					
N° 60					
N° 100					
N° 200					
ΒΑΡΟΣ 6.500 ΔΕΙΓΜΑΤΟΣ	ΚΥΝ: 628550 (gr)				

* 195,70gr: Παινάλη

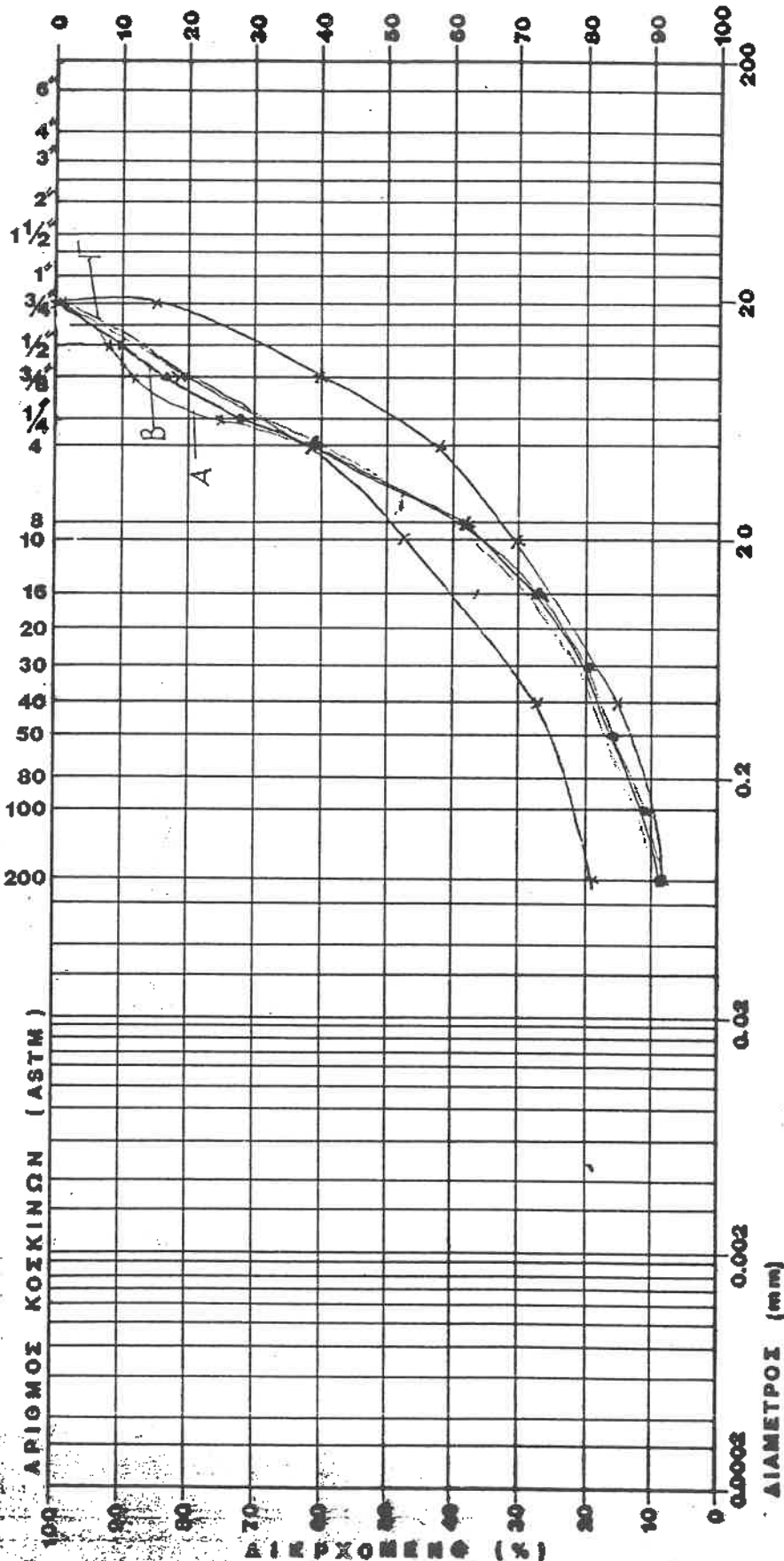
OPIA ATTERBERG

	LL	PL
ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΑΤΑΣΤ.		
ΑΡΙΘΜΟΣ ΚΥΤΩΝ		
ΒΑΡΟΣ ΥΓΡΟ-ΚΑΤΑ (gr)		
ΒΑΡΟΣ ΕΠΡΟ-ΚΑΤΑ (gr)		



ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ

ΣΥΓΚΡΑΤΟΥΜΕΝΟ (%)



ΕΡΓΟ: ΔΟΚΙΜΕΣ
ΠΡΟΒΕΣΗΣ ΑΔΡΑΝΟΥΣ

ΘΕΣΗ:

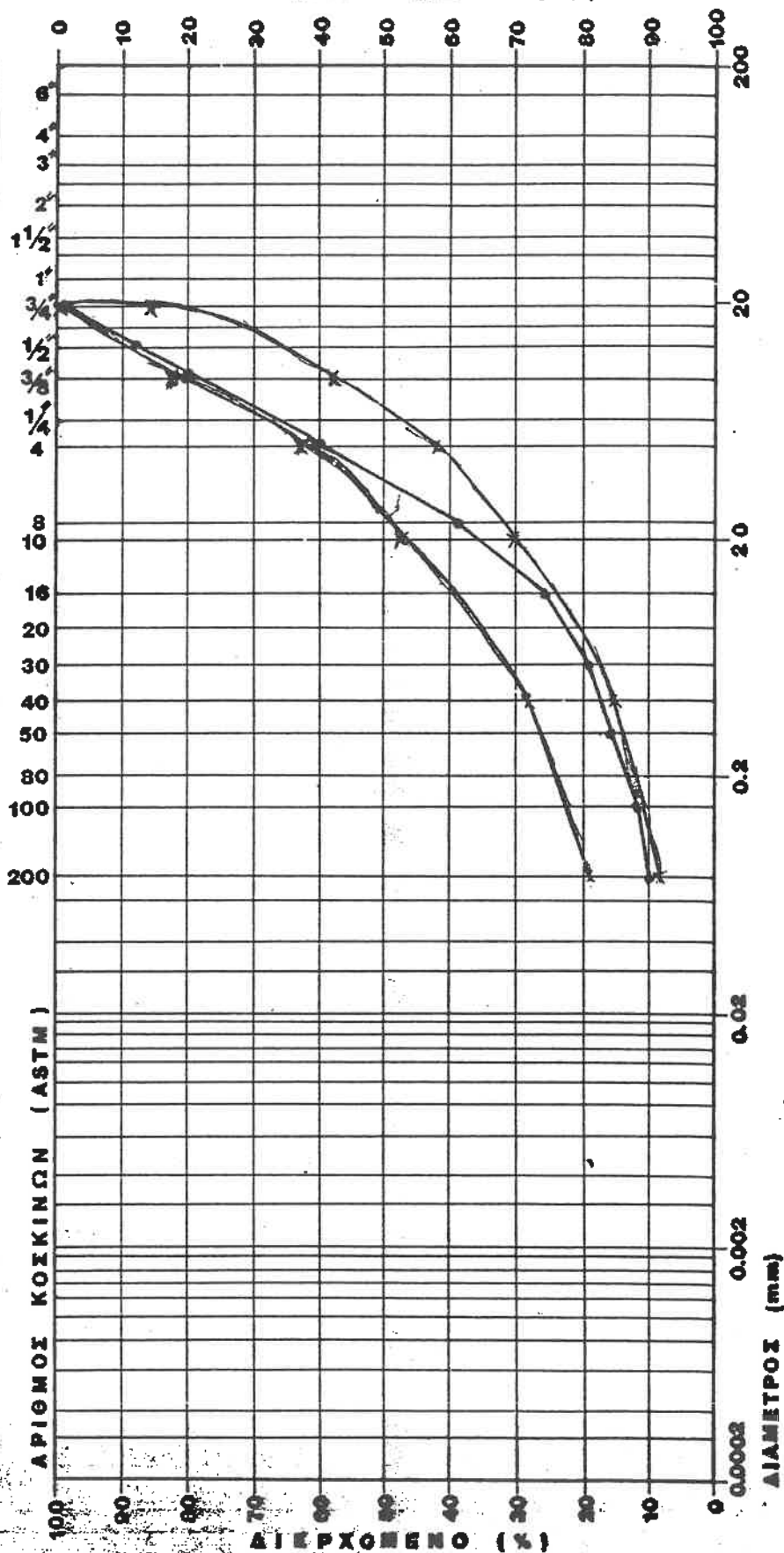
ΒΑΘΟΣ:



ΔΟΚΙΜΕΣ ΚΑΤΑΤΑΞΗΣ

10/5/91

ΣΥΓΚΡΑΤΟΥΜΕΝΟ (%)



Νº	ΒΑΘΟΣ (m)	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{30}}$	$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} D_{10}}$	ΟΡΙΑ ΑΤΤΕΡΒΕΡΓ			ΕΙΔΙΚΟ ΒΑΡΟΣ G_s	ΦΥΣΙΚΗ ΥΓΡΑΣΙΑ w (%)	ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΒΑΡΟΣ γ_p (Mg/m ³)	ΚΑΤΑΤΑΞΗ A.U.S.C.S.
				LL	PL	SL				
x										
□										
Δ										

