

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΦΟΡΩΝ ΚΑΙ ΣΥΓΚΟΙΝΩΝΙΑΚΗΣ ΥΠΟΔΟΜΗΣ
ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ :Αναπλ. Καθηγήτης Σ. Κόλιας

**ΣΥΜΒΟΛΗ ΣΤΟΥΣ ΠΑΡΑΓΟΝΤΕΣ ΠΟΥ ΕΠΗΡΕΑΖΟΥΝ
ΤΗΝ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

**ΕΥΣΤΑΘΙΑ ΓΚΕΡΙΜΕΖΗ
ΗΡΑΚΛΗΣ ΖΩΤΑΛΗΣ**

ΑΘΗΝΑ 1998

Το άσπρο χαρτί σκληρός καθρέφτης
επιστρέφει μόνο εκείνο που ήσουν.
Το άσπρο χαρτί μιλεί με τη φωνή σου
τη δική σου φωνή
όχι εκείνη που σ' αρέσει.

Θερινό ηλιοστάσι
Γ.Σεφέρης

ΑΝΤΙ ΠΡΟΛΟΓΟΥ

Ο άνθρωπος είναι το ζώο το ξεχωριστό που στηριγμένο στα δυο του σκέλη επιχείρησε μια αποφασιστική απόδραση από το επίπεδο, στενό και πεπερασμένο βασίλειο των τετραπόδων και ξεχύθηκε σε αναζητήσεις, έρευνες και κατακτήσεις χωρίς τελειωμό. Οι πρώτες αναζητήσεις του ανθρώπου σχετίζονταν με τις βασικές ανάγκες του που δεν ήταν άλλες από την τροφή και την στέγη. Ενώ όμως η ανάγκη για τροφή δεν άργησε να καλυφθεί, αφού ο άνθρωπος έγινε θηρευτής άγριων ζώων, η ανάγκη για στέγη γινόταν ολοένα πιο επιτακτική γιατί είχε να αντιμετωπίσει τις καιρικές συνθήκες που διαρκώς μεταβάλλονταν.

Συνεπώς ο άνθρωπος δεν είχε άλλη επιλογή από το να ψάξει να βρει κάποιο κατάλληλο δομικό υλικό που να αντέχει σε στατικές καταπονήσεις, σε δυναμικές καταπονήσεις (σεισμοί), αλλά και στα καιρικά φαινόμενα (βροχή, αέρας, χιόνι). Με τη πάροδο των ετών και ύστερα από δοκιμές αρκετών δομικών υλικών, ανακάλυψε, το σημαντικότερο ίσως δομικό υλικό μέχρι σήμερα, το σκυρόδεμα. Το σκυρόδεμα λοιπόν είναι και το αντικείμενο που πραγματεύεται αυτή η διπλωματική. Ειδικότερα ασχολείται με την **ανθεκτικότητα** του σκυροδέματος μία εξίσου σημαντική όπως και η αντοχή ιδιότητά του. Συγκεκριμένα εξετάζει την **διαπερατότητα** (υδατοπερατότητα και αεροπερατότητα) του σκυροδέματος παράλληλα με την αντοχή του.

Για τη περαιτέρω έρευνα των δύο αυτών παραγόντων που επηρεάζουν την αντοχή του σκυροδέματος ήταν απαραίτητο να γίνουν πειράματα που θα επιβεβαίωναν την προϋπάρχουσα θεωρητική γνώση.

Σε αυτό το σημείο πρέπει να ευχαριστήσουμε το Ελληνικό Κέντρο Ερευνών Τσιμέντου για την φιλοξενία και την ουσιαστική βοήθεια που επέδειξαν στη προσπάθεια μας να ολοκληρώσουμε τη πειραματική διαδικασία καθώς και τον

επιβλέποντα αναπλ. καθηγητή Σ.Κόλια που δεν στάθηκε απλός παρατηρητής στην προσπάθειά μας, αντίθετα ήταν αρωγός της, δίνοντάς μας να καταλάβουμε πως η γνώση αποκτιέται με κόπο και προσπάθεια στο τέλος όμως μένει το γλυκό συναίσθημα της κατάκτησής της.

Στη συνέχεια παρατίθενται τα δύο μέρη της διπλωματικής εργασίας, το πρώτο αναφέρεται στις γενικές γνώσεις που αποτελούν το υπόβαθρο της και το δεύτερο μέρος εξειδικεύεται στην υδατοπερατότητα και αεροπερατότητα του σκυροδέματος περιλαμβάνοντας την στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων των πειραμάτων καθώς και τα συμπεράσματα που προέκυψαν από αυτά. Τέλος παρατίθεται ένα παράρτημα στο οποίο είναι κατεγγραμμένα αναλυτικά τα αποτελέσματα των πειραμάτων.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σελ.

ΑΝΤΙ ΠΡΟΛΟΓΟΥ

ΓΕΝΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. ΤΑ ΥΛΙΚΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	1
1.1. ΤΣΙΜΕΝΤΟ.....	1
1.1.1. ΧΗΜΕΙΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ.....	1
1.1.2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ.....	10
1.2. ΝΕΡΟ ΑΝΑΜΕΙΞΕΩΣ.....	11
1.3. ΑΔΡΑΝΗ ΥΛΙΚΑ.....	13
2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΝΩΠΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	17
2.1. ΕΞΙΔΡΩΣΗ.....	17
2.2. ΑΠΟΜΕΙΞΗ.....	19
2.3. ΕΡΓΑΣΗΜΟ.....	19
3. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΣΚΛΗΡΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	23
3.1. Η ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΕΞΩΤΕΡΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ.....	23
3.2. ΣΥΝΕΡΓΑΣΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΧΑΛΥΒΑ.....	26
3.3. Η ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΜΕ ΤΟ ΧΡΟΝΟ.....	27
3.4. Η ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΚΑΙ ΤΙΣ ΑΝΑΛΟΓΙΕΣ ΣΥΝΘΕΣΗΣ.....	29
3.5. Η ΜΕΤΡΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ.....	30

3.6. ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΤΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΕΡΓΟΥ.....	31
3.7. ΕΛΑΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΠΛΑΣΤΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ.....	31
3.8. ΧΡΟΝΙΑ ΣΥΣΤΟΛΗ ΚΑΙ ΔΙΑΣΤΟΛΗ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	34
3.9. ΕΡΠΥΣΜΟΣ.....	37
3.10. ΤΟ ΠΟΡΩΔΕΣ.....	39
3.11. ΥΔΑΤΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΥΔΑΤΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ.....	41
3.11.1. ΡΟΗ, ΔΙΑΧΥΣΗ ΚΑΙ ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑ.....	43
3.11.2. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑΣ.....	44
3.11.3. ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΗΣ ΔΙΑΧΥΣΗΣ.....	45
3.11.4. ΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑ.....	46
4. ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ.....	48
4.1. ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	48
4.1.1. ΑΙΤΙΕΣ ΑΝΕΠΑΡΚΟΥΣ ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑΣ.....	48
4.1.2. ΔΙΕΛΕΥΣΗ ΡΕΥΣΤΩΝ ΔΙΑΜΕΣΩ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	49
4.1.3. ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ.....	53
4.2. ΥΔΑΤΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ.....	55
4.3. ΑΕΡΟΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΚΑΙ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ ΥΔΡΑΤΜΩΝ.....	61
4.3.1. ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ.....	63
4.4. Η ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ ΜΕΣΑ ΣΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	75
4.4.1. ΓΕΝΙΚΗ Η΄ ΟΜΟΙΟΜΟΡΦΗ ΔΙΑΒΡΩΣΗ.....	76
4.4.2. ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΔΙΑΒΡΩΣΗΣ ΤΟΥ ΧΑΛΥΒΑ.....	77
4.4.3. ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΚΑΤΑ ΒΕΛΟΝΙΣΜΟ.....	79
ΕΙΔΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	82
4.4.1. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ.....	82

4.4.2. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.	86
2.1. ΥΛΙΚΑ.	86
2.2. ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΘΕΣΗΣ.	91
2.3. ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ.	92
4.4.3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ.	94
4.2. ΥΔΑΤΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ.	94
4.2. ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ.	95
4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ.	98
4.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ.	98
4.2. ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.	142
4.2.1. ΚΡΙΤΙΚΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ.	142
4.2.2. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΣΤΗΝ ΥΔΑΤΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ.	143
4.2.3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ Ν/Τ ΣΤΗΝ ΥΔΑΤΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ.	144
4.2.4. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ ΣΤΗΝ ΥΔΑΤΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ.	145
4.2.5. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΛΟΓΟΥ Ν/Τ ΚΑΙ ΤΗΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ ΣΤΟ ΒΑΘΟΣ ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗΣ.	146
4.2.6. ΣΥΝΔΕΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ ΑΝΤΟΧΩΝ ΜΕ ΔΙΑΠΕΡΑΤΟΤΗΤΑ.	148
4.3. ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.	149
4.4. ΣΥΣΤΑΣΕΙΣ ΓΙΑ ΠΕΡΑΙΤΕΡΩ ΕΡΕΥΝΑ.	149
ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ.	151
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.	164

ΓΕΝΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

1. ΤΑ ΥΛΙΚΑ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

1.1. ΤΣΙΜΕΝΤΟ

1.1.1. ΧΗΜΕΙΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

A. Γενικά

Το τσιμέντο είναι προϊόν που περιέχει οξείδια των στοιχείων, Ca, Si, Al, Fe, σε τέτοιες αναλογίες ώστε να σχηματίζουν υδραυλικές κονίες. Υδραυλική κονία λέγεται κάθε ουσία που ερχόμενη σε επαφή (σε ορισμένη αναλογία) με το νερό σχηματίζει αφού στερεοποιηθεί νέο στερεό συσσωμάτωμα με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες.[1]

B. Συστατικά Τσιμέντου

Τα διάφορα οξείδια όταν ενώνονται μεταξύ τους στο κρυσταλλικό πλέγμα σχηματίζουν ενώσεις που η αναλογία τους επηρεάζει τις διάφορες ιδιότητες του τσιμέντου. Οι βασικές από αυτές τις ενώσεις (κρυστάλλους) είναι:

- α) Το πυριτικό ασβέστιο $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, συμβολίζεται CS.
- β) Το πυριτικό τριασβέστιο $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, σε ποσοστό 54% περίπου κατά βάρος. Στη χημεία του τσιμέντου συμβολίζεται C_3S .
- γ) Το πυριτικό διασβέστιο $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ή C_2S . Βρίσκεται σε ποσοστό ~17%.
- δ) Το αργιλικό τριασβέστιο $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ή C_3A . Βρίσκεται σε ποσοστό ~19%.
- ε) Το αργιλοσιδηρικό τετρασβέστιο $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ή C_4AF . Βρίσκεται σε ποσοστό ~9%.

Ένα καλό τσιμέντο δεν πρέπει να έχει καθόλου CS γιατί αυτό υδρολύεται εύκολα με την πάροδο του χρόνου και αποσαθρώνει το τσιμέντο. Επίσης και το C_2S πρέπει να είναι χαμηλό γιατί και αυτό παρουσιάζει τάσεις υδρολύσεως. Συνεπώς η έψηση του τσιμέντου πρέπει να γίνεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες από αυτές που σχηματίζονται τα CS, C_2S ώστε το τελικό προϊόν να έχει όσο το δυνατόν μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε C_3S .

Η αναλογία των παραπάνω συστατικών έχει επίδραση στην ταχύτητα αναπτύξεως της αντοχής, δηλαδή στην ταχύτητα της χημικής αντιδράσεως του τσιμέντου με το νερό. Οι δύο πυριτικές ενώσεις συμβάλλουν σημαντικά στη γρήγορη ανάπτυξη της αντοχής, αντίθετα από τις αργλικές.[2]

Γ. Πρώτες Ύλες

Συνήθως δύο είναι τα κυριώτερα πετρώματα που χρησιμοποιούνται σαν πρώτες ύλες στις τσιμεντοβιομηχανίες.

α) Ασβεστόλιθος (από όπου λαμβάνεται το CaO).

β) Άργιλος (άπο όπου λαμβάνεται το Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2).

Αν όμως η άργιλος είναι πτωχή σε SiO_2 τότε χρησιμοποιείται και τρίτη πρώτη ύλη ή άμμος (θαλάσσια ή ποταμίσια). Επίσης αν η άργιλος είναι πτωχή σε Fe_2O_3 τότε προστίθενται και 2% φρύγματα σιδηροπυριτών.

Στην Ελλάδα ο ασβεστόλιθος είναι εξαιρετικά διαδεδομένο πέτρωμα. Η πιο συχνή μορφή εμφάνισης ασβεστόλιθου είναι του δολομιτικού ασβεστόλιθου του οποίου το ψήσιμο δημιουργεί προβλήματα. Ακόμη και η άργιλος είναι άφθονη στην Ελλάδα αλλά δεν έχει πάντα την κατάλληλη σύνθεση. Κριτήριο της καταλληλότητας της αργίλλου είναι ο πυριτικός δείκτης ($\% SiO_2/Al_2O_3$), που πρέπει να έχει την τιμή περίπου 4. Για χαμηλότερες τιμές πρέπει να προστεθεί άμμος.

Δ. Ανεπιθύμητες Προσμίξεις

α) **Mg.** Οριακή αναλογία Mg:Ca είναι το 5%.Εαν στον ασβεστόλιθο το Mg υπερβεί αυτή την αναλογία είναι ακατάλληλο για τσιμέντο.Αυτό συμβαίνει γιατί στην διάρκεια της έψησης το Mg σχηματίζει ενώσεις υδατοδιαλυτές που προκαλούν αποσάθρωση σύμφωνα με την πορεία: Διάλυση Mg -ένωση με CO₂ ατμόσφαιρας - διόγκωση - ρωγμές - αποσάθρωση.

β) **Na,K.** Τα οξείδια των αλκαλίων στα τσιμέντα της Ελλάδας δεν πρέπει να υπερβαίνουν το 5% γιατί προκαλούν σημαντική μείωση των αντοχών.

γ) **Ελεύθερο CaO.** Η ελεύθερη άσβεστος είναι η ποσότητα του CaO που δεν εισέρχεται στο αργιλοπυριτικό πλέγμα.Προκαλεί αλκαλικότητα λόγω υδρολύσεως στην διάρκεια της πήξεως που είναι ανεπιθύμητη και ακόμα εκλύει μεγάλη θερμότητα ενυδατώσεως (με επακόλουθα ισχυρές διαστολές και συστολές). Δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0.5%.^[1]

Ε. Ιδιότητες Τσιμέντου – Προδιαγραφές

1.Αντοχές κάμψης-θλίψης

Μετρώνται με δοκίμια ορισμένων διαστάσεων 4cm × 4cm × 16cm. Λαμβάνονται οι τιμές των αντοχών σε χρόνους 2 ώρες, 7 ημέρες, 28 ημέρες και συγκρίνονται βάσει προτύπων.Για να υποστηριχθεί όμως με βεβαιότητα η αντοχή ενός τσιμέντου χρειάζονται μακροχρόνιες μετρήσεις αντοχών που διαρκούν έως 3 χρόνια.

Τρία είδη τσιμέντου διακρίνονται σε σχέση με το χρόνο αναπτύξεως αντοχών:

- α)Ταχείας αναπτύξεως αντοχών (RHC) ή ταχείας πήξεως.
- β)Κανονικής αναπτύξεως αντοχών (NHC).
- γ)Βραδείας αναπτύξεως αντοχών (SHC).

Προτιμώτερο είναι το (NHC) γιατί το (RHC) θερμαίνεται απότομα και προκαλεί ρωγμές ενώ το (SHC) χρησιμοποιείται σε ελάχιστες περιπτώσεις.

2.Συντελεστές διαστολής-συστολής.

Ο προσδιορισμός τους γίνεται πειραματικά και πρέπει να είναι γνωστός ιδίως στη περίπτωση μεγάλων έργων ή προεντεταμένου σκυροδέματος.

3.Θερμότητα ενυδάτωσης.

Στη διάρκεια της πήξεως εκλύεται μεγάλη θερμότητα και σε μεγάλα έργα πρέπει να απαχθεί.Συνήθως σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται τσιμέντο εκλύσεως χαμηλής θερμοκρασίας (Moderated heat cement).Όλα τα ελληνικά τσιμέντα είναι τύπου moderated heat και πλεονεκτούν έναντι των άλλων.

4.Ταχύτητα ενυδάτωσης-πήξης.

Το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ της ενυδάτωσης και της πήξης του τσιμέντου είναι χαρακτηριστικό για κάθε τσιμέντο.Επειδή όμως το τσιμέντο πήζει πολύ γρήγορα, στην τελική κατεργασία προστίθεται 5% περίπου γύψος που επιβραδύνει την πήξη ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

ΣΤ.Τύποι Τσιμέντων

Ανάλογα με τη σύνθεσή τους, το βαθμό αλέσεως και τα πρόσθετα υλικά, τα τσιμέντα κατατάσσονται σε διάφορους τύπους και κατηγορίες αντοχής.Σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Τσιμέντων τα παραγόμενα τσιμέντα κατατάσσονται στους ακόλουθους τύπους:

Τύπος I - Τσιμέντο Πόρτλαντ

Χαρακτηρίζονται ως (αμιγή) τσιμέντα Πόρτλαντ τα τσιμέντα που προέρχονται από την άλεση του Κλίνκερ με τις ελάχιστες αναγκαίες προσθήκες. Οι προσθήκες αυτές είναι γύψος, όση απαιτείται για τη ρύθμιση της πήξης και συνήθως 2-3% και φίλλερ (filler) έως 3% κατά βάρος.

Τύπος II - Τσιμέντα Πόρτλαντ με ποζολάνες

Χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που περιέχουν εκτός από τα προηγούμενα υλικά και ποζολάνη σε ποσοστό έως 20% κατά βάρος. Ειδικά το τσιμέντο με ποσοστό 10% ποζολάνης ονομάζεται "Τσιμέντο Πόρτλαντ Ελληνικού τύπου" (Τύπος IIa).

Τύπος III - Ποζολανικά τσιμέντα Πόρτλαντ

Τα ποζολανικά τσιμέντα περιέχουν ποζολάνη σε ποσοστό 20-40% κατά βάρος. Παρουσιάζουν μικρότερη θερμότητα ενυδάτωσης και αυξημένη ανθεκτικότητα σε διαβρωτικά μέσα. Τα τσιμέντα αυτά πρέπει να ικανοποιούν τη δοκιμή ποζολανικότητας.

Τύπος IV - Τσιμέντα Πόρτλαντ ανθεκτικά στα θειικά άλατα (Sulfate resistant)

Τα τσιμέντα του τύπου αυτού δεν έχουν προσθήκες (ποζολάνες κτλ) αλλά το αργλικό τριασβέστιο (C_3A) περιορίζεται σε ένα ποσοστό κάτω από κάποιο όριο π.χ. 5% ενώ στον τύπο I το C_3A μπορεί να φτάσει και 10-12%.

Z. Κατηγορίες Αντοχής Τσιμέντου

Από άποψη αντοχής τα τσιμέντα κατατάσσονται στις κατηγορίες:

35 , 45 , 55

Οι αριθμοί παριστάνουν την αντοχή των τσιμεντών σε Μρα όπως προσδιορίζεται συμβατικά σύμφωνα με τον Κανονισμό. Ο ρυθμός αύξησεως της αντοχής του τσιμεντού πετυχαίνεται συνήθως με αύξηση της λεπτότητας η οποία προσδιορίζεται από τη μέτρηση της ειδικής επιφάνειας του τσιμεντού με τη βοήθεια της συσκευής Blaine. Ένα λεπτόκοκκο τσιμέντο έχει γρηγορότερο ρυθμό αύξησεως της αντοχής από ένα χονδροαλεσμένο τσιμέντο. Θεωρητικά οι τύποι των τσιμεντών θα ήταν 9. Οι παραγόμενοι όμως τύποι είναι λιγότεροι γιατί είτε δεν είναι όλοι οι συνδιασμοί πρακτικά εφικτοί, είτε δεν έχουν μεγάλη ζήτηση.

Η. Χρήση Τσιμεντών στην Ελλάδα

Στην Ελλάδα κυρίως χρησιμοποιούνται τώρα ο τύπος **II/35** σε σακκιασμένο τσιμέντο ή χύμα (το λεγόμενο κοινό) και το τσιμέντο τύπου **I/45** και **I/55** (μόνο χύδην), διακινούμενο με σιλοφόρα τσιμεντού από το εργοστάσιο τσιμεντών στα σιλό των εργοστασίων παραγωγής σκυροδέματος (το λεγόμενο “καθαρό” τσιμέντο).

Το τσιμέντο **I/55** χρησιμοποιείται όταν υπάρχει ανάγκη για ανάπτυξη θλιπτικών αντοχών νωρίς, για γρήγορο ξεκαλούπωμα, όπως είναι π.χ. αναγκαίο στην προκατασκευή. Το συνήθως χρησιμοποιούμενο τσιμέντο από Βιομηχανίες Ετοίμου Σκυροδέματος είναι το **I/45** στην Αθήνα, ενώ στην επαρχία χρησιμοποιείται ακόμη το τσιμέντο **II/35** (χύμα). Συγκριτικά απαιτείται μεγαλύτερη ποσότητα τσιμεντού **II/35** για να επιτύχει τις αντοχές στο σκυρόδεμα που πετυχαίνει το **I/45**, ενδεικτικά για το B225, είναι αρκετά 270 kg/cm³ τσιμέντο **I/45**, ενώ απαιτούνται περίπου 310-320 kg/cm³ τσιμέντο **II/35** για τις ίδιες αντοχές.

Το τσιμέντο **II/45**, που είναι και ποζολανικό και έχει μεγάλη αντοχή, χρησιμοποιείται εκεί που υπάρχει ανάγκη για χαμηλή θερμότητα ενυδατώσεως (ογκώδη έργα, φράγματα, υπερχειλιστές στα έργα Δ.Ε.Η. κλπ) και ταυτόχρονα υψηλή αντοχή όπως απαιτείται π.χ. στις σήραγγες.

Το τσιμέντο **II/35** σε σάκκους των 50 kg χρησιμοποιείται κυρίως για την παρασκευή κονιαμάτων και επιχρισμάτων κατά το χτίσιμο και το σοβάτισμα των τοιχοποιιών.

Τέλος το λεύκο τσιμέντο, που είναι συνήθως τύπου **I/55**, χρησιμοποιείται για την παρασκευή διακοσμητικών προϊόντων τσιμέντου, ανεπίχρηστου αρχιτεκτονικού σκυροδέματος.[3]

Θ. Ενυδάτωση του Τσιμέντου

Η πήξη και η σκλήρυνση του σκυροδέματος οφείλονται αποκλειστικά στη χημική δράση μεταξύ τσιμέντου και νερού. Τα συστατικά του τσιμέντου ενώνονται με το νερό ύστερα από μία σειρά περίπλοκων χημικών αντιδράσεων που διαρκούν επί χρόνια. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **ενυδάτωση** του τσιμέντου. Στην πραγματικότητα δεν πρόκειται για πραγματική ενυδάτωση, δηλαδή ένωση με μόρια νερού αλλά και για υδρόλυση, στην οποία οφείλεται η πήξη και η σκλήρυνση του τσιμέντου. Με την ανάμειξη του τσιμέντου με το νερό δημιουργείται μια γκριζοπράσινη πολτώδης μάζα, η τσιμεντοκονία. Η ρευστότητα του μείγματος βέβαια εξαρτάται από τις αναλογίες μείξεως των δύο υλικών. Η ενυδάτωση αρχίζει με ταχύ ρυθμό από την επιφάνεια κάθε κόκκου και προχωρεί προς το εσωτερικό του με ταχύτητα επιβραδυνόμενη γιατί τα προϊόντα της ενυδάτωσης εμποδίζουν τη διείσδυση του νερού στο εσωτερικό του κόκκου. Πάντως η ταχύτητα ενυδάτωσης εξαρτάται εκτός από το μέγεθος του κόκκου, δηλαδή τη λεπτότητα αλέσεως του τσιμέντου, από τη χημική του σύσταση αλλά και τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Η ενυδάτωση του τσιμέντου φαίνεται ότι συνεχίζει για πολλά χρόνια, μια και δοκίμια σκυροδέματος που είχαν κατασκευάσει οι Αμερικάνοι πριν από 50 περίπου χρόνια και δοκιμάζουν κατά διαστήματα δείχνουν ακόμη αύξηση αντοχής.

Οι χημικές διαδικασίες αρχίζουν αμέσως με την ανάμειξη των δύο υλικών και συνεχίζονται ομαλά επί χρόνια. Κατά τη διάρκεια των αντιδράσεων αυτών τα

τέσσερα κύρια συστατικά του τσιμέντου ενώνονται με το νερό και σχηματίζουν ένυδρες κρυσταλλικές ενώσεις. Η μορφή των αντιδράσεων αυτών δεν είναι τελείως γνωστή, κυρίως για τα δύο τελευταία συστατικά. Η αρχική και η τελική μορφή των ενώσεων όμως είναι η εξής:

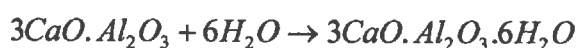
Για το πυριτικό τριασβέστιο:



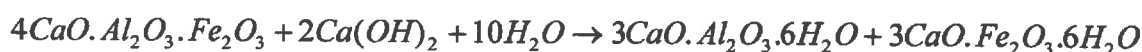
Για το πυριτικό διασβέστιο:



Για το αργιλικό τριασβέστιο:



Για το αργιλοσιδηρικό τετρασβέστιο:



Οι χημικές αυτές αντιδράσεις πραγματοποιούνται με σύγχρονη έκλυση θερμότητας και συστολή του όγκου των αρχικών προϊόντων. Όπως φαίνεται από τις παραπάνω χημικές αντιδράσεις, το τσιμέντο δεσμεύει νερό 25-28% του βάρους του. Πέρα από αυτό, 15% περίπου ακόμη συγκρατείται από τους κρυστάλλους σαν κρυσταλλικό νερό. Τη βαθμιαία εξέλιξη της κρυσταλλώσεως, δηλαδή των χημικών αντιδράσεων, δεν μπορούμε να την παρακαλούθησουμε απευθείας (μικρή ιδέα δίνει το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο), αλλά εμμέσως από την παρακολούθηση της εξελίξεως της αντοχής του υλικού

I. Πρόσμικτα Υλικά Τσιμέντου

1) Ποζολάνες. Η ονομασία ποζολάνη προήλθε από την περιοχή Pozzuoli της Ιταλίας, όπου οι Ρωμαίοι είχαν ανακαλύψει ότι το έδαφος παρουσίαζε υδραυλικές ικανότητες. Σήμερα, ποζολάνες ονομάζουμε πυριτικά ή αργιλοπυριτικά υλικά, που έχουν την ιδιότητα να ενώνονται με την υδράσβεστο και να σχηματίζουν ένυδρες ασβεστοπυριτικές ενώσεις, που με το χρόνο σκληρύνονται

και αποκτούν μικρές ή μεγαλύτερες αντοχές. Η δράση αυτή οφείλεται κυρίως στο άμορφο πυριτικό υλικό των ποζολανών. Για να χρησιμοποιηθεί μια ποζολάνη για την παρασκευή τσιμέντων του τύπου II ή III πρέπει να ικανοποιεί την δοκιμή δραστηριότητας που προβλέπει ο Κανονισμός, δηλαδή να παρουσιάζει συμβατική αντοχή τουλάχιστον 5 Μpa. Στην Ελλάδα υπάρχουν ηφαιστιογενείς γαίες με ποζολανικές ιδιότητες σε πολλές περιοχές, όπως η Θήρα (θηραϊκή γη, η εξόρυξή της όμως έχει απαγορευτεί για περιβαλλοντικούς λόγους), η νήσος Μύλος (μυλαϊκή γη), τα νησιά Γιαλί και Νίσυρος των Δωδεκανήσων, στο νομό Πέλλης και αλλού.

2) Ιπτάμενη Τέφρα. Ιπτάμενη τέφρα ονομάζουμε τα σε λεπτότατο καταμερισμό κατάλοιπα που προκύπτουν από την καύση γαιανθράκων ή λιγνιτών και που συλλέγονται κατά την έξοδο των αερίων καύσεως από τις καπνοδόχους των Ατμοηλεκτρικών Σταθμών με τα ηλεκτροστατικά φίλτρα. Στην Ελλάδα ιπτάμενη τέφρα παράγεται στους θερμοηλεκτρικούς σταθμούς της Δ.Ε.Η. στην Πτολεμαΐδα και τη Μεγαλόπολη.

Η δραστηριότητα των τεφρών οφείλεται στη μεγάλη περιεκτικότητα σε SiO_2 , Al_2O_3 και CaO . Οι δύο πρώτες ενώσεις προσδίδουν στην τέφρα ποζολανικές ιδιότητες ενώ το οξείδιο του Ca υδραυλικές ιδιότητες.

3) Φίλλερ (από την αγγλική λέξη *Filler*). Φίλλερ ονομάζουμε υλικά, συνήθως αδρανή, σε λεπτότατο καταμερισμό. Τα φίλλερ σε μικρές ποσότητες επιδρούν ευνοικά στο εργάσιμο και την υδατοπερατότητα. Η δράση τους είναι κυρίως μηχανική, δηλαδή δρουν σαν λιπαντικό για το εργάσιμο και με τη διόγκωση των κόκκων παρουσία υγρασίας αυξάνουν την υδατοστεγανότητα. Σπανίως παρουσιάζουν και ποζολανικές ή υδραυλικές ιδιότητες όπως π.χ. *silicafume*, πυριτική παπάλη η οποία παρουσιάζει έντονη ποζολανική δράση. Αυτό εξαρτάται από το αρχικό υλικό από το οποίο προέρχεται το φίλλερ.

1.1.2. ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Η σειρά των εργασιών από την εξόρυξη των πρώτων υλών ως το τελικό προϊόν είναι η ακόλουθη:

α) Εξόρυξη ασβεστολιθικών πετρωμάτων και αργιλικών εδαφών χωριστά. Τα πετρώματα αυτά περνούν από σπαστήρες, ώστε να τεμαχιστούν και να αποκτήσουν διάμετρο μερικών εκατοστών.

β) Μετά την έξοδο τους από τους σπαστήρες γίνεται ανάμειξη των δύο υλικών (η εργασία αυτή λέγεται **προομογενοποίηση**).

γ) Έπειτα αλέθονται σε τριβεία, ώστε να αποκτήσουν διάμετρο λίγων χιλιοστών. Το προϊόν της αλέσεως, λεπτόκοκκο μείγμα ασβεστολιθικής και αργιλικής αμμου, αποθηκεύεται σε σιλό και ονομάζεται **φαρίνα**.

δ) Το μείγμα εισάγεται στο επάνω άκρο κυλινδρικής καμίνου, η οποία περιστρέφεται αργά γύρω από τον άξονά της. Η θερμότητα παράγεται από κονιορτοποιημένο άνθρακα τοποθετημένο στο κάτω άκρο της. Η θερμοκρασία μέσα στην κάμινο είναι περίπου 600°C στο επάνω άκρο και φτάνει στους 1500°C στο κάτω άκρο, που είναι και το σημείο εξόδου των προϊόντων. Τα προϊόντα της οπτήσεως ονομάζονται εκβολάδες ή διεθνώς Klinker. Έχουν διάμετρο λίγων εκατοστών, χρώμα μαυροπράσινο και αποτελούν, κατά κάποιο τρόπο, το βασικό συστατικό του τσιμέντου Portland.

ε) Τα προϊόντα αυτά της οπτήσεως, οι εκβολάδες, αλέθονται και αποκτούν τη γνωστή μορφή του τσιμέντου. Το υλικό αυτό, όπως προκύπτει από την άλεση των Klinker, χωρίς καμία προσθήκη ή τροποποίηση, ονομάζεται "τσιμέντο Πόρτλαντ". Στην Ελλάδα κατά τη φάση αυτή της παραγωγής προσθέτουμε ποζολάνες ή και πηλάνη τέφρα μέχρι 20% κατά βάρος. [3]

1.2. ΝΕΡΟ ΑΝΑΜΕΙΞΕΩΣ

Το νερό είναι ένα από τα δύο ενεργά συστατικά του σκυροδέματος. Μαζί με το τσιμέντο παίρνει μέρος σε σειρά χημικών αντιδράσεων, που οδηγούν, με τη δημιουργία ένυδρων κρυστάλλων, στην πήξη και τη σκλήρυνση του μείγματος. Η βασική απαίτηση απέναντι στο νερό είναι να μην περιέχει συστατικά που μπορούν να βλάψουν ή να επηρεάσουν τις αντιδράσεις ενυδατώσεως.

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

Τούτο συμβαίνει, γιατί η δράση των διαφόρων ουσιών μεταβάλλεται ανάλογα με την ποιότητα του τσιμέντου, τη σύγχρονη παρουσία και άλλων στοιχείων, καθώς και ανάλογα με τη μορφή, δηλαδή τη χημική σύνθεση αυτών μέσα στο νερό. Η παρουσία π.χ. οργανικών ουσιών δεσμεύει μέρος του ασβεστίου του τσιμέντου. Το μέγεθος της βλαπτικότητας όμως εξαρτάται και από την περιεκτικότητα του τσιμέντου σε ασβέστιο. Έτσι η ίδια ποσότητα οργανικής ενώσεως μπορεί να έχει διαφορετικά αποτελέσματα, ανάλογα με τη συνθέση των υλικών που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή του σκυροδέματος.

Για το νερό που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του σκυροδέματος μπορούμε γενικά να είμαστε περισσότερο ανεκτικοί, παρά για τα νερά που δρουν εξωτερικά και μόνιμα. Και τούτο, γιατί η ποσοστιαία αναλογία του νερού αναμείξεως, και συνεπώς και κάθε ξένης ουσίας μέσα σε αυτό, είναι μικρή και εξάλλου γιατί οι ουσίες αυτές δρουν ώσπου να εξαντληθούν. Στην περίπτωση όμως εξωτερικών νερών, όπως το θαλάσσιο ή τα νερά των αποχετεύσεων, η δράση τους είναι μόνιμη και η ποσότητα των επιβλαβών ουσιών ανεξάντλητη αφού τα νερά αυτά ανανεώνονται συνεχώς. [3]

Οι κυριώτερες από τις χημικές ουσίες που έχουν δυσμενή επίδραση στην εξέλιξη των χημικών αντιδράσεων, με αποτέλεσμα είτε τη μείωση της τελικής αντοχής, είτε την καθυστέρηση της πήξεως είναι οι ακόλουθες:

α) Η ζάχαρη: Αν και ο τρόπος που δρα η ζάχαρη στο σκυρόδεμα δεν είναι γνωστός, θεωρείται πολύ επικίνδυνο συστατικό γιατί διακόπτει τελείως τις χημικές αντιδράσεις των συστατικών του τσιμέντου με το νερό ακόμη και αν βρίσκεται σε μικρά ποσά. Τα ανώτερα επιτρεπτά όρια στην παρουσία ζάχαρης μέσα στο νερό είναι 0.05% κ.β. και σε πολλές περιπτώσεις 0.02% κ.β.

β) Τα οξέα: Η παρουσία ανθρακικού οξέως ή άλλων οργανικών οξέων είναι επιβλαβής γιατί δεσμεύουν το Ca(OH)_2 που είναι απαραίτητο για τις αντιδράσεις που συντελούν στην πήξη. Νερό επικίνδυνο για το τσιμέντο θεωρείται νερό με $\text{pH} < 6$.

γ) Λάδια και λίπη: Νερά που περιέχουν λιπαρές ουσίες ή λάδια παρουσιάζουν πρόβλημα επαφής του νερού με το τσιμέντο γιατί η μηχανική προσκόλληση των ουσιών αυτών στους κόκκους του τσιμέντου είναι μεγάλη.

Υπάρχουν όμως και ουσίες που μπορεί η παρουσία τους αρχικά να προκαλεί μείωση των αντοχών αλλά με την πάροδο του χρόνου να εμφανίζουν υψηλότερες αντοχές από το τσιμέντο με το απεσταγμένο νερό, π.χ. τσιμέντο με θαλασσινό νερό παρουσίασε αρχική μείωση αντοχών στις 28 ημέρες 15% ενώ τελικά στα 2 χρόνια η αντοχή εμφανίστηκε 40% ανώτερη.[1]

1.3. ΑΔΡΑΝΗ ΥΛΙΚΑ

A. Γενικά

Το σκυρόδεμα αποτελείται από αδρανή υλικά και τσιμεντοκονία που χρησιμεύει ως συνδετική ύλη αυτών. Τα αδρανή υλικά οφείλουν την ονομασία τους στο γεγονός ότι παραμένουν χημικώς αδρανή, σε αντίθεση με το τσιμέντο και το νερό, στη χημική δράση των οποίων οφείλεται η σκλήρυνση του σκυροδέματος. Τα αδρανή υλικά συνδέονται και συγκολλούνται μεταξύ τους και συμβάλλουν, μηχανικά μόνο, στην αντοχή του τελικού προϊόντος. Για αδρανή υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν θεωρητικά οποιαδήποτε υλικά συγκεντρώνουν τις τρεις βασικές απαιτήσεις: **επαρκή αντοχή, επαρκή πρόσφυση και χημική ανεκτικότητα με την τσιμεντοκονία.** Το συγγενέστερο υλικό προς την τσιμεντοκονία είναι τα πετρώματα και για αυτό κατά κανόνα ως αδρανή υλικά για την παρασκευή του κοινού τύπου σκυροδέματος χρησιμοποιούνται συντρίμματα διαφόρων πετρωμάτων. Τα πετρώματα είτε θραύονται τεχνητά (θραυστά) είτε συλλέγονται όπως βρίσκονται στη φύση (συλλεκτά). Τα καταλληλότερα πετρώματα είναι τα ασβεστολιθικά και τα πυριτικά.[3]

B. Προέλευση και Αντοχή των Αδρανών

Για την παρασκευή του κοινού σκυροδεμάτος, στο οποίο η μηχανική αντοχή είναι το κυριότερο χαρακτηριστικό, σημασία έχει η αντοχή σε θλίψη του μητρικού πετρώματος. Εκτός από την παραπάνω αντοχή σε θλίψη, το πέτρωμα πρέπει να είναι απαλλαγμένο από κομμούς και να μην αποσαθρώνεται από την επίδραση των καιρικών συνθηκών. Οι ιδιότητες αυτές χαρακτηρίζονται με τον όρο **υγεία** του πετρώματος. Η υγεία του πετρώματος μετρείται σύμφωνα με την Αμερικάνικη προδιαγραφή ASTM C88. Η άμμος πρέπει να παρουσιάζει απώλεια μικρότερη του 10% και τα χονδρότερα αδρανή απώλεια 12%.

Εαν το υλικό δεν καλύπτει τις παραπάνω απαιτήσεις τότε μπορεί να ελεγχθεί το παρασκευαζόμενο σκυρόδεμα σε κύκλους καταψύξεως και αποψύξεως κατά την Αμερικάνικη προδιαγραφή ASTM C290 και να γίνει δεκτό εφόσον παρουσιάζει συντελεστή ανθεκτικότητας μεγαλύτερο του 80%.

Τέλος πρέπει το πέτρωμα να διαθέτει αρκετή **αντοχή σε επιφανειακή φθορά**, δηλαδή αντοχή σε επιφανειακή τριβή και επιφανειακές κρούσεις. Ο έλεγχος γίνεται με τη συσκευή Los Angeles κατά τις Αμερικάνικες προδιαγραφές ASTM C535 και C131. Η φθορά πρέπει να είναι μικρότερη του 40%.

Γ. Καθαρότητα

Με την έννοια αυτή εννοούμε ότι τα αδρανή δεν πρέπει να έχουν επάνω στην επιφανειά τους ή μέσα στη μάζα τους ή αναμεταξύ τους ξένες ουσίες που μπορεί να εμποδίσουν την πρόσφυση με το κονίαμα ή να έχουν επιβλαβή χημική επίδραση στο τσιμέντο ή στο σίδερο. Τα κυριώτερα από τα επιβλαβή αυτά πρόσμικτα υλικά είναι:

1) Παιπάλη: Ως παιπάλη χαρακτηρίζεται το λεπτότερο τμήμα του υλικού που περνάει από το κόσκινο No 200 (75mm) της Αμερικανικής σειράς κοσκίνων και προσδιορίζεται σύμφωνα με την μέθοδο ΣΚ-305. Η παιπάλη μπορεί να είναι πηλός ή άργιλλος ή σκόνη από το ίδιο το πέτρωμα. Ιδιαίτερη όμως σημασία έχει η κατανομή της παιπάλης μέσα στα αδρανή. Μπορεί να είναι:

α) κολλημένη επάνω στην επιφάνεια των χονδρότερων κόκκων,

β) να σχηματίζει μικρούς σβώλους και

γ) να είναι διασκορπισμένη ομοιόμορφα ανάμεσα στους κόκκους των αδρανών.

Στην πρώτη περίπτωση εμποδίζει την πρόσφυση μεταξύ αδρανών και κονιάματος. Στην δεύτερη περίπτωση δημιουργεί αδύνατα σημεία μέσα στη μάζα του σκυροδέματος. Στην τρίτη περίπτωση έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της

αντοχής, αλλά συντελεί, όμως, ως ένα βαθμό, και στην αύξηση της πυκνότητας και της πλαστικότητας του μείγματος. Κατά τον Ελληνικό κανονισμό, η παιπάλη δεν πρέπει να υπερβαίνει το 16% κ.β. της άμμου και το 1% κ.β. των χονδρότερων κλασμάτων (ρυζάκι, γαρμπίλι, σκύρα). Η παιπάλη απομακρύνεται όταν τα αδρανή πλυθούν με νερό.