ΕΡΓΟ:

ΣΥΝΘΕΣΗ ΑΔΡΑΝΟΥΣ

ΘΕΣΗ:

ΚΑΜΠΥΛΗ Γ

ΒΑΘΟΣ:

ΔΟΚΙΜΕΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ ΑΔΡΑΝΟΥΣ

ΚΛΑΣΜΑ ΠΟΣΟΣΤΟ	ΑΡ. ΚΟΖΚΙΝΟΥ	$\frac{3}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{1}{4}$	4	8	16	30	50	100	200
ΧΑΛΙΚΙ		99	28,5	3,3								
A 10		99	2,85	0,33								
B 15		14,8	1,28	0,50								
Γ 20		19,8	5,70	0,56								
ΓΑΡΜΠΙ		100	100	94	50	27						
A 30		30	30	28,2	15	8,1						
B 25		25	25	23,50	12,5	6,75						
Γ 20		20	20	18,8	10	5,4						
ΑΜΜΟΣ		100	100	100	100	90,5	63,5	45,3	32,2	26,1	16,8	13,6
A 60		60	60	60	60	54,3	38,1	27,54	19,32	15,56	10,08	8,16
B 60		60	60	60	60	54,3	38,1	27,54	19,32	15,56	10,08	8,16
Γ 60		60	60	60	60	54,3	38,1	27,54	19,32	15,56	10,08	8,16
ΣΥΝΟΛΟ												
A		99,9	92,85	88,53	75	62,40	38,1	27,54	12,32	15,66	10,08	8,16
B		99,8	89,28	84,0	72,5	61,05	38,1	27,54	12,32	15,66	10,08	8,16
Γ		99,8	85,7	79,46	70	59,7	38,1	27,54	19,32	15,66	10,08	8,16

Γραμμική παλινδρόμηση για την προσέγγιση της σχέσης μεταξύ αντοχών σε θλίψη και σε κάμψη.

A/A	ΚΑΜΨΗ Y	ΘΛΙΨΗ X
1	6,45	42,49
2	6,82	48,95
3	8,47	49,32
4	5,43	35,41
5	7,02	40,21
6	7,12	49,68
7	3,08	28,37
8	6,28	37,1
9	7,56	46,81
10	0,675	6,11
11	0,675	6,41

Regression Output:

Constant	-0,46400
Std Err of Y Est	0,680047
R Squared	0,943447
No. of Observations	11
Degrees of Freedom	9
X Coefficient(s)	0,16549159
Std Err of Coef.	0,01350588

$$Y = -0,46400 + 0,16549159 \cdot X$$

Γραμμική παλινδρόμηση για την προσέγγιση της σχέσης μεταξύ
αντοχών σε θλίψη και σε διάρρηξη

Χ ΘΛΙΨΗ	Υ ΔΙΑΡΡΗΞΗ
42.49	3.67
35.41	3.24
28.37	2.29
48.95	4.48
40.21	3.98
37.09	3.74
6.11	0.52
49.32	4.06
49.68	3.72
46.81	4.13
6.41	0.65

Regression Output:

Constant	0.131670
Std Err of Y Est	0.332300
R Squared	0.947972
No. of Observations	11
Degrees of Freedom	9
X Coefficient(s)	0.084512
Std Err of Coef.	0.006599

$$Y = 0,131670 + 0,084512 \cdot X$$

Γραμμική παλινδρόμηση για την προσέγγιση της σχέσης μεταξύ
αντοχών σε κάμψη και σε διάρρηξη.

KAMCH X DIAR Y

6.45	3.67
5.43	3.24
3.08	2.29
6.82	4.48
7.02	3.98
6.28	3.74
0.675	0.52
8.47	4.06
7.12	3.72
7.56	4.13
0.675	0.65

Regression Output:

Constant	0.453583
Std Err of Y Est	0.344824
R Squared	0.943976
No. of Observations	11
Degrees of Freedom	9