2) Οργανικές Προσμίξεις: Στις οργανικές προσμίξεις περιλαμβάνονται υλικά οργανικής (ζωικής ή φυτικής) προελεύσεως γαιάνθρακες και λιγνίτες. Τα οργανικά προϊόντα μπορεί να έχουν επίδραση στην πήξη της κονίας ή να δημιουργήσουν ρηγματώσεις ή αποφλειώσεις (σκασίματα) στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Η επίδρασή τους στην πήξη είναι μάλλον επιβραδυντική. Την ύπαρξη οργανικών ουσιών ελέγχουμε με τα Αμερικάνικα πρότυπα ASTM C33 και C87.

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

Τα αποτελέσματα των θειούχων ενώσεων εξαρτώνται από τον τύπο τους και είναι περισσότερο έντονα, όταν οι θειούχες αυτές ενώσεις είναι διαλυτές στο νερό. Σημασία επίσης έχει και η δυνατότητα ή όχι του να διεισδύσει έπειτα μέσα στη μάζα του σκυροδέματος αέρας ή υγρασία. Οι Γερμανικοί κανονισμοί ορίζουν ως μέγιστο ανεκτό όριο των θειούχων ενώσεων μετρούμενο σε SO_3 το 1% του βάρους των στεγνών αδρανών. Πρέπει τέλος να σημειωθεί ότι η δράση των θειούχων ενώσεων γίνεται με το τσιμέντο και επομένως η ίδια ποσότητα SO_3 μπορεί να έχει διαφορετικό αποτέλεσμα ανάλογα με την ποσότητα τσιμέντου στο σκυρόδεμα.[3]

στη μάζα του σκυροδέματος αέρα ή υγρασία. Οι Γερμανικοί κανονισμοί ορίζουν ως μέγιστο ανεκτό όριο των θειούχων ενώσεων μετρούμενο σε SO_3 το 1% του βάρους των στεγνών αδρανών. Πρέπει τέλος να σημειωθεί ότι η δράση των θειούχων ενώσεων γίνεται με το τσιμέντο και επομένως η ίδια ποσότητα SO_3 μπορεί να έχει διαφορετικό αποτέλεσμα ανάλογα με την ποσότητα τσιμέντου στο σκυρόδεμα.[3]

Δ. Μορφή των Κόκκων

Οι κόκκοι των αδρανών δεν έχουν κανονική γεωμετρική μορφή, αλλά τυχαία. Χοντρικά μπορούμε να τους κατατάξουμε στις ακόλουθες γενικές κατηγορίες: στρογγυλούς, κυβοειδείς, γωνιώδεις, πλακοειδείς, επιμήκεις. Το σχήμα η μορφή των κόκκων επηρεάζει άσχετα από την επιρροή του μεγέθους κατά ποικίλους τρόπους τις ιδιότητες του σκυροδέματος. Επηρεάζει πρώτα το εργάσιμο με την εσωτερική τριβή τους. Από την άποψη αυτή η σφαιρική μορφή παρουσιάζει τη μικρότερη γωνία τριβής και επομένως τη μεγαλύτερη ευκινησία του υλικού. Όσο η μορφή των κόκκων απομακρύνεται από τη σφαιρική τόσο αυξάνεται η εσωτερική τριβή και ελαττώνεται η εργασιμότητα του υλικού. Συγχρόνως όμως αυξάνεται και η ειδική επιφάνεια και επομένως αυξάνεται ακόμη περισσότερο η ανάγκη για νερό. Αντίθετα όμως η αύξηση της πολυγωνικότητας των κόκκων βελτιώνει την στήριξη μεταξύ τους, καθώς και την πρόσφυση με το κονίαμα. Κατά τον ίδιο τρόπο και οι κυβοειδείς και οι πλακοειδείς κόκκοι συντελλούν στη μηχανική αντοχή του σκυροδέματος, λόγω της καλύτερης εδράσεως αυτών.

Οι παραπάνω ποιοτικές παρατηρήσεις δύσκολα μπορούν να υπαχθούν σε ποσοτική μέτρηση και αξιολόγηση. Η άποψη που επικρατεί είναι ότι οι κόκκοι των αδρανών πρέπει να έχουν μορφή που πλησιάζει το σφαιρικό ή το κυβοειδές, αλλά με ανώμαλη, γωνιώδη και όχι λεία εξωτερική επιφάνεια.[4]

2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΝΩΠΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Οι ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος είναι: α) εξίδρωση
β) απόμειξη
γ) εργάσιμο

2.1. ΕΞΙΔΡΩΣΗ

Ονομάζεται το φαινόμενο του διαχωρισμού του νερού από τα στερεά συστατικά του σκυροδέματος, που παρουσιάζεται στην περίοδο πριν από την πήξη. Η εξήγηση του φαινομένου είναι σχετικά απλή, τα στερεά συστατικά καθιζάνουν λόγω της βαρύτητας, ενώ το νερό λόγω των τριχοειδών δυνάμεων έχει την τάση να κινηθεί προς τα επάνω. Συνεπώς στην επιφάνεια του σκυροδέματος εμφανίζεται λεπτό στρώμα νερού που μοιάζει με εξίδρωση. Η εξίδρωση επομένως έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση του τελικού όγκου του μείγματος και την απομακρυνση μέρους του νερού.

Η ελάττωση του νερού είναι βέβαια επιθυμητή, γιατί έχει ευνοϊκό αποτέλεσμα στην αντοχή, αλλά το φαινόμενο του διαχωρισμού είναι επιβλαβές και ανεπιθύμητο γενικά λόγω της ανομοιογένειας που δημιουργεί μέσα στη μάζα του σκυροδέματος και ειδικότερα για τα ακόλουθα δυσμενή φαινόμενα:

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

2.) Κατά τη δίοδο του νερού ανάμεσα από τα στερεά συστατικά δημιουργούνται μέσα στον τσιμεντοπολτό λεπτοί σωληνίσκοι.

3.) Η συγκέντρωση του νερού δε γίνεται μόνο στην επάνω επιφάνεια του σκυροδέματος, αλλά το ίδιο φαινόμενο εμφανίζεται τοπικά και στις κοιλότητες μεταξύ των σκύρων, όπου γίνεται τοπική συγκέντρωση νερού με αποτέλεσμα τη δημιουργία κοιλοτήτων.

4.) Για τη περίπτωση του οπλισμένου σκυροδέματος το ίδιο φαινόμενο δημιουργείται σε όλο το μήκος κάτω από τις ράβδους του οπλισμού, όπου το κενό που σχηματίζει, μειώνει την επιφάνεια συνεργασίας ανάμεσα στο σκυρόδεμα και το σίδηρο και συγχρόνως αυξάνει τον κίνδυνο διαβρώσεως των οπλισμών.

5.) Το φαινόμενο της εξιδρώσεως επιτείνεται με την αύξηση του νερού αναμείξεως, καθώς και με την έλλειψη λεπτόκοκκων υλικών της άμμου και του τσιμέντου, γιατί με αυτόν τον τρόπο διευκολύνεται η κίνηση του νερού προς τα επάνω.

Κάθε είδος τσιμέντου έχει διαφορετική ικανότητα συγκρατήσεως νερού. Σημαντικό ρόλο παίζει η λεπτότητα του τσιμέντου και οι προσμίξεις. Αντίθετα η αύξηση της περιεκτικότητας σε αέρα επιδρά ανασταλτικά στην εξίδρωση γιατί οι φυσαλίδες που σχηματίζονται από τον αέρα εμποδίζουν την κίνηση του νερού.

Οι δυσμενείς επιδράσεις της εξιδρώσεως αίρονται τελείως, αν στην αρχή της πήξεως αποκατασταθεί, με αναμόχλευση και αναδόνηση της μάζας, η ομοιογένεια του υλικού.

2.2. ΑΠΟΜΕΙΞΗ

Είναι το φαινόμενο εκείνο κατά το οποίο τα στερεά συστατικά, όχι μόνο σαν σύνολο διαχωρίζονται από το νερό, αλλά και μεταξύ τους χωρίζονται, κατά την κίνηση προς τα κάτω, ανάλογα με το βάρος τους. Τα βαρύτερα κινούνται προς τα χαμηλότερα στρώματα και έτσι τελικά τακτοποιούνται σε στρώσεις ανάλογα με το βάρος τους. Αν οι κόκκοι είναι από το ίδιο πέτρωμα δηλαδή έχουν το ίδιο ειδικό βάρος ο διαχωρισμός γίνεται ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων.

Το φαινόμενο της απόμειξης είναι από τα πιο καταστρεπτικά για την αντοχή του σκυροδέματος γιατί είναι προφανές ότι μεταβάλλει τις αναλογίες μείξεως κατά τρόπο ανομοιόμορφο και απρόβλεπτο.

2.3. ΕΡΓΑΣΙΜΟ

Ο όρος εργάσιμο χαρακτηρίζει γενικά την ευκολία με την οποία μπορούμε να μεταφέρουμε, διαστρώσουμε και συμπυκνώσουμε το σκυρόδεμα. Το εργάσιμο είναι μια πολύτιμη για την πράξη έννοια, γιατί αποδίδει ακριβώς αυτό που ενδιαφέρει τον κατασκευαστή κατά τη διάρκεια της σκυροδέτησης, είναι όμως ιδιότητα σύνθετη που συνδέεται με άλλες ρεολογικές ιδιότητες και που δύσκολα μπορεί να αποδοθεί ποσοτικά. Τέτοιες ιδιότητες με τις οποίες συνδέεται και από τις οποίες εξαρτάται το εργάσιμο, είναι οι ακόλουθες:

α) Η **ρευστότητα** που σημαίνει την ευκολία με την οποία ρέει ένα υλικό και εξαρτάται από την ποσότητα του νερού ανάμειξης.

β) Η **πλαστικότητα**, με την οποία νοείται η ικανότητα του υλικού να παραμορφώνεται χωρίς διακοπή της συνέχειάς του.

γ) Η **συνοχή**, η οποία είναι το αποτέλεσμα των δυνάμεων που έλκουν τα μόρια του υλικού μεταξύ τους και επομένως είναι μία από τις ιδιότητες που συντελούν στην πλαστικότητα.

δ) Η **συμπυκνωσιμότητα**, δηλαδή η δυνατότητα του υλικού να συμπυκνωθεί και που εξαρτάται από τον αρχικό βαθμό συμπυκνώσεως.

ε) Η **συνεκτικότητα** όρος που χρησιμοποιείται για να εκφράσουμε άλλοτε το εργάσιμο και άλλοτε τη ρευστότητα.

Το εργάσιμο αυξάνει γενικά όσο αυξάνει το νερό αναμείξεως, δηλαδή η ρευστότητα του μείγματος. Η ρευστότητα εξαρτάται περισσότερο από την ποσότητα νερού αναμείξεως και πολύ λιγότερο από το λόγο νερού προς τσιμέντο. Για την ίδια ρευστότητα το απαιτούμενο νερό ελαττώνεται γενικά όσο ελαττώνεται η ειδική επιφάνεια των αδρανών. Έτσι ελαττώνεται όσο αυξάνεται ο μέγιστος κόκκος και η καμπύλη κοκκομετρικής σύνθεσης των αδρανών κατεβαίνει (αυξάνεται δηλαδή το χοντρόκοκκο υλικό). Όμως η αύξηση του μέγιστου κόκκου και των χονδρόκοκκων αδρανών συντελεί στη μείωση της πλαστικότητας και της συνοχής με κίνδυνο την απόμειξη.[3]

Με την προϋπόθεση ότι το σκυρόδεμα θα συμπυκνωθεί τελείως, το εργάσιμο δεν έχει επίδραση στην τελική αντοχή του σκυροδέματος. Η μέτρηση του εργάσιμου δεν μπορεί να γίνει απευθείας. Για αυτό έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι με τις οποίες μετρούμε μια ή περισσότερες από τις άλλες ιδιότητες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Οι κυριώτερες από τις μεθόδους που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα είναι οι ακόλουθες:

α) Κάθιση

Μεταλλικός κόλουρος κώνος ανοιχτός επάνω και κάτω (διάμετρος κάτω βάσης 8 ίντσες, διάμετρος άνω βάσης 4 ίντσες και ύψος 12 ίντσες) γεμίζεται με σκυρόδεμα και συμπυκνώνεται με καθορισμένο τρόπο. Μετά την πλήρωση αφαιρείται ο κώνος κατακόρυφα, οπότε το σκυρόδεμα παραμορφώνεται και κάθετα. Η κάθιση

πρέπει να γίνει χωρίς διατμητική θραύση του υλικού. Μετρούμε τη διαφορά ύψους του υλικού μετά την πτώση απο τον κώνο και αυτή η διαφορά καλείται κάθιση του σκυροδέματος.[5]

β) Μέτρο εξαπλώσεως

Μεταλλικός τύπος που έχει τη μορφή της παράπλευρης επιφάνειας κόλουρου κώνου γεμίζεται με το σκυρόδεμα και συμπυκνώνεται με καθορισμένο τρόπο. Ο τύπος με το σκυρόδεμα είναι τοποθετημένος επάνω σε βάση (τράπεζα εξάπλωσης) που έχει τη δυνατότητα να ανυψώνεται και να πέφτει ελεύθερα σε τρόπο και να μεταδίδει ελεύθερα τις κρούσεις στη μάζα του σκυροδέματος. Μετά την αφαίρεση του κώνου η βάση αναγκάζεται να πραγματοποιήσει ορισμένο αριθμό κρούσεων έτσι ώστε το σκυρόδεμα να απλωθεί πέρα από την αρχική κάθιση. Η μέση διάμετρος της μάζας του σκυροδέματος, όπως έχει διαμορφωθεί ονομάζεται μέτρο εξαπλώσεως.

γ) Μέτρο συμπυκνώσεως

Το σκυρόδεμα εισάγεται χωρίς καμία συμπύκνωση σε μεταλλικό δοχείο, διαστάσεων 20 cm × 20 cm και ύψους 40 cm. Μόλις το δοχείο γεμίσει, δονείται μέχρι να συμπυκνωθεί τελείως. Ο λόγος του αρχικού ύψους προς το τελικό 40/h, χαρακτηρίζεται ως μέτρο συμπυκνώσεως.

δ) Δοκιμή VEBE

Η συσκευή VEBE αποτελείται από έναν κώνο παρόμοιο με τον κώνο της κάθισης, τοποθετημένο μέσα σε άλλο κυλινδρικό δοχείο μεγαλύτερης διαμέτρου και μία τράπεζα δόνησεως. Μετά την αφαίρεση του κώνου το σκυρόδεμα κάθεεται, αλλά συγχρόνως υποβάλλεται σε δόνηση και συμπυκνώνεται παίρνοντας τη μορφή του εξωτερικού κυλινδρικού δοχείου. Ο χρόνος από τη στιγμή της απομακρύνσεως του κώνου και της σύγχρονης έναρξης της δόνησης έως την πλήρη επιπεδότητα της άνω επιφάνειας ονομάζεται χρόνος VEBE.

Καθεμιά από τις παραπάνω μεθόδους είναι κατάλληλη για διαφορετική περιοχή εργάσιμου. Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούν δονητή είναι κατάλληλες για περισσότερο ύφυγρα σκυροδέματα, δηλαδή σκυροδέματα με μικρότερο εργάσιμο.

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

Όσον αφορά τις απαιτήσεις εργάσιμου, για τα οπλισμένα σκυροδέματα που συμπυκνώνονται στο εργοτάξιο με συνήθη δονητικά μέσα, απαιτεί κάθιση τουλάχιστον 5 cm για θραυστά αδρανή και τουλάχιστον 3cm για φυσικά αδρανή.

Σκυροδέματα με μικρότερη κάθιση μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για προκατασκευασμένα στοιχεία.

Αν τέλος, η εργασιμότητα δεν προδιαγράφεται από τον μελετητή ή τον κατασκευαστή τότε η μελέτη συνθέσεως θα γίνει με κάθιση 10-12 cm.[3]

3. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΟΥ ΣΚΛΗΡΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

3.1. Η αντοχή σε εξωτερικές δυνάμεις

Αντοχή: ως αντοχή εννοούμε γενικότερα την ικανότητα του υλικού να αναλαμβάνει και μεταβιβάζει δυνάμεις με οριακή τιμή τη μέγιστη τιμή της δυνάμεως που μπορεί να παραλάβει και μεταβιβάσει ένα στοιχειώδες τμήμα του στο γειτονικό, χωρίς καταστροφή ή επικίνδυνη παραμόρφωσή του.

Η αντοχή εξαρτάται τόσο από την φύση και την ποιότητα του υλικού, όσο και από τη μορφή της εντατικής καταπόνησεως. Συνεπώς διαφορετική εμφανίζεται η αντοχή σε κάποια συγκεκριμένη καταπόνηση από ένα στοιχείο σ' ένα άλλο και διαφορετική για το ίδιο στοιχείο, αν η καταπόνηση είναι αποτέλεσμα διαφορετικής εντατικής κατάστασης.

Από τα παραπάνω λοιπόν βγαίνει το συμπέρασμα πως η αντοχή δεν είναι σταθερή ιδιότητα του υλικού, αλλά αντοχή συγκεκριμένου υλικού σώματος σε συγκεκριμένη εξωτερική καταπόνηση.

Η αντοχή του σκυροδέματος και ο μηχανισμός θραύσης Έως τώρα εξετάστηκε η αντοχή μόνο σαν μηχανικό φαινόμενο ανεξάρτητα από τη φύση του υλικού. Εκτός όμως απ' αυτό πρακτικοί τεχνολογικοί παράγοντες επιδρούν, τόσο κατά την παρασκευή του σκυροδέματος, όσο και στη μέτρηση της αντοχής.

Οι παράγοντες αυτοί είναι οι ακόλουθοι :

- οι αναλογίες συνθέσεως, δηλαδή οι ποσότητες του τσιμέντου, του νερού και των αδρανών σε κάθε κυβικό μέτρο,
- η ποιότητα των υλικών, στην οποία εκτός της ποιότητας των κύριων συστατικών περιλαμβάνονται ο βαθμός άλεσης του τσιμέντου, το σχήμα και η

μορφή των αδρανών, η κοκκομετρική διαβάθμιση, η ποιότητα του πετρώματος των αδρανών,

- τα παρασιτικά υλικά που αθέλητα εισχωρούν είτε μαζί με τους κόκκους των αδρανών, είτε μαζί με το νερό,
- η συμπίκνωση του νωπού σκυροδέματος,
- η ηλικία του σκυροδέματος,
- ο τρόπος συντήρησης, δηλαδή οι θερμοκρασιακές και υγρομετρικές συνθήκες του περιβάλλοντος μέσα στο οποίο γίνεται η πήξη και η σκλήρυνση του σκυροδέματος,
- η μορφή του δοκιμίου,
- η μορφή της καταπόνησης, δηλαδή ο τρόπος και η ταχύτητα φόρτισης.

Όλοι οι παραπάνω παράγοντες δημιουργούν ένα πλήθος μικροδιαφορών μέσα στη μάζα του σκυροδέματος, οι οποίες προκαλούν διασπορά, δηλαδή διακύμανση των τιμών της αντοχής.

Από τον μηχανισμό θραύσης προκύπτει ότι στην από κατασκευής ανομοιογένεια του υλικού (σκύρα, κονιάμα) πρέπει να συμπεριληφθούν και οι μικρορωγμές που υπάρχουν απαρχής στο υλικό. Οι ρωγμές αυτές είναι διασκορπισμένες προς κάθε κατεύθυνση μέσα στη μάζα του υλικού, σε τρόπο ώστε να μην δημιουργείται μακροσκοπικώς ετερογενής συμπεριφορά. Όταν όμως επιβληθεί εξωτερικό π.χ. θλιπτικό φορτίο, οι τάσεις μέσα στη μάζα δεν κατανέμονται ομοιόμορφα αλλά δημιουργούνται σημεία τοπικής συγκέντρωσης τάσεων, καθώς και περιοχές εφελκυσμού. Τα σημεία αυτά αποτελούν τα σημεία από τα οποία αρχίζει η καταστροφή του υλικού.

Υπολογίζεται θεωρητικά ότι η αντοχή της συμπαγούς τσιμεντοκονίας χωρίς την ύπαρξη οποιασδήποτε ρωγμής θα ήταν της τάξεως 10.5 GPa.

Η ρωγμή όταν συναντήσει το αδρανές έχει τη δυνατότητα να συνεχισθεί μέσα στο αδρανές ή στην παράπλευρη διεπιφάνεια ή να σταματήσει. Το τι θα συμβεί

εξαρτάται από τις σχέσεις των μέτρων ελαστικότητας των ειδικών επιφανειών, τη συνάφειά τους και της επικρατούσης τάσεως.

Η αντοχή στις διάφορες μορφές καταπονήσεων :

1) Στατική καταπόνηση σε θλίψη και εφελκυσμό

Οι θλιπτικές αντοχές που κατορθώνουμε να πετύχουμε βρίσκονται συνήθως ανάμεσα στα όρια 5-150 MPa περίπου. Η εφελκυστική αντοχή κυμαίνεται στο 1/10 έως 1/15 της θλιπτικής αντοχής. Δεν έχει βρεθεί άμεση αντιστοιχία ανάμεσα στη θλιπτική και εφελκυστική αντοχή.

Από τα πειραματικά στοιχεία που συλλέγουμε, προκύπτει ότι με την αύξηση της θλιπτικής αντοχής αυξάνεται και η εφελκυστική, ο λόγος όμως $\beta_{εφ}/\beta_{θλ}$ μειώνεται, δηλαδή η αύξηση της εφελκυστικής αντοχής δεν είναι ανάλογη με την αύξηση της θλιπτικής.

Τέλος, η εφελκυστική αντοχή είναι πιο ευαίσθητη στη συντήρηση. Το τελευταίο μπορεί να εξηγηθεί από την άμεση εξάρτηση του εφελκυσμού από την έκταση των μικρορηγματώσεων μέσα στη μάζα του σκυροδέματος.

2) Πολυαξονική καταπόνηση

Η συμπεριφορά του σκυροδέματος σε πολυαξονική καταπόνηση, ιδίως θλιπτική, είναι γενικά παρόμοια με τη συμπεριφορά των άλλων υλικών. Σε περίπτωση σύγχρονης παρουσίας εγκάρσιων θλιπτικών τάσεων, η θλιπτική αντοχή εμφανίζεται αυξημένη. Η μεγαλύτερη αντοχή πετυχαίνεται, όταν η εγκάρσια θλιπτική τάση είναι 0,5-0,6 της αντίστοιχης θλιπτικής τάσης. Η αντοχή σε θλίψη στη περίπτωση αυτή είναι κατά 24-29% μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μονοαξονική αντοχή.

Η παρουσία εγκάρσιας εφελκυστικής τάσης μειώνει γρήγορα την αντοχή σε θλίψη κατά την άλλη διεύθυνση.

Αντίθετα, σε περίπτωση εφελκυστικών τάσεων, η τελική αντοχή σε εφελκυσμό δεν επηρεάζεται αισθητά.

Η αύξηση της αντοχής στην περίπτωση ομοιόμορφης θλιπτικής καταπόνησης είναι πιθανόν ελάχιστα μεγαλύτερη στα χαμηλής αντοχής σκυροδέματα, χωρίς όμως αυτό να είναι απόλυτα βεβαιωμένο.

3) Καταπόνηση με μεγάλη διάρκεια

Στην περίπτωση παραμονής της καταπόνησεως σε μεγάλο χρονικό διάστημα η θλιπτική αντοχή μειώνεται βαθμιαία. Η μείωση αυτή είναι αρκετά έντονη τα πρώτα λεπτά της καταπόνησης (30-60min) και στη συνέχεια μειώνεται ανάλογα με τη χρονική διάρκεια της καταπόνησεως.

4) Επαναλαμβανόμενη καταπόνηση

Η επαναλαμβανόμενη καταπόνηση με το ίδιο φορτίο ή μεταβολή της τάσεως μεταξύ δύο ορίων σ_{min} και σ_{max} μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα τη θραύση του υλικού, έστω και αν η μέγιστη τάση σ_{max} δεν υπερβαίνει τη στατική αντοχή του υλικού. Το φαινόμενο αυτό όπως είναι γνωστό ονομάζεται κόπωση του υλικού.

Για να συμβεί όμως η αστοχία, πρέπει η τάση σ_{max} να υπερβαίνει κάποιο όριο, που ονομάζεται όριο κοπώσεως. Το σκυρόδεμα δεν φαίνεται να έχει ένα σαφές όριο κόπωσης, όταν βρίσκεται στα 0,65 περίπου της στατικής αντοχής σε θλίψη, τότε οι επιτρεπόμενες επαναλήψεις φορτίσεων είναι περίπου 10^6 .

Όταν η μέγιστη τάση δεν υπερβεί το όριο αυτό, έχει παρατηρηθεί, ύστερα από ένα αριθμό επαναλήψεων βελτίωση του σκυροδέματος, αύξηση δηλαδή της στατικής αντοχής (και της αντοχής σε κόπωση) έως 10% περίπου.[3]

3.2. Συνεργασία σκυροδέματος και χάλυβα

Η ιδιότητα αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία στο οπλισμένο σκυρόδεμα. Ο όρος συνεργασία αποδίδει καλύτερα την πραγματικότητα από τον όρο «συνάφεια», γιατί

η συνεργασία αυτή είναι αποτέλεσμα συνάφειας, τριβής μεταξύ χάλυβα και σκυροδέματος, καθώς και αντοχής του σκυροδέματος σε διάτμηση. Στην περίπτωση των λείων ράβδων η συνάφεια και η τριβή παίζουν σπουδαιότερο ρόλο από τη διάτμηση του σκυροδέματος. Αντίθετα, στην περίπτωση ράβδων με εγκάρσιες νευρώσεις η αντίσταση στην εξόλκευση της ράβδου στηρίζεται κυρίως στη διατμητική αντοχή του σκυροδέματος.

Η αντοχή σε συνάφεια εξαρτάται πάρα πολύ από την κατεύθυνση της ράβδου σε σχέση με την κατεύθυνση σκυροδέτησης καθώς και από τη θέση της ράβδου μέσα στη διατομή.

Η αντοχή είναι πολύ μεγαλύτερη όταν η κατεύθυνση της ράβδου συμπίπτει με την κατεύθυνση σκυροδέτησης.

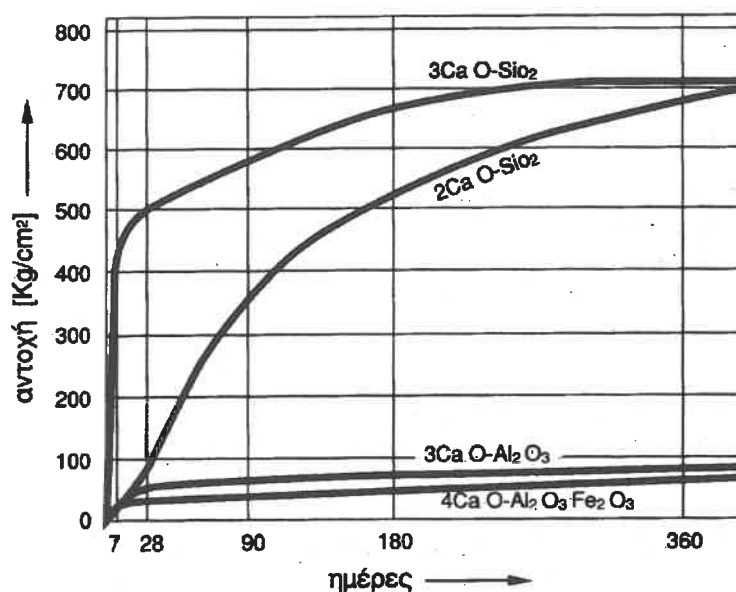
Η αντοχή σε συνάφεια είναι περίπου ανάλογη με την αντοχή σε θλίψη. Η αύξηση όμως της συνάφειας παρουσιάζεται κάπως μειωμένη για τις μεγαλύτερες αντοχές.

Τέλος η αντοχή σε συνάφεια εξαρτάται σημαντικά από την κατάσταση της επιφάνειας της ράβδου, τη μορφή των νευρώσεων για τις ράβδους με νευρώσεις και τη διάμετρο των ράβδων. Τέλος η αύξηση της θερμοκρασίας των υλικών μειώνει την αντοχή σε συνάφεια.

3.3. Η ανάπτυξη της αντοχής με το χρόνο

Η ανάπτυξη της αντοχής είναι διαφορετική για καθένα από τα τέσσερα βασικά συστατικά του τσιμέντου και γι' αυτό και η χρονική εξέλιξη της αντοχής, ιδιαίτερα στις μικρές ηλικίες, εξαρτάται από τη σύνθεση του τσιμέντου. Άλλοι παράγοντες είναι ο βαθμός άλεσης του τσιμέντου δηλαδή το μέγεθος των κόκκων του καθώς και οι θερμοκρασιακές και υγρομετρικές συνθήκες του περιβάλλοντος.

Για όλους αυτούς τους λόγους, η ακριβής ποσοτική εκτίμηση της εξελίξεως της αντοχής μόνο με δοκιμές με τον ίδιο τύπο τσιμέντου, τα ίδια υλικά και τις ίδιες συνθήκες συντηρήσεως μπορεί να γίνει. Στην περίπτωση που αυτό δεν είναι δυνατό να γίνει, οι κανονισμοί προβλέπουν ορισμένους συντελεστές που δίνουν ένδειξη του μεγέθους της αντοχής, για συνηθισμένες μέσες συνθήκες συντηρήσεως.



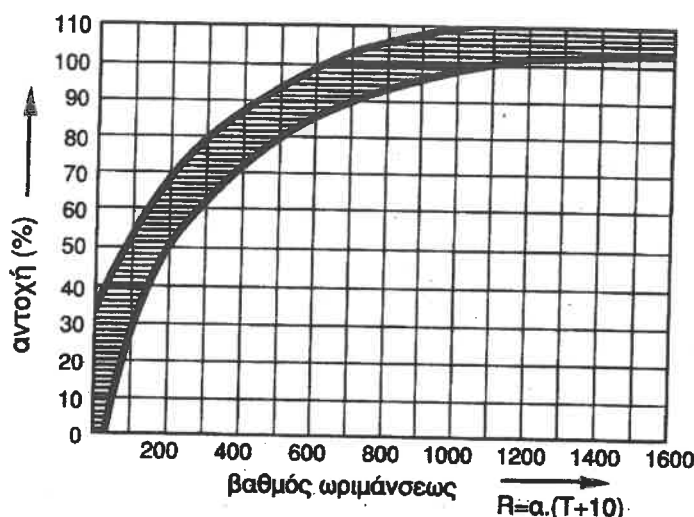
Σχ. 3.1 Εξέλιξη της αντοχής που παρουσιάζουν τα διάφορα συστατικά του τσιμέντου, όταν εξετάζεται το καθένα χωριστά. Η σύγχρονη παρουσία και των άλλων συστατικών είναι δυνατόν να τροποποιεί την εξέλιξη αυτή.

Για όλους αυτούς τους λόγους, η ακριβής ποσοτική εκτίμηση της εξελίξεως της αντοχής μόνο με δοκιμές με τον ίδιο τύπο τσιμέντου, τα ίδια υλικά και τις ίδιες συνθήκες συντηρήσεως μπορεί να γίνει. Στην περίπτωση που αυτό δεν είναι δυνατό να γίνει, οι κανονισμοί προβλέπουν ορισμένους συντελεστές που δίνουν ένδειξη του μεγέθους της αντοχής, για συνηθισμένες μέσες συνθήκες συντηρήσεως.

Η ανάπτυξη της αντοχής εξαρτάται πάρα πολύ από τη θερμοκρασία του περιβάλλοντος. Το γινόμενο της ηλικίας α (ημέρες) επί τη θερμοκρασία ($T=10$)°, όπου T η θερμοκρασία του περιβάλλοντος σε βαθμούς °C: $R=\alpha(T+10)$ αποδίδεται με τον όρο «ωρίμανση» του σκυροδέματος. Ως αφετηρία των

Θερμοκρασιών T δεχόμαστε τη τιμή (-10) , γιατί στη θερμοκρασία αυτή θεωρείται ότι αναστέλλονται τελείως οι χημικές διαδικασίες μεταξύ τσιμέντου και νερού.

Η σχέση μεταξύ ωρίμανσης και αντοχής παριστάνεται στο παρακάτω σχήμα.



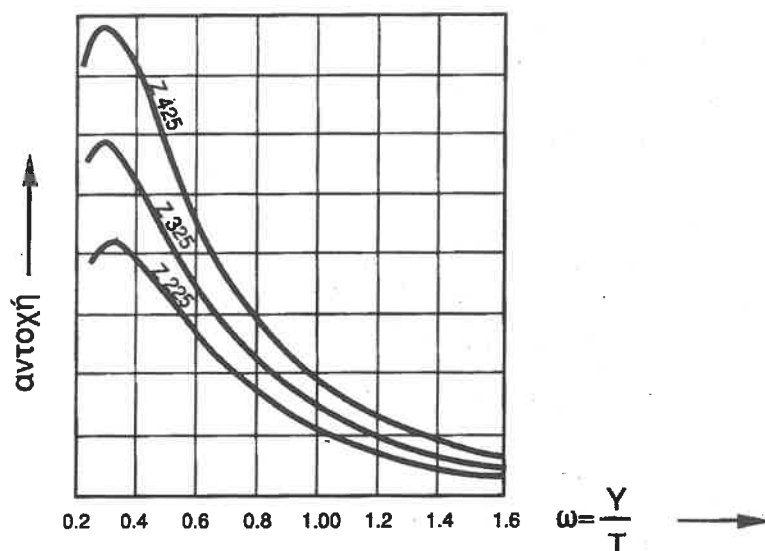
Σχ. 3.2 Σχέση μεταξύ «ωρίμανσεως» και αντοχής.

3.4. Η εξάρτηση της αντοχής από την ποσότητα του νερού και τις αναλογίες σύνθεσης

Η περίσσεια του νερού αναμείξεως πέρα από εκείνο που δεσμεύεται από το τσιμέντο, οδηγεί, στη δημιουργία του πορώδους του σκυροδέματος και επομένως στην ελάττωση και της πυκνότητας και της αντοχής.

Η άμεση και θεαματική εξάρτηση της αντοχής από λόγο νερού προς τσιμέντο : $\omega = N / T$ διατυπώθηκε από τον Abrams. Η σχέση αυτή έχει τη μορφή που παριστάνεται στο σχήμα 3.3.

Η μορφή και η θέση της καμπύλης δεν είναι ανεξάρτητη από τις αναλογίες και των άλλων υλικών, καθώς και από το βαθμό συμπίκνωσης.



Σχ. 3.3 Ενδεικτική μορφή της εξάρτησης της αντοχής από το λόγο $\omega = N/T$, για διάφορους τύπους τσιμέντου.

3.5. Η μέτρηση της αντοχής

Επειδή η αντοχή εξαρτάται από το σχήμα και το μέγεθος του δοκιμίου επάνω στο οποίο μετρείται και επειδή επίσης επηρεάζεται από πλήθος παραγόντων, είναι ανάγκη να καθορίσουμε κάποιον συμβατικό τρόπο μετρήσής της, ώστε τα αποτελέσματα των μετρήσεων να είναι συγκρίσιμα μεταξύ τους. Για τους λόγους αυτούς καθορίζεται στους κανονισμούς το σχήμα και οι διαστάσεις του δοκιμίου και περιγράφεται με κάθε λεπτομέρεια ο τρόπος παρασκευής, συντήρησης και μέτρησης της αντοχής.

Τα φαινόμενα που εξαρτώνται από το μέγεθος και τη μορφή του δοκιμίου και τα οποία επιδρούν, με τη σειρά τους, στην αντοχή είναι τα ακόλουθα :

- Η εξάτμιση του νερού
- Η επιφανειακή μικρορηγμάτωση
- Η τριβή των πλακών θλίψης
- Στατιστικοί λόγοι
- Η δομή του δοκιμίου.

3.6. Εκτίμηση της αντοχής σκυροδέματος έργου

Με τη θραύση ενός δοκιμίου κατά τον τρόπο που περιγράφει ο κανονισμός προσδιορίζουμε την αντοχή του συγκεκριμένου δοκιμίου. Πλήθος όμως δοκιμίων από την ίδια ποσότητα σκυροδέματος δε δίνει πάντοτε την ίδια ακριβώς τιμή της αντοχής. Αιτία της «διασποράς» των αντοχών, είναι ο μεγάλος αριθμός δευτερευόντων παραγόντων που ονομάζουμε «τυχαία περιστατικά».

Εφόσον δεν υπάρχει συστηματική αιτία που επηρεάζει την αντοχή οι τιμές των αντοχών ακολουθούν κανονική κατανομή. Της κατανομής αυτής μπορούμε να προσδιορίσουμε τη μέση τιμή $f = \Sigma \beta_i / n$

Η μέση τιμή αποτελεί κατά κάποιον τρόπο, την πιθανότερη τιμή της αντοχής της ποσότητας σκυροδέματος που εξετάζουμε.

Συνήθως καθορίζεται η τιμή f 5% δηλαδή η τιμή της αντοχής για την οποία η πιθανότητα να εμφανισθούν τιμές μικρότερες από αυτήν είναι 5%. Την τιμή αυτή την ονομάζουμε χαρακτηριστική τιμή.[3]

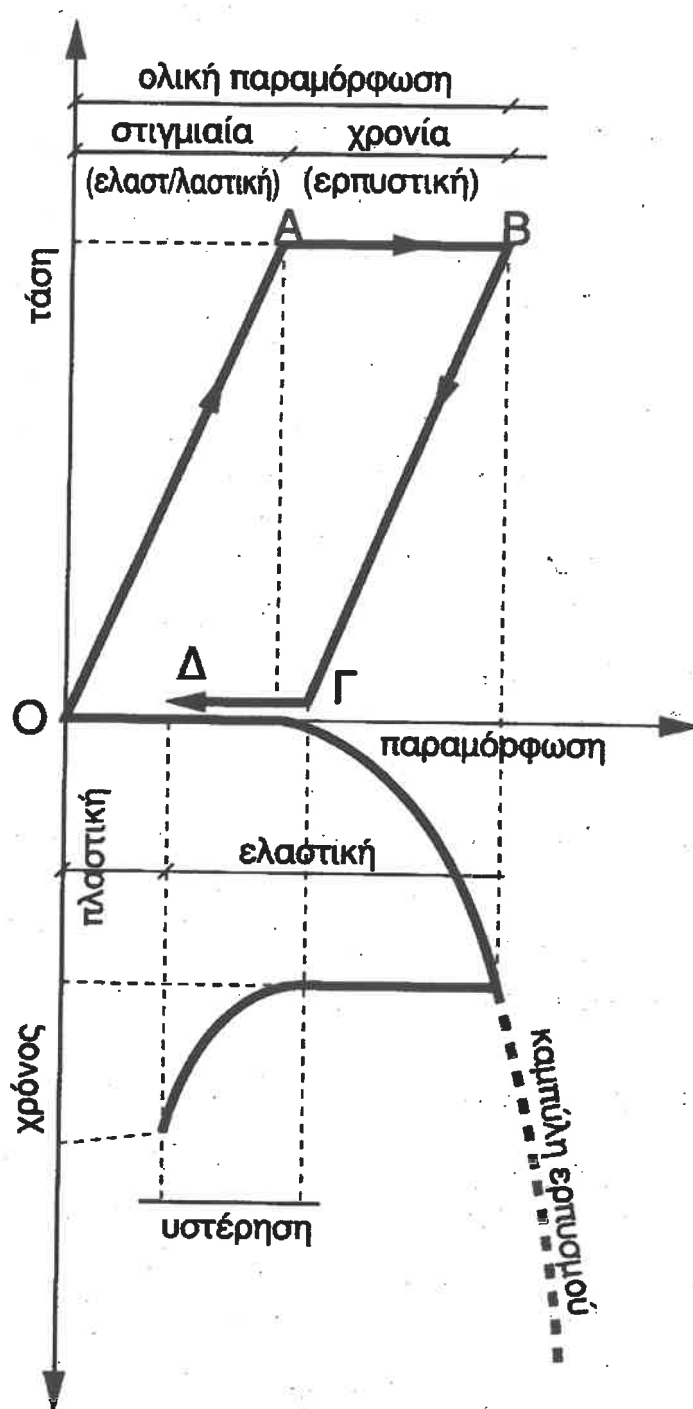
3.7. Ελαστική και πλαστική συμπεριφορά

Την ελαστικοπλαστική συμπεριφορά ενός υλικού απεικονίζει η σχέση τάσεων-παραμορφώσεων. Το σκυρόδεμα μόνο για μικρές τιμές του φορτίου μπορεί να θεωρηθεί πρακτικά σαν ελαστικό υλικό.

Ο νόμος του Hook μπορεί να θεωρηθεί ότι ισχύει για μικρές μόνο μεταβολές του φορτίου.

Αν το φορτίο παραμείνει αρκετό χρονικό διάστημα, η παραμόρφωση συνεχίζεται βαθμιαία (φαινόμενο ερπυσμού). Μετά την αφαίρεση του φορτίου τμήμα της

παρομόρφωσης αναιρείται (ελαστική παραμόρφωση) ενώ το υπόλοιπο τμήμα παραμένει (πλαστική παραμόρφωση). Με την πάροδο του χρόνου, μετά την αφαίρεση του φορτίου, η παραμόρφωση ελαττώνεται συνεχώς (υστέρηση). Η μείωση των τάσεων που συνοδεύει τον ερπυσμό καλείται χαλάρωση. Οι μεταβολές αυτές παριστάνονται στο παρακάτω σχήμα.