X Coefficient(s)	0.494974
Std Err of Coef.	0.040194

$$Y = 0,453583 + 0,494974 \cdot X$$

A 100% T.	B 75% T, 25% I.T.	C 50% T, 50% I.T.	D 100% I.T.	ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ
x P. Θ ΔΘ	x P. Θ ΔΘ	x P. Θ ΔΘ	x P. Θ ΔΘ	Θ
0.0 24,0	0.0 22,5 0,0	0.0 23,0 0,5	0.0 24,5 2,0	22,5 °C
0.30 23,0 0,5	0.30 22,5 0,0	0.30 23,5 0,5		
1.00 23,5 1,0	1.00 23,0 0,5	1.45 24,5 2,0		
1.30 23,5 1,0	1.30 23,5 1,0		1.00 31,0 8,5	
2.00 23,5 1,0		2.00 24,5 2,0	2.00 30,5 8,0	
2.40 24,0 1,5	2.30 24,0 1,5	2.30 25,0 2,5	2.30 30,0 7,5	
3.45 25,5 3,0	3.00 24,0 1,5	4.00 26,0 3,5	3.30 30,0 7,5	
4.20 26,0 3,5	3.30 25,0 2,5	4.30 26,0 3,5	4.00 29,5 7,0	
4.40 27,0 4,5	4.30 26,0 3,5	5.30 27,0 4,5	5.00 29,0 6,5	
6.00 28,5 6,0	5.00 26,0 3,5	6.00 28,0 5,5	6.00 29,0 6,5	
6.20 29,5 7,0	6.00 27,5 5,0			
7.20 31,0 8,5	7.00 28,0 5,5			
8.05 32,0 9,5		18.00 29,0 6,5	18.00 25,5 3,0	
19.50 32,0 9,5	19.00 32,0 9,5	19.00 29,0 6,5	19.00 25,5 3,0	
20.50 32,0 9,5	20.00 32,0 9,5	20.00 28,5 6,0	20.00 25,0 2,5	
21.50 31,0 8,5	21.00 31,5 8,0	21.00 28,0 5,5	21.00 25,0 2,5	
22.50 31,0 8,5	22.00 31,0 8,5	22.00 28,0 5,5		
23.50 31,0 8,5	23.00 31,0 8,5	23.00 27,5 4,5		
24.50 30,0 7,5	24.00 30,5 8,0	24.00 27,5 4,5	24.00 24,5 2,0	
25.50 30,0 7,5	26.00 30,0 7,5	25.00 27,0 4,0		
26.50 30,0 7,5	27.00 30,0 7,5			
44.20 25,0 2,5	44.30 26,0 3,5	42,5 24,5 2,0	42,5 23 0,5	
46.20 25,0 2,5	46.30 26,0 3,5	44,5 24,5 2,0	44,5 23 0,5	
48.20 25,0 2,5	48.30 25,0 2,5	46,5 24,5 2,0	46,5 23 0,5	
50.20 24,5 2,0	50.30 25,0 2,5	48,5 24,5 2,0	48,5 23 0,5	

ΛΙΑΤΡΑΜΜΑ ΕΠΙΒΡΑΧΥΝΣΕΩΝ

ΠΑΘΟΣ ΗΜΕΡ.

C D

A

B

C

ΧΡΟΝΟΣ (ημέρες)

Πίνακας Επιβραχύνσεων

ΕΙΔΟΣ	ΧΡΟΝΟΣ (ημέρες)															
	1 ^η	4 ^η	5 ^η	6 ^η	7 ^η	8 ^η	11 ^η	12 ^η	13 ^η	14 ^η	15 ^η	20 ^η	21 ^η	22 ^η	24 ^η	
INVAR	4119	4107	4119	4128	4142	4250			4228	4219	4223	4332			4227	
A	2349	2348	2326	2341	2343	2420			2412	2401	2405	2402			2394	
B	2291	2279	2256	2271	2293	2385			2369	2361	2365	2353			2354	
C	2351	2327	2323	2307	2310	2378			2368	2371	2375	2355			2360	
D				2531	2440		2477	2462	2469	2487	2555	2549	2540	2542		

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

20. Στεφανίδης Μ., Τσικνάνου Π., Κατασκευή Φραγμάτων Βαρύτητας από Κυλινδρούμενο Σκυρόδεμα (Roller Compacted Concrete-R.C.C.), 9ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Τόμος Ι, Ελληνικό Τμήμα Σκυροδέματος, Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος, Καλαμάτα 14-16/2/1990.
21. ASTM C 116-90 Test Method for Compressive Strength of Concrete Using Portions of Beams Broken in Flexure, C 293-79 Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading), C496-90 Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
22. Κόλιας Σ., Σεμινάριο Τεχνολογίας Σκυροδέματος, Εργαστήριο Ωπλισμένου Σκυροδέματος, ΕΜΠ 1978.
23. Kolias S., Williams R.I.T., Cement Bound Road Materials: Strength and Elastic Properties Measured in the Laboratory, Transport and Road Research Laboratory, TRRL Supplementary Report 344: Crowthorne 1978.
24. Newman K., Concrete controle tests as measures of the properties of concrete, Proceedints of a Symposium on Concrete Quality, London, November 1969, C & CA
25. Lamprecht H.O., Vollpracht A., Synoptic Table on standards and practices for concrete roads in Europe, International Symposium on Concrete Roads, PIARC/Cembureau/BDZ, Aachen 2-4- June 1986.
26. Structural Design of Roller-Compacted Concrete for Industrial Pavements, Concrete Information, PCA, 1987.