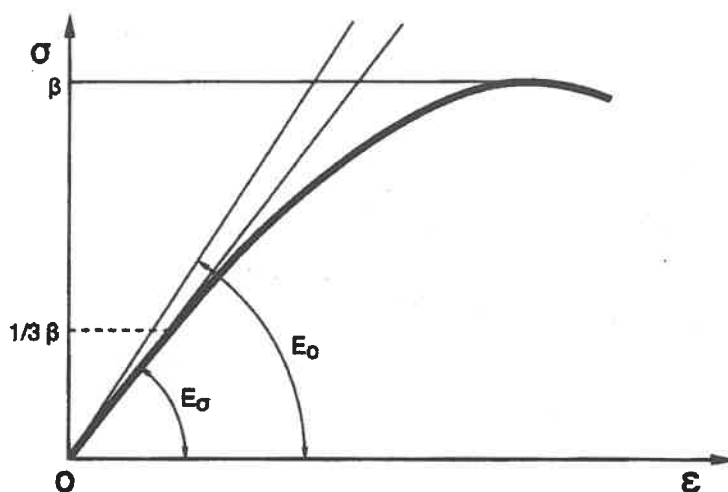


Σχ. 3.4 Ενδεικτικές καμπύλες μεταβολής της παραμόρφωσης με την τάση και τον χρόνο.

Μέτρο ελαστικότητας E ονομάζουμε το λόγο: $E = \sigma/\epsilon$. Συνήθως διακρίνουμε:

- Το αρχικό μέτρο ελαστικότητας E_0
- Το στιγμιαίο μέτρο ελαστικότητας $E = d\sigma/d\epsilon$
- Το μέσο μέτρο ελαστικότητας $E = \sigma/\epsilon$

Δηλαδή την κλίση της χορδής που ενώνει την αρχή των συντεταγμένων με το σημείο της καμπύλης που αντιστοιχεί στην τάση σ .



Σχ. 3.5 Ενδεικτική καμπύλη τάσεων – παραμορφώσεων.

Συμβατικό μέτρο ελαστικότητας είναι η κλίση της χορδής που ενώνει την αρχή των συντεταγμένων με το σημείο της καμπύλης που αντιστοιχεί σε τάση $1/3 \beta_{\sigma}$.

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

Γενικά το μέτρο ελαστικότητας των αδρανών είναι διαφορετικό από το μέτρο ελαστικότητας του κονιάματος και επομένως και η ανάληψη τάσεων από αυτά είναι διαφορετική. Για τα συνηθισμένα σκυροδέματα, με ασβεστολιθικά αδρανή, το μέτρο ελαστικότητας των αδρανών είναι μεγαλύτερο από το μέτρο ελαστικότητας του κονιάματος. Στην περίπτωση αυτή η απαίτηση ίσων παραμορφώσεων οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η τάση στα αδρανή είναι μεγαλύτερη, δηλαδή η ροή του φορτίου γίνεται κυρίως μέσα από τα αδρανή.

Αντίθετα στη περίπτωση σκυροδέματος με ελαφρά (πορώδη) αδρανή το μέτρο ελαστικότητας αυτών είναι μικρότερο από το αντίστοιχο του κονιάματος και η εικόνα της ροής των τάσεων είναι διαφορετική.

Το μέτρο ελαστικότητας σε εφελκυσμό είναι ίσο περίπου προς το $\frac{1}{2}$ του μέτρου ελαστικότητας σε θλίψη.[3]

3.8. Χρόνια συστολή και διαστολή του σκυροδέματος

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

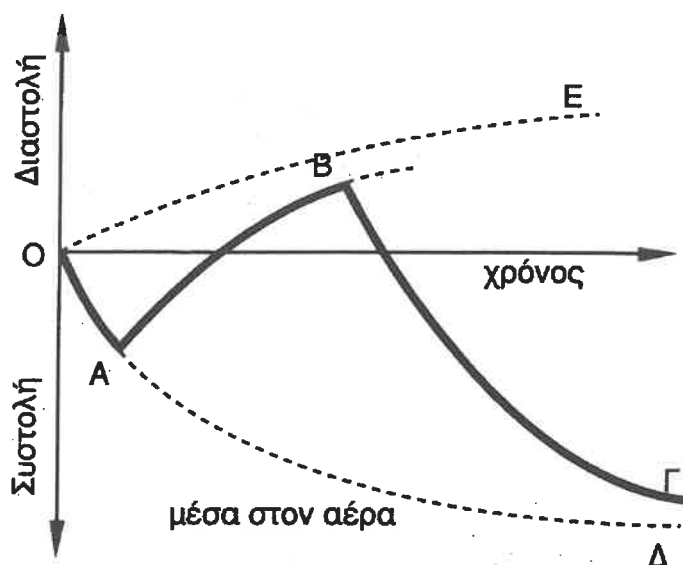
Η συστολή αυτή στον αέρα δεν πρέπει να συγχέεται με τη συστολή πήξεως που οφείλεται στη χημική δράση των ενεργών προϊόντων ούτε με τις ελαστικές ή πλαστικές παραμορφώσεις και τον ερπυσμό, που οφείλονται στη δράση εξωτερικών δυνάμεων.

Από τις θεωρίες που έχουν διατυπωθεί έως τώρα για την εξήγηση του φαινομένου, επικρατέστερη κρίνεται η θεωρία που διατυπώθηκε από τον Freyssinet και η οποία αποδίδει τις μεταβολές του όγκου στις δυνάμεις που ασκούνται από το νερό στα τοιχώματα των τριχοειδών του υλικού.

Απόδειξη του ότι η χρόνια συστολοδιαστολή οφείλεται οπωσδήποτε στη δράση του νερού είναι το γεγονός ότι, εάν η εξάτμιση γίνει ύστερα από κατάψυξη ή ξήρανση του υλικού πραγματοποιείται χωρίς την εμφάνιση της συστολής.

Η καμπύλη εξέλιξης της χρόνιας συστολής στον αέρα και της διαστολής μέσα στο νερό είναι εκθετικής μορφής, όπως η καμπύλη ΟΑΔ του Σχ. 3.6. Η

λαμπύλη ΟΑΔ παριστάνει την ιδεατή μορφή της σχέσης $\varepsilon_\sigma = \varepsilon(t)$ με την προϋπόθεση σταθερών εξωτερικών συνθηκών.



Σχ. 3.6 Σχηματική μεταβολή της συστολής (ή διαστολής) του σκυροδέματος με τον χρόνο.

Η χρόνια συστολή είναι γενικά φαινόμενο βλαπτικό και ανεπιθύμητο. Όταν η συστολή παρεμποδίζεται, μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία ρηγματώσεων από τις εφελκυστικές τάσεις που αναπτύσσονται. Συνηθισμένη είναι η περίπτωση της ρηγματώσεως στοιχείων μεγάλου πάχους από την ανομοιόμορφη ξήρανση του εσωτερικού και της επιφάνειας του στοιχείου. Τα επιφανειακά στρώματα ξεραίνονται γρηγορότερα από το εσωτερικό και επομένως ο διαφορετικός βαθμός συστολής έχει ως αποτέλεσμα τη ρηγμάτωση του στοιχείου.

Η ρηγμάτωση βέβαια δεν εξαρτάται μόνο από το μέγεθος της διαφορετικής συστολής, αλλά και από τις ελαστικές ιδιότητες του υλικού (μέτρο ελαστικότητας και αντοχής σε εφελκυσμό).[3]

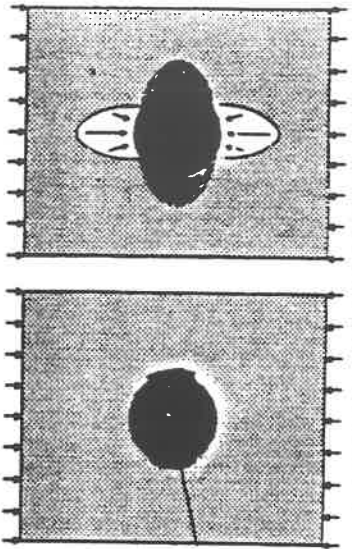
Άλλο σημείο αναπτύξεως εφελκυστικών τάσεων είναι η μεταξύ αδρανών και τσιμεντοπολτού επιφάνεια, λόγω της συρρικνώσεως του τελευταίου ως προς τα ακίνητα αδρανή. Στην επιφάνεια αυτή δημιουργούνται εγγενείς μικρορηγματώσεις (βλέπε σχήμα 3.7).[6]

Αποσπαιμένο Πρότυπο

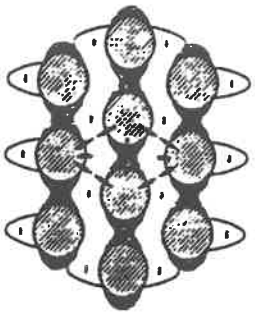
(Συνδυασ συμπίεσης)

(Lusche)

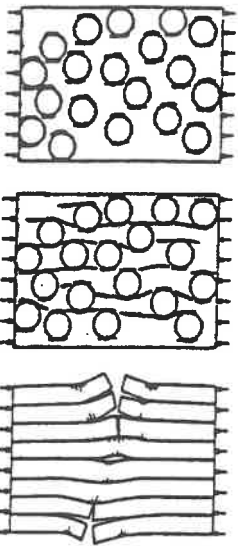
$$P_{\text{σπιν}} > E_{\text{αδρ}} > E_{\text{πηγ}}$$



Αναπτυσσόμενες
τάσεις
Προαγούμενες
ρηγματώσεις



Αναπτυσσόμενες τάσεις
είναι πιο εύκολο πρότυπο
+ ξεχειλιμένοι —
— τάση

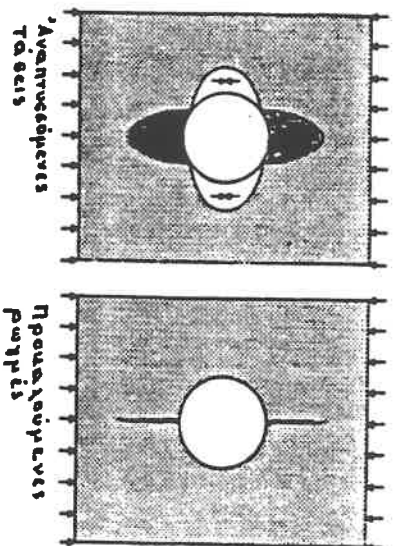


Διάφορες παραμορφώσεις
δεν παραμορφώνονται

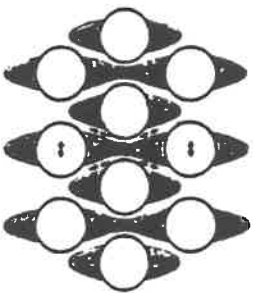
Διάφορες τάσεις
είναι διαδοχικά
της παραμορφώσεως

Αποσπαιμένο Πρότυπο . Συμπίεση με ελαφρά αδραν.

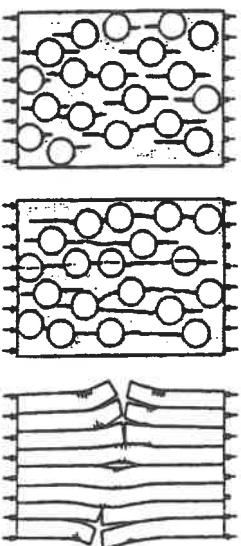
$$E_{\text{πηγ}} > E_{\text{αδρ}}$$



Αναπτυσσόμενες
τάσεις
Προαγούμενες
ρηγματώσεις



Αναπτυσσόμενες τάσεις
είναι πιο εύκολο πρότυπο

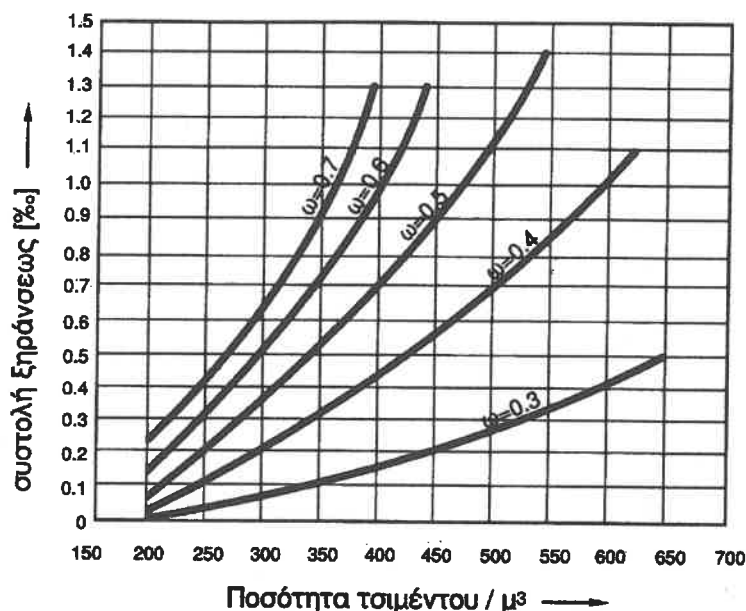


Διάφορες τάσεις
είναι διαδοχικά
της παραμορφώσεως.

Σχ. 3.7 Μηχανισμός θραύσεως.[6]

Οι πειραματικές πληροφορίες που έχουμε για το φαινόμενο της χρόνιας συστολής του σκυροδέματος συνοψίζονται στα ακόλουθα :

1. Το μέγεθος της συστολής εξαρτάται από το είδος και την ποιότητα του τσιμέντου.
2. Η συστολή αυξάνεται με την αύξηση της ποσότητας τσιμέντου (Σχ. 3.8).



Σχ. 3.8 Σχέση συστολής ξήρανσης, ποσότητας τσιμέντου και λόγου N/T.

3. Ελαττώνεται όσο αυξάνεται η αντοχή.
4. Εξαρτάται από την ποιότητα και τη φύση των αδρανών.
5. Η συστολή εξαρτάται από τη μορφή και τις διαστάσεις του στοιχείου
6. Εξαρτάται από τις υγρομετρικές συνθήκες του περιβάλλοντος.

3.9. Ερπυσμός

Η χρόνια παραμόρφωση που προέρχεται από την επίδραση εξωτερικής δύναμης ονομάζεται ερπυσμός. Η παραμόρφωση λόγω ερπυσμού μετά χρόνο t από τη στιγμή της επιβολής του φορτίου, δίνεται από τη σχέση :

$$\varepsilon_a = \frac{\sigma}{E} \varphi_{\infty} (1 - e^{-t})$$

όπου φ_{∞} ο λεγόμενος συντελεστής ερπυσμού.

Τη συνολική τιμή του ερπυσμού για μοναδιαία τάση, δηλαδή $\sigma = 1$ και $t = \infty$

$$\varepsilon_{\infty} = \varphi_{\infty} / E$$

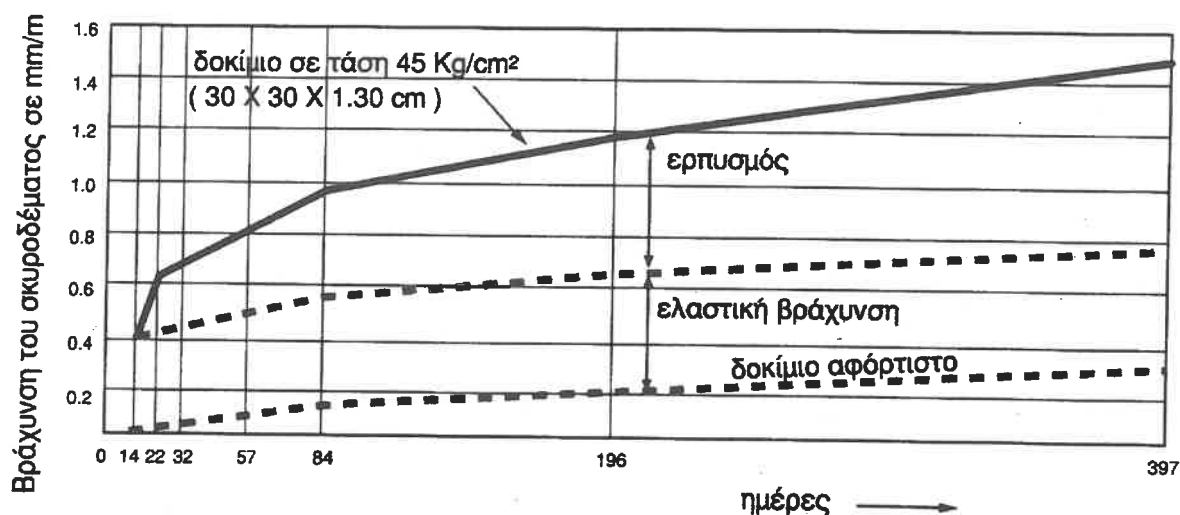
ονομάζουμε ειδικό ερπυσμό.

Η συνολική παραμόρφωση που πραγματοποιείται από εξωτερικές δυνάμεις μετά χρόνο t , δηλαδή τόσο η στιγμιαία όσο και η ερπυστική θα είναι :

$$\varepsilon_{ολ} = \frac{\sigma}{E} (1 + \varphi_{\infty} \cdot (1 - e^{-t}))$$

Συνοπτικά μπορούμε να αναφέρουμε για τον ερπυσμό τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

- α) Το μέγεθος του ερπυσμού είναι αντιστρόφως ανάλογο προς την ποιότητα του σκυροδέματος.
- β) Μπορεί να φτάσει τελικά σε τιμή πολλαπλάσια της χρονίας συστολής.
- γ) Η διάρκεια του φαινομένου είναι 1 έως 10 χρόνια. Συνήθως ολοκληρώνεται μετά 1 έως 2 χρόνια.
- δ) Έως την τιμή του φορτίου $\sim 1/3$ βθρ είναι ανάλογος του φορτίου, πέρα από την τιμή αυτή ο ερπυσμός αυξάνεται ολοένα ταχύτερα με την αύξηση του φορτίου.
- ε) Η μορφή της εξελίξεως του είναι εκθετική, γρήγορη στην αρχή και ολοένα βραδύτερη, και τείνει ασυμπτωτικά προς κάποια οριακή τιμή.
- στ) Αυξάνεται όσο ελατώνονται οι διαστάσεις του στοιχείου.
- ζ) Εμφανίζεται μικρότερος για τσιμέντα υψηλής αντοχής ή γρήγορης αναπτύξεως της αντοχής.
- η) Εξαρτάται από το είδος των αδρανών και ειδικότερα από το μέτρο ελαστικότητας αυτών.
- θ) Ελατώνεται όσο περισσότερο χοντρόκοκκα είναι τα αδρανή.
- ι) Αυξάνεται όσο αυξάνεται το νερό αναμίξεως.
- ια) Εξαρτάται από τις υγρομέτρικες συνθήκες του περιβάλλοντος. Αυξάνεται όσο ελατώνεται η σχετική υγρασία.
- ιβ) Ελατώνεται όσο μεγαλύτερη είναι η ηλικία του σκυροδέματος κατά τη στιγμή επιβολής του φορτίου.



Σχ. 3.9 Εξέλιξη του ερπυσμού και της συστολής ξήρανσης με το χρόνο.

3.10. Το πορώδες

Το σκυρόδεμα όπως και οι φυσικοί λίθοι δεν είναι υλικό απόλυτα συμπαγές και πλήρες, αλλά περιέχει πλήθος από μικροσκοπικές και μακροσκοπικές κοιλότητες. Οι κοιλότητες αυτές είναι κενές από στερεό υλικό, γι' αυτό ονομάζονται πόροι ή κενά.

Το σύνολο αυτών των κοιλοτήτων ονομάζουμε πορώδες του σκυροδέματος. Οι κοιλότητες αυτές μπορεί να περιέχουν αέρα ή να είναι γεμάτες νερό.

Ανάλογα με την προέλευσή τους διακρίνονται σε κατηγορίες. Έτσι υπάρχουν :

1. Πόροι των αδρανών υλικών, δηλαδή πόροι των κόκκων των σκύρων και της άμμου.
2. Πόροι που δημιουργούνται από τον εγκλεισμό φυσαλίδων από αέρα μέσα στο τσιμεντοκονίαμα.
3. Πόροι ή τριχοειδή κενά που δημιουργούνται μέσα στην τσιμεντοκονία μετά την εξάτμιση νερού που περισσεύει.
4. Κοιλότητες μεταξύ τσιμεντοκονιάματος και αδρανών, είτε από κακή πρόσφυση μεταξύ τους, είτε λόγω συστολής του τσιμεντοκονιάματος, είτε από το

νερό που συγκεντρώνεται στην κάτω κυρίως πλευρά των κόκκων, λόγω της εξιδρώσεως του μείγματος.

5. Μακροσκοπικές κοιλότητες που προέρχονται από κακή συμπίκνωση.

6. Τριχοειδή κενά δημιουργούμενα μετά τις μικρορηγματώσεις που οφείλονται στις συστολές του τσιμεντοκονιάματος ή και στις εξωτερικές καταπονήσεις.

Χαρακτηριστικό ενός υλικού είναι :

α) Το συνολικό πορώδες :

$$\frac{V_{ολ} - V_s}{V_{ολ}} = \frac{\rho_s - \rho_\phi}{\rho_s}$$

δηλαδή ο λόγος των κενών προς τον ολικό φαινόμενο όγκο και :

β) Ο βαθμός συμπίκνωσης :

$$\frac{V_s}{V_{ολ}} = \frac{\rho_\phi}{\rho_s}$$

Στις παραπάνω σχέσεις παριστάνουν :

V_s , τον απόλυτο όγκο του υλικού

$V_{ολ}$, τον ολικό, δηλαδή τον φαινόμενο όγκο

$\rho_\phi = G / V_{ολ}$, το φαινόμενο ειδικό βάρος

$\rho_s = G / V_s$, το απόλυτο ειδικό βάρος.

Για το σκυρόδεμα το ολικό πορώδες κυμαίνεται μεταξύ 8-25%.

Τα παραπάνω μεγέθη χαρακτηρίζουν την έκταση του πορώδους, δεν δίνουν όμως πληροφορίες για τη μορφή, το σχήμα, το μέγεθος, καθώς και για την κατανομή των κοιλοτήτων, που αποτελούν ουσιώδη χαρακτηριστικά για τη συμπεριφορά του υλικού και τη διείσδυση του νερού. Το πορώδες του σκυροδέματος επηρεάζει κατά ποικίλους τρόπους τις ιδιότητές του.

Επηρεάζει τη χρόνια συστολή, τον ερπυσμό, την υδαταπορροφητικότητα, την υδατοστεγανότητα, καθώς και την ανθεκτικότητα του υλικού στον παγετό, ως φορέας της υγρής φάσης, στην οποία κυρίως οφείλονται τα φαινόμενα αυτά.

Τέλος επηρεάζει την αντοχή :

$$f = f_s \cdot \frac{\rho_\phi}{\rho_s}$$

δεδομένου ότι η μετάδοση των δυνάμεων γίνεται μέσα από τον στερεό ιστό του υλικού.

Οι περισσότερες από τις ιδιότητες του σκυροδέματος βελτιώνονται όσο, για το ίδιο ολικό πορώδες, το μέγεθος των πόρων είναι μικρότερο (επομένως το πλήθος των πόρων, για τον ίδιο όγκο, μεγαλύτερο) και όσο περισσότερο ομοιόμορφα είναι κατανεμημένο μέσα στο υλικό και το σχήμα τους πλησιάζει το σφαιρικό.

Στη μείωση του πορώδους συντείνουν :

α) η ελάττωση του νερού και επομένως η ελάττωση των πόρων που δημιουργούνται από την εξάτμιση του νερού που περισσεύει.

β) η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών που πλησιάζει στην άριστη περιοχή, δηλαδή πυκνότερη δομή των αδρανών.

γ) η καλή ποιότητα και καθαρότητα των αδρανών για την καλύτερη προσκόλληση της τσιμεντοκονίας.

δ) η αποτελεσματική συμπίκνωση του νωπού σκυροδέματος.

ε) η καλή συντήρηση για την αποφυγή ρηγματώσεων κατά τη διάρκεια της πήξεως.[3]

3.11. Υδαταπορροφητικότητα και υδατοπερατότητα

Η διέλευση του νερού διαμέσου του σκυροδέματος πραγματοποιείται μέσα από τα διάκενα, δηλαδή τους πόρους, τις ρωγμές και τα τριχοειδή του υλικού. Η ποσότητα και η ταχύτητα με την οποία περνά το νερό δεν εξαρτώνται μόνο από το πλήθος και το σχήμα των διόδων, αλλά και από τις δυνάμεις έλξης ή άπωσης ανάμεσα στα μόρια του νερού και του σκυροδέματος. Οι δυνάμεις αυτές είναι διαφορετικές στη περίπτωση διέλευσης άλλου είδους υγρού. Στην περίπτωση των υδρατμών οι δυνάμεις αυτές π.χ. είναι μηδενικές.

α) Ως υδαταπορροφητικότητα εννοούμε την ικανότητα που έχει το υλικό να απορροφά ή να αναρροφά νερό χωρίς εξωτερική πίεση. Ορίζεται ως ο λόγος

$$A = \beta_v / \beta_o$$

του βάρους του νερού που απορροφήθηκε προς το βάρος του στεγνού υλικού.

Χαρακτηριστική κάθε φορά, είναι η «ταχύτητα αναρροφήσεως» δηλαδή ο λόγος της ποσότητας του νερού που αναρροφά το υλικό δια του χρόνου και της επιφάνειας σε $[gr/cm^2 \cdot min]$ ή το «βάθος διεισδύσεως» δηλαδή ο λόγος του βάθους στο οποίο εισδύει το νερό διά του χρόνου που χρειάστηκε σε $[cm/sec]$.

β) Ως υδατοπερατότητα εννοούμε την ικανότητα που έχει το νερό να περνάει μέσα από το υλικό, όταν βρίσκεται υπό πίεση. Καθορίζεται ως ο λόγος της ποσότητας του νερού που περνά διά της επιφάνειας και του χρόνου, για διαφορά πιέσεως 1 mm στήλης υδραργύρου.

$$Y = N / E \cdot t \cdot \Delta p$$

Την υδατοπερατότητα επί το πάχος του υλικού, δηλαδή την ποσότητα

$$v = Y \cdot \delta [gr / m \cdot h \cdot 1mmHg]$$

ονομάζουμε συντελεστή υδραγωγιμότητας ενός υλικού.

Πολύ συχνά στην πράξη χρησιμοποιείται το αντίστροφο της υδατοπερατότητας

$$K = \delta / v [m^2 \cdot h \cdot 1mmHg / gr]$$

και ονομάζεται αντίσταση στην υδατοπερατότητα ή υδατοστεγανότητα.

Η υδατοστεγανότητα της τσιμεντοκονίας είναι πάρα πολύ μεγάλη όπως φαίνεται στο παρακάτω διάγραμμα. Για μικρές τιμές του λόγου «νερό προς τσιμέντο» πλησιάζει την υδατοστεγανότητα του μαρμάρου.

Η υδατοστεγανότητα του σκυροδέματος όμως είναι σαφώς κατώτερη. Κυριώτερη αιτία ελλατώσεως της υδατοστεγανότητας του σκυροδέματος θεωρείται η ατελής προσκόλληση του τσιμεντοπολτού επάνω στα αδρανή. Η διέλευση του νερού γίνεται κυρίως από τις επιφάνειες των αδρανών και από τα διάκενα που βρίσκονται γύρω από αυτά.

γίνεται κυρίως από τις επιφάνειες των αδρανών και από τα διάκενα που βρίσκονται γύρω από αυτά.

Δεύτερη κατηγορία διόδων για το νερό αποτελούν τα μικροσκοπικά κενά που δημιουργούνται από την ελλιπή συμπίκνωση και τη μη πλήρωση όλων των κενών μεταξύ των αδρανών από τσιμεντοκονία και από τις φυσαλίδες με αέρα που εγκλωβίζονται μέσα στη μάζα του σκυροδέματος κατά την ανάμειξη.

Άλλη κατηγορία, τέλος, αποτελούν οι ρηγματώσεις που προέρχονται από τις συστολοδιαστολές του υλικού λόγω της ξηράνσεως, των θερμοκρασιακών μεταβολών ή άλλων αιτιών.

Για το ολικό πορώδες και για την υδαταπορροφητικότητα του σκυροδέματος αναφέρονται οι ακόλουθες τιμές :

- Ολικό πορώδες: 8 -25% και συνηθέστερα 10-13%
- Υδαταπορροφητικότητα, κατά βάρος 2-9%
κατά όγκο 4-12%

Για την αύξηση της υδατοστεγανότητας του σκυροδέματος επιβάλλεται βασικά ο περιορισμός του πορώδους δηλαδή καλή κοκκομετρική διαβάθμιση (περίσσεια λεπτόκοκκου υλικού), περιορισμός του νερού αναμείξεως, καλή πρόσφυση αδρανών-τσιμεντοκονίας, καλή συμπίκνωση και τέλος καλή συντήρηση για την αποφυγή ρηγματώσεως, κατά την πήξη και τις πρώτες ώρες της σκληρύνσεως.

Τα στεγανοποιητικά υλικά που προσθέτονται στη μάζα του σκυροδέματος από τη μια μεριά βελτιώνουν την πλαστικότητα του νωπού σκυροδέματος και έτσι βοηθούν στην καλύτερη συμπίκνωση με σύγχρονη μείωση του νερού αναμείξεως και από την άλλη μεριά αυξάνουν τις υδραπωθητικές ιδιότητες του υλικού.[3]

3.11.1. Ροή, διάχυση και απορροφητικότητα

Λόγω της ύπαρξης των διάφορων τύπων πόρων, ορισμένοι από τους οποίους συνεισφέρουν στην περατότητα και ορισμένοι όχι, είναι σημαντικό να ξεχωρίσουμε

τους όρους πορώδες και περατότητα. Το πορώδες είναι ένα μέτρο του ποσοστού των πόρων στο σύνολο του όγκου του σκυροδέματος, και εκφράζεται συνήθως επί τις εκατό. Αν το πορώδες είναι υψηλό και οι πόροι συνδέονται μεταξύ τους, συνεισφέρουν στην ροή των ρευστών διαμέσου του σκυροδέματος το οποίο αποκτά έτσι υψηλή περατότητα. Από την άλλη όμως, αν οι πόροι είναι ασυνεχείς ή δεν επηρεάζουν την ροή, τότε η περατότητα του σκυροδέματος είναι χαμηλή ακόμα και αν το πορώδες του είναι υψηλό.

Το πορώδες μπορεί να μετρηθεί με πορομετρία υδραργύρου· στη μέθοδο της διείσδυσης μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και άλλα υγρά. Μία ένδειξη του πορώδους μπορούμε να πάρουμε από μετρήσεις απορροφητικότητας του σκυροδέματος, κάτι που αναφέρεται εκτενέστερα σε παρακάτω κεφάλαιο.

Όσον αφορά στην ευκολία κίνησης των ρευστών διαμέσου του σκυροδέματος, κάτι που με κάποια ανοχή ονομάσαμε διαπερατότητα, θα πρέπει να διακρίνουμε τρεις μηχανισμούς: α) Την *διαπερατότητα* που αναφέρεται σε ροή κάτω από πίεση. β) Τη *διάχυση* που είναι η διαδικασία στην οποία ένα ρευστό κινείται υπό την επίδραση διαφορικής συγκέντρωσης. γ) Την *απορροφητικότητα* που είναι το αποτέλεσμα της τριχοειδούς κίνησης στους πόρους του σκυροδέματος οι οποίοι είναι ανοιχτοί στο μέσο του περιβάλλοντος.

Επειδή η διαπερατότητα του σκυροδέματος περιγράφεται με διάφορους όρους, κάνουμε παρακάτω μια μικρή αναφορά στους όρους αυτούς, στις μαθηματικές σχέσεις που τις εκφράζουν και τις μονάδες μέτρησής τους.

3.11.2. Συντελεστής διαπερατότητας

Η ροή στους τριχοειδείς πόρους σε κορεσμένο σκυρόδεμα ακολουθεί τον νόμο του Darcy για στρωτή ροή διαμέσου πορώδους μέσου:

$$\frac{dq}{dt} \cdot \frac{1}{A} = \frac{K' \cdot \rho \cdot g}{\eta} \cdot \frac{\Delta h}{L}$$

όπου: dq/dt = η ποσότητα ροής του νερού σε m^3/s ,

A = η επιφάνεια του δείγματος που είναι κάθετη προς τη ροή σε m^2 ,

- Δh =η διαφορά πίεσης στα δύο άκρα του δοκιμίου σε m,
 L =πάχος του δείγματος σε m,
 η =δυναμικό ιξώδες του υγρού σε N s/m²,
 ρ =πυκνότητα του υγρού σε kg/m³ και
 g =επιτάχυνση της βαρύτητας.

Ο συντελεστής K' εκφράζεται σε m² και παρουσιάζει την *εγγενή διαπερατότητα* του υλικού, ανεξάρτητα από το υγρό που χρησιμοποιούμε. Όταν το υγρό αυτό είναι νερό τότε μπορούμε να θέσουμε:

$$K = \frac{K' \cdot \rho \cdot g}{\eta}$$

Ο συντελεστής K' τότε εκφράζεται σε μέτρα ανά δεπτερόλεπτο και αναφέρεται ως ο συντελεστής της περατότητας του σκυροδέματος, εννοώντας βέβαια ότι αναφερόμαστε σε νερό και σε θερμοκρασία δωματίου. Η τελευταία διευκρίνηση γίνεται γιατί, όπως ξέρουμε, το ιξώδες του νερού εξαρτάται από την θερμοκρασία. Έτσι η εξίσωση ροής μπορεί να γραφεί και σαν:

$$\frac{dq}{dt} \cdot \frac{1}{A} = K \cdot \frac{\Delta h}{L}$$

και όταν επιτευχθεί σταθερή κατάσταση ροής dq/dt , τότε το K υπολογίζεται άμεσα.

3.11.3. Συντελεστής διάχυσης

Η εξίσωση της διάχυσης που μπορεί να εφαρμοστεί στους υδρατμούς και στον αέρα εκφράζεται από τον πρώτο νόμο του Fick ως:

$$J = -D \cdot \frac{dc}{dL}$$

όπου: dc/dL =η κλίση της μεταβολής της συγκέντρωσης σε kg/m⁴ ή moles/m⁴,

D =ο συντελεστής διάχυσης σε m²/s,

J =ο βαθμός μεταφοράς μάζας σε kg/m²s (ή moles/m²s) και

L =το πάχος του δείγματος σε μέτρα.

Παρόλο που η διάχυση λαμβάνει χώρα μόνο μέσα στους πόρους, οι τιμές του βαθμού μεταφοράς και του συντελεστή διάχυσης αναφέρονται στην ενδιάμεση επιφάνεια του δείγματος του σκυροδέματος που είναι κάθετη προς την κύρια διεύθυνση της διάχυσης. Έτσι το D είναι, στην πραγματικότητα ο ενεργός συντελεστής διάχυσης.

Ο συντελεστής διάχυσης ενός αερίου μπορεί να προσδιοριστεί πειραματικά σε ένα σταθερής κατάστασης σύστημα, όπου δύο πλευρές ενός δείγματος σκυροδέματος εκτίθενται, η κάθε μία σε διαφορετικό αέριο: έτσι προσδιορίζεται η μάζα των αερίων στην πλευρά αντίθετα σε αυτήν στην οποία αρχικά βρίσκονταν. Η πίεση στην κάθε πλευρά του δείγματος πρέπει να είναι η ίδια αφού η κινητήρια δύναμη στη διάχυση είναι η διαφορά στη μοριακή συγκέντρωση και όχι η διαφορά πίεσης.

3.11.4. Απορροφητικότητα

Λόγω των δυσκολιών που συνδέονται με τις δοκιμές απορρόφησης και επειδή οι δοκιμές διαπερατότητας μετράνε την ανταπόκριση του σκυροδέματος στην πίεση, κάτι που σπάνια είναι η αιτία της διείσδυσης των ρευστών στο σκυρόδεμα, δημιουργείται η ανάγκη για άλλο ένα τύπο δοκιμής. Ένας τέτοιος τύπος μετρά την τιμή της απορρόφησης του νερού μέσω τριχοειδούς ρόφησης μη κορεσμένου σκυροδέματος που είναι σε επαφή με το νερό. Η δοκιμή της απορροφητικότητας προσδιορίζει το βαθμό της τριχοειδούς απορρόφησης ενός κυβικού δοκιμίου που στηρίζεται έτσι ώστε μόνο 2 - 5 mm του να βυθίζονται στο νερό. Καταγράφεται με τον χρόνο λοιπόν η αύξηση της μάζας του δοκιμίου. Έχει βρεθεί ότι ισχύει η παρακάτω σχέση:

$$i = S \cdot t^{0.5}$$

όπου: i = η αύξηση της μάζας σε g/mm^2 από την αρχή της δοκιμής για κάθε μονάδα επιφάνειας σε επαφή με το νερό αφού η αύξηση στη μάζα οφείλεται στην είσοδο του νερού, 1 g ισούται με 1 mm^3 , έτσι ώστε το i να εκφράζεται σε mm,

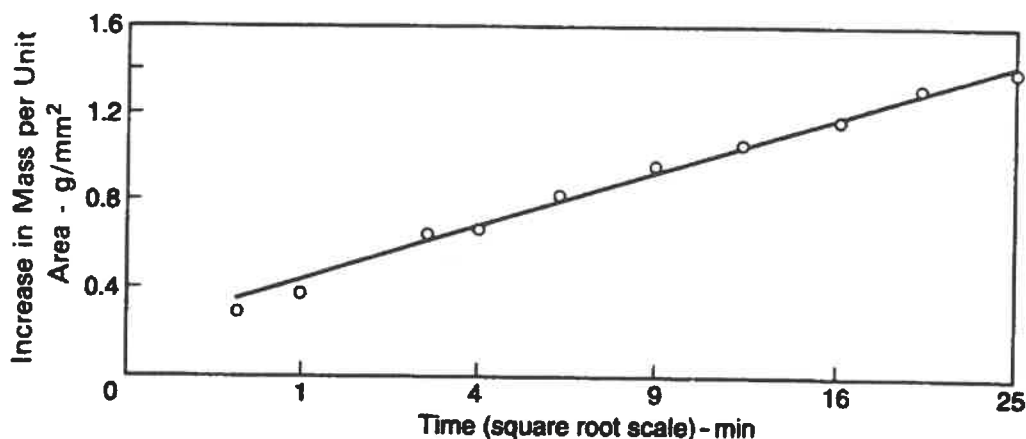
t = ο χρόνος στον οποίο προσδιορίζεται η μάζα, σε λεπτά και

S = η απορροφητικότητα σε $\text{mm/min}^{0.5}$.

Στην πράξη, είναι πιο εύκολο να μετράμε την τιμή του i σαν αύξηση του επιπέδου του νερού στο σκυρόδεμα, κάτι που φαίνεται με πιο σκούρο χρώμα. Σε τέτοια περίπτωση το i μετράται κατευθείαν σε χιλιοστά. Αν θέλουμε την απορροφητικότητα στο σύστημα SI τότε πρέπει να γίνει η παρακάτω μετατροπή:

$$1 \text{ mm/min}^{0.5} = 1,29 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}^{0.5}.$$

Στη δοκιμή, αρκετές μετρήσεις έγιναν σε μία περίοδο μέχρι 4 ώρες, και μία ευθεία γραμμή προσαρμόζεται στο διάγραμμα της αύξησης της μάζας, ή της ανύψωσης της στάθμης του νερού, προς την τετραγωνική ρίζα του χρόνου. Η πρώτη μέτρηση όπως και οι αμέσως επόμενες μετρήσεις αγνοούνται γιατί παρουσιάζεται μια μικρή αύξηση στη μάζα τη στιγμή που οι ανοιχτοί πόροι της επιφάνειας στα πρώτα 2 με 5 mm του δοκιμίου βυθίζονται.



Example of relation between increase in mass of water per unit area and time used to calculate sorptivity

Σχ. 3.10 Παράδειγμα της σχέσης μεταξύ της αύξησης της μάζας του νερού ανά μονάδα επιφάνειας και χρόνου που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της απορροφητικότητας.

Μερικές τυπικές τιμές της απορροφητικότητας είναι: $0,09 \text{ mm/min}^{-0.5}$ για σκυρόδεμα με λόγο νερό/τσιμέντο 0,4 και $0,17 \text{ mm/min}^{-0.5}$ για νερό/τσιμέντο 0,6. Τα προηγούμενα είναι μόνο κάποια παραδείγματα.

Όπως και στην αρχική δοκιμή της επιφανειακής απορρόφησης, όσο πιο υψηλή είναι η τιμή της υγρασίας του σκυροδέματος τόσο πιο χαμηλή είναι η απορροφητικότητα.[7]

4. ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

4.1. Ανθεκτικότητα Σκυροδέματος

Είναι σημαντικό η δομή του σκυροδέματος να συνεχίζει να παρουσιάζει τις καθορισμένες ιδιότητές του, δηλαδή να διατηρεί την απαιτούμενη αντοχή και λειτουργικότητα, κατά τη διάρκεια της απαιτούμενης ή της αναμενόμενης διάρκειας ζωής. Αυτό συνεπάγεται ότι το σκυρόδεμα πρέπει να είναι ικανό να αντέχει στη διαδικασία της διάβρωσης στην οποία μπορεί να εκτεθεί. Ένα τέτοιο σκυρόδεμα λέμε ότι είναι ανθεκτικό.

Αξίζει να προσθέσουμε ότι η αντοχή δεν σημαίνει ζωή επ' αόριστο, ούτε σημαίνει ότι το σκυρόδεμα θα αντιστέκεται σε οποιαδήποτε δράση. Επιπλέον, σε αντίθεση με το παρελθόν, σήμερα συνειδητοποιούμε ότι, σε πολλές περιπτώσεις απαιτείται τακτική υποστήριξη.

Οι πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία του σκυροδέματος επικεντρώθηκαν στο να επιτύχουν υψηλότερες αντοχές. Μέχρι τώρα υποθέταμε ότι «το υψηλής αντοχής σκυρόδεμα είναι και ανθεκτικό», και η μόνη ειδική μελέτη γινόταν στα αποτελέσματα μετά από αλλαγές στην πήξη και την τήξη καθώς και σε κάποιους τύπους χημικής προσβολής. Είναι τώρα γνωστό ότι για τις διάφορες συνθήκες έκθεσης του σκυροδέματος στις κατασκευές θα πρέπει να λαμβάνεται υπ' όψη στο στάδιο του σχεδιασμού η αντοχή και η ανθεκτικότητά του. Έμφαση πρέπει να δοθεί και στους δύο αυτούς παράγοντες γιατί θα ήταν λάθος να τονιστεί ένας από τους δύο.

4.1.1. Αιτίες ανεπαρκούς ανθεκτικότητας

Η ανεπαρκής ανθεκτικότητα φαίνεται από τη διάβρωση που μπορεί να οφείλεται είτε σε εξωτερικούς παράγοντες ή σε εσωτερικές αιτίες μέσα στο ίδιο το σκυρόδεμα. Οι διάφορες δράσεις μπορεί να είναι είτε φυσικές, είτε χημικές, είτε μηχανικές. Μηχανικές φθορές μπορεί να οφείλονται σε μία σύγκρουση, στην τριβή, στη διάβρωση, ή στη δημιουργία κοιλωμάτων. Οι χημικές αιτίες διάβρωσης

περιλαμβάνουν αλκαλο-σιλικονούχες και αλκαλο-ανθρακούχες αντιδράσεις. Εξωτερικές χημικές προσβολές πραγματοποιούνται κυρίως με την δράση ελεύθερων ιόντων όπως χλωριδίων, θειικών αλάτων, ή διοξειδίου του άνθρακα όπως επίσης και πολλών φυσικών και βιομηχανικών υγρών και αερίων. Η επιβλαβής αυτή δράση μπορεί να είναι διάφόρων μορφών, έμμεση ή άμεση.

Οι φυσικές αιτίες διάβρωσης περιλαμβάνουν και τα αποτελέσματα της έκθεσης σε υψηλές θερμοκρασίες ή τις διαφορές στο συντελεστή θερμοκρασιακής διαστολής των αδρανών και του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού. Άλλη μία σημαντική αιτία φθοράς είναι και οι διαδοχικές πτήσεις και τήξεις του σκυροδέματος και η βοηθητική δράση των αντιπαγωτικών αλάτων.

Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι οι φυσικές και χημικές διαδικασίες διάβρωσης μπορεί να δράσουν συνεργώντας η μία στην άλλη. Δηλαδή, η διάβρωση του σκυροδέματος σπάνια οφείλεται αποκλειστικά σε έναν παράγοντα: το σκυρόδεμα συχνά μπορεί να είναι ικανοποιητικό παρόλο την ύπαρξη ανεπιθύμητων στοιχείων, αλλά με έναν επιπλέον αρνητικό παράγοντα, η φθορά θα επέλθει. Με εξαίρεση τις μηχανικές φθορές, όλες οι αρνητικές επιδράσεις στην ανθεκτικότητα έχουν σχέση με τη διέλευση ρευστών διαμέσου του σκυροδέματος. Γι' αυτό το λόγο, για τη μελέτη της ανθεκτικότητας απαιτείται η κατανόηση του φαινομένου που αναφέραμε.

4.1.2. Διέλευση ρευστών διαμέσω του σκυροδέματος

Υπάρχουν τρία είδη ρευστών που κυρίως έχουν σχέση με την ανθεκτικότητα και μπορούν να διεισδύσουν στο σκυρόδεμα: το νερό, απεσταγμένο ή φέρον ελεύθερα ιόντα, το διοξείδιο του άνθρακα και το οξυγόνο. Αυτά μπορούν να κινούνται μέσα στο σκυρόδεμα με διαφορετικούς τρόπους, αλλά όλων η κίνηση εξαρτάται κυρίως από τη δομή του ενυδατωμένου τσιμεντοπολτού. Όπως είπαμε και προηγουμένως η ανθεκτικότητα του σκυροδέματος εξαρτάται κατά ένα μεγάλο μέρος από την ευκολία με την οποία μπορούν τα ρευστά, τα υγρά και τα αέρια να εισέλθουν και να κινηθούν μέσα στο σκυρόδεμα: αυτό το φαινόμενο ονομάζεται περατότητα του σκυροδέματος. Μιλώντας με αυστηρούς όρους, η περατότητα αναφέρεται στη ροή διαμέσω ενός πορώδους μέσου. Η κίνηση των διαφόρων

ρευστών μέσα στο σκυρόδεμα γίνεται όχι μόνο με τη ροή διαμέσω του πορώδους συστήματος αλλά και με τη διάχυση και την απορρόφηση, έτσι το κύριο ενδιαφέρον μας είναι στην πραγματικότητα η *διαπερατότητα* του σκυροδέματος. Παρόλα αυτά όμως ο κοινά αποδεκτός όρος "περατότητα" θα χρησιμοποιείται για όλες τις κινήσεις των ρευστών διαμέσου του σκυροδέματος εκτός εάν για λόγους ακρίβειας θα πρέπει να διευκρινίζουμε τους διάφορους τύπους ροών.

Επιρροή του πορώδους συστήματος

Σχετική με την περατότητα είναι η φύση του πορώδους συστήματος του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού, όπως επίσης και η περιοχή κοντά στη επιφάνεια ανάμεσα στον τσιμεντοπολτό και τα αδρανή, γνωστή ως μεταβατική ζώνη. Η επιφάνεια αυτή καταλαμβάνει από το ένα τρίτο ως το μισό του συνολικού όγκου του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού του σκυροδέματος και είναι γνωστό ότι έχει διαφορετική μικροδομή από αυτόν. Είναι και η περιοχή απ' όπου ξεκινούν μικρορωγμές. Γι' αυτούς τους λόγους περιμένουμε η μεταβατική αυτή ζώνη να επηρεάσει σημαντικά την περατότητα του σκυροδέματος. Ο Larbi, όμως, βρήκε ότι παρόλο το υψηλό πορώδες της ενδιάμεσης, μεταβατικής ζώνης, η περατότητα του σκυροδέματος επηρεάζεται από τον όγκο του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού που είναι το μόνο συνεχές υλικό στο σκυρόδεμα.

Την άποψη του Larbi υποστηρίζει και το γεγονός ότι η περατότητα του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού δεν είναι μικρότερη από αυτή ενός σκυροδέματος που έχει παραχθεί με τον ίδιο τσιμεντοπολτό. Σχετικό όμως με το σκυρόδεμα είναι και το γεγονός ότι οποιαδήποτε κίνηση ρευστού πρέπει να ακολουθήσει δρόμο μακρύτερο και πιο ελικοειδή λόγω των αδρανών, κάτι που επίσης μειώνει την καθαρή περιοχή ροής. Έτσι, η σημασία της ενδιάμεσης/μεταβατικής ζώνης σε σχέση με την περατότητα παραμένει αβέβαιη. Ακόμη, πιο γενικά, πρέπει να παραδεχθούμε ότι η σχέση της περατότητας με την πορώδη δομή του τσιμεντοπολτού είναι άμμεση (μια αύξηση του πορώδους ισοδυναμεί σε αύξηση της περατότητας).

Οι πόροι που έχουν σχέση με την περατότητα είναι εκείνοι με διάμετρο τουλάχιστον 120 ή 160 nm. Αυτοί οι πόροι επίσης θα πρέπει να είναι συνεχείς.

Στους πόρους που δεν επηρεάζουν τη ροή συνεπώς και την περατότητα εκτός από τους ασυνεχείς πρέπει να προσθέσουμε και εκείνους που περιέχουν νερό όπως επίσης και εκείνους που έχουν στενό στόμιο, ακόμη και αν οι ίδιοι οι πόροι έχουν μεγάλοι διάμετρο.

Και τα αδρανή μπορεί να περιέχουν πόρους αλλά αυτοί είναι συνήθως ασυνεχείς. Επιπλέον, οι κόκκοι των αδρανών έχουν καλυφθεί από τον τσιμεντοπολτό έτσι ώστε οι πόροι τους να μην επηρεάζουν την περατότητα του σκυροδέματος. Το ίδιο ισχύει και σε ορισμένα κενά αέρα όπως εγκλωβισμένες φυσαλίδες αέρα. Επίσης, το σκυρόδεμα σαν σύνολο περιέχει κενά που μπορεί να οφείλονται είτε σε ατελή συμπίκνωση είτε στο φαινόμενο της εξίδρωσης. Αυτά τα κενά μπορεί να καταλαμβάνουν από το 1% ως το 10% του όγκου του σκυροδέματος, όπου το τελευταίο νούμερο αναφέρεται σε ένα σκυρόδεμα με υφή σαν κερύθρα και πολύ χαμηλή αντοχή. Τέτοιο σκυρόδεμα βέβαια, ή σκυρόδεμα με ρηγματωμένα τμήματα, δεν πρέπει να κατασκευάζεται γι' αυτό και δεν πρόκειται να ασχοληθούμε με αυτά καθόλου.[7]

Διάχυση

Όπως λέχθηκε προηγουμένως, όταν η κίνηση ενός αερίου ή ενός ατμού διαμέσου του σκυροδέματος είναι το αποτέλεσμα διαφορετικής συγκέντρωσης, και όχι διαφορετικής πίεσης, τότε πραγματοποιείται διάχυση.

Όσον αφορά στη διάχυση των αερίων στο σκυρόδεμα, το διοξείδιο του άνθρακα και το οξυγόνο έχουν πρωταρχική σημασία: το πρώτο οδηγεί σε ενανθράκωση του ενυδατωμένου τσιμεντοπολτού, ενώ το τελευταίο καθιστά δυνατή την πρόοδο της διάβρωσης του χάλυβα του οπλισμού. Ο πρώτος από αυτούς τους μηχανισμούς διάβρωσης αναφέρονται στην συνέχεια του κεφαλαίου. Σε αυτό το σημείο είναι χρήσιμο να αναφέρουμε ότι ο συντελεστής διάχυσης ενός αερίου είναι αντιστρόφως ανάλογος στην τετραγωνική ρίζα του μοριακού του βάρους, έτσι, για παράδειγμα, το οξυγόνο διαχέεται, θεωρητικά, 1,17 φορές γρηγορότερα από το διοξείδιο του άνθρακα. Αυτή η σχέση μας επιτρέπει να υπολογίσουμε τον συντελεστή διάχυσης ενός αερίου από πειραματικά δεδομένα ενός άλλου αερίου.

Διάχυση διαμέσου του αέρα και του νερού

Ο Παπαδάκης [8] παρουσιάζει διάφορες εκφράσεις για τον ενεργό συντελεστή διάχυσης του διοξειδίου του άνθρακα ως μία ιδιότητα της σχετικής υγρασίας του αέρα και του πορώδους του σκληρομένου τσιμεντολτού ή της αντοχής του σκυροδέματος. Η διάχυση διαμέσου του νερού είναι 4 τάξεις μεγέθους πιο αργή απ' ό,τι διαμέσου του αέρα. Ας σημειώσουμε ότι ο συντελεστής διάχυσης μεταβάλλεται με την ηλικία γιατί το πορώδες του σκυροδέματος αλλάζει με τον καιρό, ειδικά όταν συνεχίζεται η ενυδάτωσή του.

Η διάχυση του οξυγόνου διαμέσου του σκυροδέματος επηρεάζεται σημαντικά από την υγρασία κατά τη συντήρηση. Παρατεταμένη συντήρηση μειώνει τον συντελεστή διάχυσης κατά 6 μονάδες, περίπου. Η υγρασία του υπό δοκιμή σκυροδέματος επηρεάζει εξίσου τη διάχυση αφού η ύπαρξη νερού στους πόρους μειώνει σημαντικά το συντελεστή της. Για παράδειγμα, ο συντελεστής διάχυσης του οξυγόνου ενός καλά συντηρημένου σκυροδέματος σε σχετική υγρασία 55%, είναι μικρότερος από 5×10^{-10} m/s για υψηλής ποιότητας σκυρόδεμα και μεγαλύτερος από 50×10^{-10} m/s για χαμηλής ποιότητας σκυρόδεμα.

Η κίνηση υδρατμών μέσα στο σκυρόδεμα μπορεί να είναι αποτέλεσμα της διαφοράς υγρασίας των δύο αντίθετων πλευρών. Η σχετική υγρασία στις δύο πλευρές πρέπει να είναι γνωστή γιατί μία αύξηση στη σχετική υγρασία μειώνει τον διαθέσιμο χώρο των πόρων που περιέχουν αέρα για διάχυση. Αυτό συνεπάγεται ότι, εάν η υγρή πλευρά, για παράδειγμα, είναι διαβρεγμένη και αυξήσουμε τη σχετική υγρασία της ξηρής πλευράς η περατότητα των ατμών μειώνεται. Η περατότητα των υδρατμών στο σκυρόδεμα επηρεάζεται κατά τον ίδιο τρόπο με την περατότητα του αέρα.

Επιπρόσθετα με την διάχυση των αερίων, ελεύθερα ιόντα, όπως χλωριδία και θειικά, μετακινούνται με διάχυση στο νερό των πόρων. Το νερό των πόρων είναι αυτό που αντιδρά με τον ενυδατωμένο τσιμεντοπολτό έτσι ώστε η διάχυση ιόντων να είναι σημαντική σε σχέση με την προσβολή του σκυροδέματος από τα θειικά και την προσβολή του χάλυβα του οπλισμού από τα χλωριόντα. Η διάχυση των

ιόντων είναι πιο αποτελεσματική όταν οι πόροι του σκληρημένου τσιμεντοπολτού είναι κορεσμένοι, αλλά μπορεί να συμβεί και σε μερικώς κορεσμένο σκυρόδεμα.

Όπως και η περατότητα, η διάχυση είναι μικρότερη σε χαμηλούς λόγους νερού/τσιμέντο, αλλά ο λόγος αυτός επηρεάζει λιγότερο την διάχυση απ' ό τι την περατότητα.

4.1.3. Απορρόφηση

Ο όγκος των πόρων του σκυροδέματος, ως ένδειξη της ευκολίας με την οποία ένα ρευστό μπορεί να το διαπεράσει, μετράται με την απορρόφηση. Η απορροφητικότητα μετράται συνήθως με ξήρανση ενός δοκιμίου, εμβάπτιση σε νερό και μέτρηση της αύξησης της μάζας του σαν ποσοστό της αρχικής ξηρής μάζας. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες μέθοδοι οι οποίες όμως δίνουν και διαφορετικά αποτελέσματα. Ένας λόγος για αυτή την διαφορά στις τιμές της απορρόφησης είναι κατά πρώτον ότι η ξήρανση σε κανονική θερμοκρασία μπορεί να μην καταφέρει να εξατμίσει όλο το νερό και κατά δεύτερον η ξήρανση σε υψηλές θερμοκρασίες μπορεί να αφαιρέσει ορισμένο από το δεσμευμένο νερό. Η απορρόφηση λοιπόν δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως μέτρο της ποιότητας του σκυροδέματος, αλλά τα περισσότερα «καλά» σκυροδέματα έχουν απορρόφηση αρκετά μικρότερη από το 10% της μάζας τους. Αν θέλουμε να μετρήσουμε τον όγκο που κατέλαβε το νερό θα πρέπει να λάβουμε υπ' όψη τη διαφορά πυκνότητας του νερού και του σκυροδέματος.

Τα πειράματα απορρόφησης δεν γίνονται συχνά εκτός από τους συνηθισμένους ελέγχους σε προκατασκευασμένα τμήματα, όπως είναι οι πλάκες λιθόστρωσης.

Πειράματα επιφανειακής απορρόφησης

Μεγαλύτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η απορρόφηση της εξωτερικής επιφάνειας που προσφέρει προστασία στον οπλισμό. Γι' αυτό το λόγο έχουν αναπτυχθεί πειράματα που μετρούν την απορρόφηση της επιφάνειας αυτής.

Μία δοκιμή για να προσδιορίσουμε την αρχική απορρόφηση της εξωτερικής επιφάνειας περιγράφεται στο BS 1881:Part 5:1970. Η ποσότητα του νερού που απορροφάται από την επιφάνεια αυτή προσδιορίζεται για μία συγκεκριμένη χρονική διάρκεια (που κειμένεται από 10 λεπτά μέχρι 1 ώρα) και για πίεση νερού 200 mm (8 in). Αυτό η πίεση είναι σχεδόν η ίδια με αυτή που δημιουργείται από καταρρακτώδη βροχή. Η απορρόφηση μετρίεται σε χιλιοστά ανά τετραγωνικό μέτρο ανά δεπτερόλεπτο.

Μία ατέλεια της δοκιμής είναι ότι η ροή του νερού μέσα στο σκυρόδεμα δεν είναι προς όλες τις κατευθύνσεις. Γι' αυτό το λόγο προτάθηκαν άλλα τροποποιημένα πειράματα αλλά κανένα δεν είναι αποδεκτό από όλους.

Η ποσότητα του νερού που απορροφήθηκε από το σκυρόδεμα κατά τη διάρκεια της δοκιμής εξαρτάται από την προυπάρχουσα υγρασία. Γι' αυτό το λόγο τα αποτελέσματα της δοκιμής δεν μπορούν να ερμηνευτούν αν δεν γνωρίζουμε την υγραστική κατάσταση του σκυροδέματος πριν από τη δοκιμή. Αυτή η απαίτηση δεν ικανοποιείται σε επιτόπου σκυρόδεμα. Έτσι μία χαμηλή τιμή της αρχικής απορρόφησης της εξωτερικής επιφάνειας μπορεί να οφείλεται είτε στα ενυπάρχοντα χαμηλά χαρακτηριστικά απορρόφησης που έχει το σκυρόδεμα είτε στο γεγονός ότι οι πόροι του χαμηλής ποιότητας σκυροδέματος είναι ήδη πληρωμένοι με νερό.

Έχοντας τα παραπάνω υπ' όψη, μπορούμε με αυτή τη δοκιμή να συγκρίνουμε την αποτελεσματικότητα της συντήρησης στην εξωτερική επιφάνεια.

Μια δοκιμή που δίνει ένα μέτρο για την ευκολία με την οποία το νερό ή ο αέρας εισέρχεται στο σκυρόδεμα επιτόπου περιγράφεται παρακάτω. Ανοίγουμε μία μικρή τρύπα η οποία σφραγίζεται με σιλικόνη. Το στόμιο ανοίγεται από μία υποδερμική βελόνα που συνδέεται με απορροφητική αντλία οπότε μειώνουμε την πίεση κατά ένα συγκεκριμένο ποσό. Ο χρόνος που χρειάζεται ο αέρας να εισχωρήσει στο σκυρόδεμα και να αυξήσει την πίεση στα κοιλώματα σε μία συγκεκριμένη τιμή είναι μια ένδειξη της αεροπερατότητας του σκυροδέματος.[3]

4.2. Υδατοπερατότητα του σκυροδέματος

Ο σκληρυμένος τσιμεντοπολτός αποτελείται από κόκκους οι οποίοι ενώνονται μόνο κατά ένα μικρό ποσοστό της συνολικής επιφάνειάς τους. Γι' αυτό το λόγο ένα μέρος του νερού βρίσκεται κάτω από την επίδραση των ελκτικών δυνάμεων των στερεών, δηλαδή είναι επιφανειακά προσροφημένο. Αυτό το νερό έχει μεγάλο ιξώδες αλλά παρόλα αυτά κινείται και πέρνει μέρος στη ροή. Όπως έχουμε πει και προηγουμένως η διαπερατότητα του σκυροδέματος δεν είναι συνάρτηση μόνο του πορώδους, αλλά εξαρτάται και από το μέγεθος, το σχήμα, την κατανομή, την ελκτικότητα και την συνέχεια των πόρων. Έτσι, παρόλο που το πηγμα του τσιμέντου έχει πορώδες 28%, η περατότητά του είναι μόνο $7 \cdot 10^{-16}$ m/s. Αυτό οφείλεται στην εξαιρετικά λεπτή υφή του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού. Οι πόροι των στεραίων στοιχείων είναι μικροί και πολλοί, ενώ στα πετρώματα, οι πόροι, αν και λιγότεροι, είναι μεγαλύτεροι και έχουν σαν αποτέλεσμα υψηλότερη περατότητα. Για τον ίδιο λόγο το νερό μπορεί να ρέει πιο εύκολα μέσα στους τριχοειδούς πόρους παρά μέσα στους πολύ μικρότερους πόρους του πηγματος του τσιμέντου. Η διαπερατότητα του τσιμεντοπολτού σαν σύνολο είναι 20 με 100 φορές μεγαλύτερη από του πηγματος του. Έτσι μπορούμε να πούμε ότι η διαπερατότητα του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού εξαρτάται από το πορώδες των τριχοειδών του. Η σχέση αυτή μεταξύ των δύο μεγεθών φαίνεται στο σχήμα 4.1 από το ανάλογο κεφάλαιο στο βιβλίο του Neville. Είναι ενδιαφέρον να σημειώσουμε ότι η διαπερατότητα του γρανίτη είναι περίπου η ίδια με αυτή ενός ώριμου σκυροδέματος με λόγο νερού/τσιμέντο 0,7 όχι υψηλής ποιότητας.

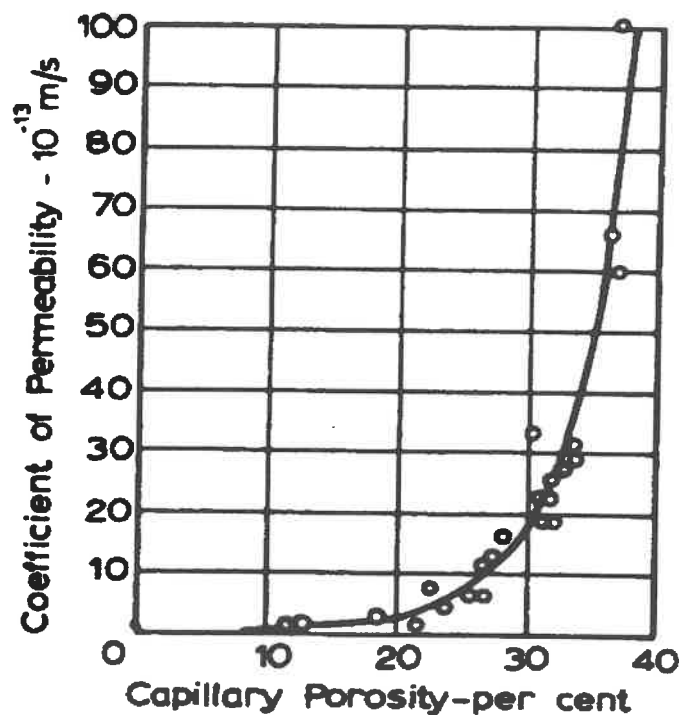
Η διαπερατότητα του τσιμεντοπολτού διαφέρει με την πρόοδο της ενυδάτωσης. Σε ένα νωπό πολτό η ροή του νερού εξαρτάται από το μέγεθος, το σχήμα και την συγκέντρωση των αρχικών κόκκων τσιμέντου. Με την πρόοδο της ενυδάτωσης η διαπερατότητα μειώνεται γρήγορα γιατί ο συνολικός όγκος του πηγματος (συμπεριλαμβανομένου και των πόρων του) είναι περίπου 2,1 φορές μεγαλύτερος από τον όγκο του μη ενυδατωμένου τσιμέντου, με αποτέλεσμα το πηγμα να γεμίζει το χώρο που αρχικά είχε νερό. Σε έναν ώριμο πολτό η διαπερατότητα εξαρτάται από το μέγεθος, το σχήμα και την συγκέντρωση σωματιδίων και κατά πόσο τα τριχοειδή είναι συνεχή. Η μείωση του συντελεστή διαπερατότητας είναι ταχύτερη όσο μικρότερος είναι ο λόγος νερού/τσιμέντο του τσιμεντοπολτού, έτσι

ώστε να πραγματοποιείται μικρή μείωση μετά από υγρή συντήρηση για περίοδο:

7 ημερών όταν ο λόγος νερού/τσιμέντο είναι 0,45

28 ημερών όταν ο λόγος νερού/τσιμέντο είναι 0,60

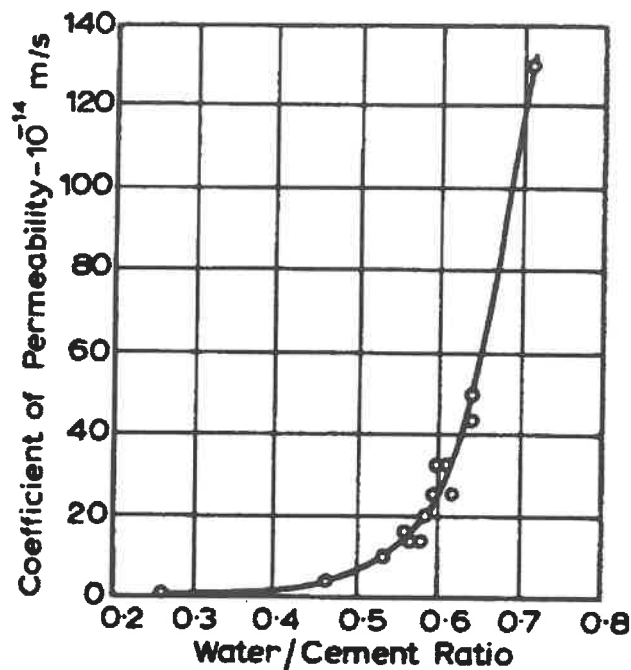
90 ημερών όταν ο λόγος νερού/τσιμέντο είναι 0,70.



Relation between permeability and capillary porosity of cement paste

Σχ. 4.1 Σχέση μεταξύ διαπερατότητας και του πορώδους των τριχοειδών του τσιμεντοπολτού.

Για τσιμεντοπολτούς που ενυδατώθηκαν στον ίδιο βαθμό, η διαπερατότητα είναι τόσο μικρότερη όσο υψηλότερη είναι η περιεκτικότητα του πολτού σε τσιμέντο, π.χ. όσο μικρότερος είναι ο λόγος νερού/τσιμέντο. Το παρακάτω σχήμα (σχήμα 4.2 από Neville) δείνει τιμές για τσιμεντοπολτούς των οποίων έχει ενυδατωθεί το 93% του τσιμέντου. Μπορούμε να παρατηρήσουμε ότι μια μείωση του λόγου νερό/τσιμέντο από, π.χ. 0,7 σε 0,3 προκαλεί μείωση του συντελεστή διαπερατότητας κατά 3 τάξεις μεγέθους. Η ίδια μείωση παρατηρείται και για τσιμεντοπολτό με λόγο 0,7 για ηλικίες από 7 ημέρες έως ένα χρόνο.



Relation between permeability and water/cement ratio for mature cement pastes' (93 per cent of cement hydrated)

Σχ. 4.2 Σχέση μεταξύ διαπερατότητας και λόγου Ν/Τ για ώριμους τσιμεντοπολτούς (έχει ενυδατωθεί το 93% του τσιμέντου).

Στο σκυρόδεμα η τιμή του συντελεστή διαπερατότητας μειώνεται σημαντικά με τη μείωση του λόγου νερού/τσιμέντο· για λόγους νερού/τσιμέντο από 0,75 ως 0,26 ο συντελεστής μειώνεται περισσότερο από 4 τάξεις μεγέθους και για λόγους από 0,75 ως 0,45 για 2 τάξεις μεγέθους. Ειδικότερα για λόγο νερού/τσιμέντο 0,75 ο συντελεστής περατότητας είναι τυπικά 10^{-10} m/s και αυτό θεωρείται ότι αντιπροσωπεύει σκυρόδεμα υψηλής διαπερατότητας. Για λόγο νερού/τσιμέντο 0,45 ο συντελεστής είναι τυπικά 10^{-11} ή 10^{-12} m/s· διαπερατότητες χαμηλότερες από τις προηγούμενες κατά μία τάξη μεγέθους θεωρούνται ότι αντιπροσωπεύουν σκυροδέματα με πολύ μικρή διαπερατότητα.

Αυξάνοντας την περίοδο της υγρής συντήρησης του σκυροδέματος με πολύ μεγάλο λόγο νερού/τσιμέντο από 1 σε 7 ημέρες βρέθηκε ότι μειώθηκε η υδατοπερατότητα στο 1/5.

Η διαπερατότητα του σκυροδέματος επηρεάζεται επίσης και από τις ιδιότητες του τσιμέντου. Για τον ίδιο λόγο νερού/τσιμέντο, το χονδρόκοκκο τσιμέντο τείνει να παράγει τσιμεντοπολτό με υψηλότερο πορώδες απ' ό,τι ένα λεπτότερης υφής τσιμέντο. Η σύνθεση του τσιμέντου επηρεάζει την περατότητα μόνο όσο αφορά στο βαθμό της ενυδάτωσης, αφού το τελικό πορώδες και η διαπερατότητα δεν επηρεάζονται. Γενικά, μπορούμε να πούμε ότι όσο πιο υψηλή είναι η αντοχή του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού τόσο πιο χαμηλή είναι η διαπερατότητα κάτι που είναι αναμενόμενο αφού η αντοχή είναι συνάρτηση του σχετικού όγκου του πηγματος. Υπάρχει μόνο μία εξαίρεση στο παραπάνω· στεγνώνοντας τον τσιμεντοπολτό αυξάνεται η περατότητά του, πιθανόν γιατί η συστολή μπορεί να ρηγματώσει το πηγμα ανάμεσα στα τριχοειδή και έτσι να ανοίξει διόδους στο νερό.

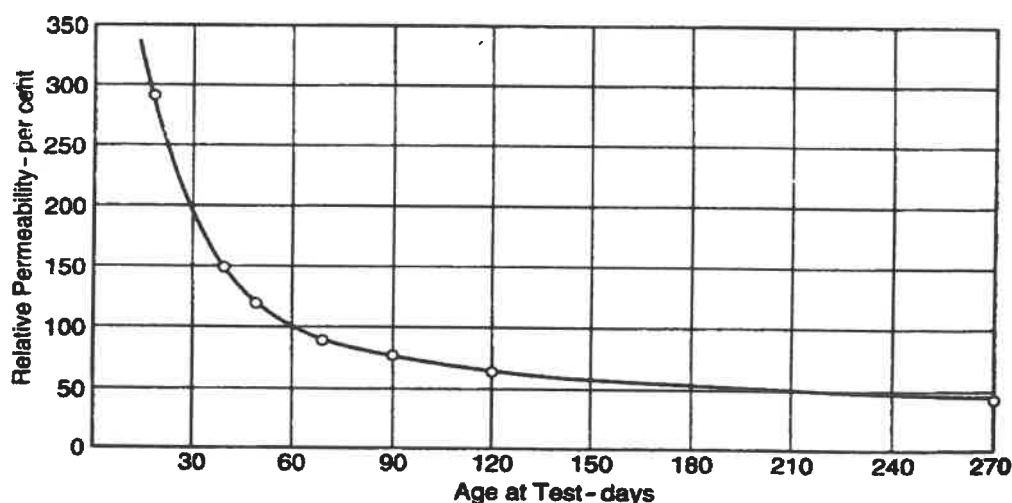
Η διαφορά ανάμεσα στην περατότητα του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού και του σκυροδέματος που περιέχει πολτό με τον ίδιο λόγο νερό/τσιμέντο θα πρέπει να εκτιμηθεί, αφού η διαπερατότητα των αδρανών επηρεάζει την συμπεριφορά του σκυροδέματος. Αν το αδρανές έχει πολύ μικρή διαπερατότητα, η παρουσία του μειώνει την επιφάνεια στην οποία θα πραγματοποιηθεί η ροή. Επίσης, επειδή η διαδρομή της ροής πρέπει να παρακάμψει τα στοιχεία των αδρανών, η διαδρομή γίνεται αρκετά μεγαλύτερη έτσι η παρουσία του αδρανούς στην μείωση της διαπερατότητας μπορεί να είναι σημαντική. Η μεταβατική ζώνη δεν φαίνεται να συμβάλει στη ροή. Γενικά, η περιεκτικότητα του αναμείγματος σε αδρανή δεν επηρεάζει πολύ την διαπερατότητα, γιατί τα αδρανή επικαλύπτονται από τον τσιμεντοπολτό και σε πλήρες συμπαγές σκυρόδεμα αυτό που επηρεάζει κατά κύριο λόγο την διαπερατότητά του είναι η διαπερατότητα του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού.

Η περατότητα του σκυροδέματος κάτω από κρυογενικές συνθήκες π.χ. σε υγρό άζωτο στους -196°C περιλαμβάνει διαφορετικούς μηχανισμούς επειδή ο πάγος μειώνει την ροή και τα αδρανή επηρεάζουν αρκετά. Οι τυπικές τιμές που έχουν αναφερθεί είναι ανάμεσα στο 10^{-18} και 10^{-17} m^2 .

Δοκιμή διαπερατότητας

Οι δοκιμές διαπερατότητας δεν ακολουθούν κάποια συγκεκριμένα πρότυπα, συνεπώς οι τιμές του συντελεστή διαπερατότητας που αναφέρεται σε ορισμένες εκδόσεις μπορεί να μην συγκρίνονται. Σε αυτές τις δοκιμές μετράται η σταθερή ροή του νερού διαμέσου του σκυροδέματος που οφείλεται σε διαφορική πίεση και από την εξίσωση του Darcy υπολογίζεται ο συντελεστής διαπερατότητας K .

Το United States Bureau of Reclamation περιγράφει την διαδικασία 4913-92 στην οποία χρησιμοποιείται νερό υπό πίεση 2,76 Μpa. Υπάρχουν ακόμα και δοκιμές του Καναδά και μια γερμανική δοκιμή που περιγράφεται στο DIN 1048-1991. Σε αυτές τις δοκιμές η πίεση κάτω από την οποία το νερό ωθείται να κινηθεί μέσα στο σκυρόδεμα είναι υψηλή και μπορεί να αλλάξει την αρχική δομή του. Επίσης είναι δυνατό να φράξουν ορισμένοι πόροι από λάσπη. Επιπλέον, κατά τη διάρκεια της δοκιμής μπορεί να γίνει η ενυδάτωση του ακόμα μη ενυδατωμένου τσιμέντου και η τιμή του υπολογισμένου συντελεστή διαπερατότητας να μειώνεται με τον χρόνο.



Correction for age in U.S. Bureau of Reclamation test for permeability of concrete: the ordinate gives the permeability at any age as a percentage of permeability at the age of 60 days

Σχ. 4.3 Διόρθωση για την ηλικία στη δοκιμή του U.S. Bureau of Reclamation για τη διαπερατότητα του σκυροδέματος: δίνεται η διαπερατότητα σε οποιαδήποτε ηλικία ως ποσοστό της διαπερατότητας στην ηλικία των 60 ημερών.

Το U.S. Bureau of Reclamation διαδικασία 4913-92 κάνει μια διόρθωση όσο αναφορά στην ηλικία του δείγματος, όπως φαίνεται στο σχήμα 4.3 (Neville). Η δοκιμή του Bureau of Reclamation είναι σχετική με την συμπεριφορά του σκυροδέματος σε μεγάλα φράγματα. Όμως για τις συνηθισμένες κατασκευές από σκυρόδεμα η ροή του νερού κάτω από υψηλή πίεση δεν είναι αντιπροσωπευτική.

Δοκιμή διείσδυσης νερού

Παρουσιάζεται και άλλο ένα πρόβλημα με τη δοκιμή περατότητας, αφού σε καλή ποιότητας σκυρόδεμα δεν πραγματοποιείται ροή νερού μέσα του. Το νερό διεισδύει στο σκυρόδεμα μέχρι κάποιο βάθος και γι' αυτό βρέθηκε μια εξίσωση από τον Valenta που να μετατρέπει το βάθος της διείσδυσης στο συντελεστή περατότητας K (σε m/s) ισοδύναμο με αυτόν που χρησιμοποιείται στον νόμο του Darcy:

$$K = \frac{e^2 \cdot v}{2 \cdot h \cdot t}$$

όπου: e = το βάθος της διείσδυσης στο σκυρόδεμα σε μέτρα

h = η πίεση σε μέτρα

t = ο χρόνος σε δευτερόλεπτα που ασκείται η πίεση και

v = το ποσοστό του όγκου του σκυροδέματος που καταλαμβάνεται από πόρους.

Η τιμή του v αντιπροσωπεύει πόρους, όπως φυσαλίδες αέρα, που δεν γεμίζουν με νερό εκτός και βρεθούν υπό πίεση και τυπικές τιμές του είναι ανάμεσα στο 0,02 και 0,06.

Η πίεση που εφαρμόζεται συνήθως κειμένεται από 0,1 ως 0,7 Μpa. Το βάθος της διείσδυσης βρίσκεται μετά από θραύση του δοκιμίου και μέτρηση του υγρού μέρους του μετά από ένα χρονικό διάστημα. Αυτή είναι και η τιμή του e στην εξίσωση του Valenta που αναφέραμε.

Είναι επίσης δυνατόν το βάθος της διείσδυσης να χρησιμοποιείται και σαν ποιοτική εκτίμηση του σκυροδέματος: βάθος μικρότερο από 50 mm κατατάσσει το σκυρόδεμα σαν αδιαπέρατο, ενώ βάθος μικρότερο από 30 mm σαν αδιαπέρατο σε συνθήκες επίπονες.[7]

4.3. Αεροπερατότητα και Διαπερατότητα υδρατμών.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, η ευκολία με την οποία ο αέρας, ορισμένα αέρια και οι υδρατμοί μπορούν να διεισδύσουν στο σκυρόδεμα είναι σχετική με την ανθεκτικότητά του όταν εκτίθεται κάτω από διάφορες συνθήκες. Πρέπει να διακρίνουμε ανάμεσα στην περίπτωση που η διείσδυση οφείλεται σε διαφορά πίεσης και στην περίπτωση που η πίεση και η θερμοκρασία είναι η ίδια και στις δύο πλευρές του δοκιμίου, αλλά στην κάθε πλευρά βρίσκονται δύο διαφορετικά αέρια. Στην τελευταία περίπτωση τα αέρια κινούνται μέσα στο σκυρόδεμα μέσω της διάχυσης ενώ στην πρώτη περίπτωση μας απασχολεί η διαπερατότητα.

Ο Lawrence εξέτασε την διάχυση του σκυροδέματος σε αέριο, η οποία μετράται σε τετραγωνικά μέτρα το δευτερόλεπτο, και απέδειξε ότι σε λογαριθμική κλίμακα, η διάχυση είναι γραμμική σε σχέση με την εγγενή διαπερατότητα του σκυροδέματος που μετράται σε τετραγωνικά μέτρα. Η σχέση αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να βρίσκουμε την τιμή της διάχυσης από δοκιμές περατότητας, οι οποίες γίνονται πιο εύκολα.

Επειδή τα αέρια είναι συμπιεσά, η πίεση, p_0 , με την οποία μετράται η ροή, q (σε m^3/s), πρέπει να λαμβάνεται υπόψη όπως επίσης και η πίεση εισαγωγής και εξαγωγής: όλες οι πιέσεις μετρώνται σε N/m^2 . Ο συντελεστής της εγγενούς διαπερατότητας, K , που εκφράζεται σε m^2 είναι:

$$K = \frac{2 \cdot q \cdot p_0 \cdot L \cdot \eta}{A(p^2 - p_a^2)}$$

όπου A = η διατομή του δείγματος σε m^2 ,

L = το πάχος του σε m , και

η = το δυναμικό ιξώδες σε $N \cdot s/m^2$.

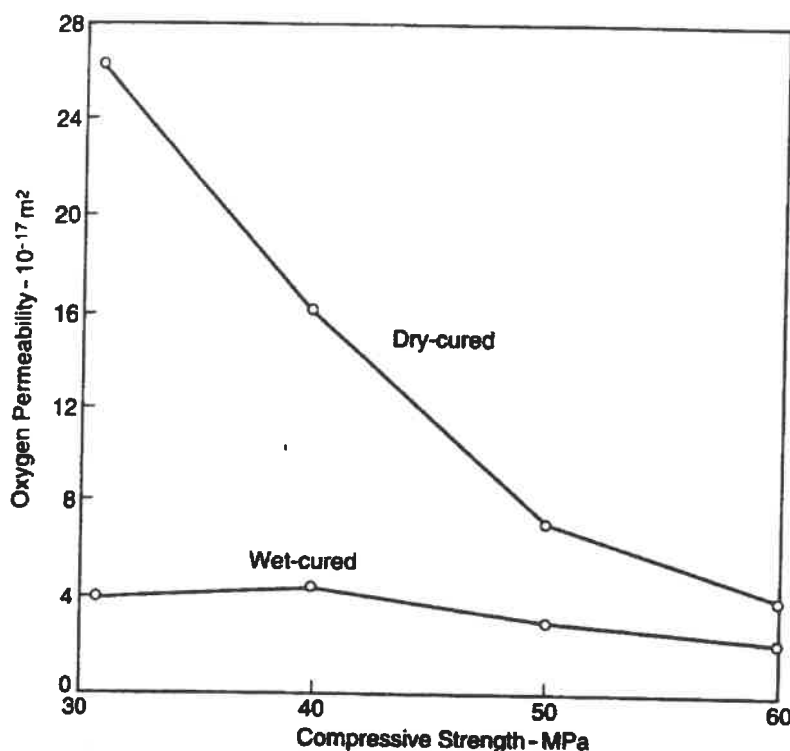
Για το οξυγόνο στους 20°C, $\eta=20,2 \times 10^{-6} \text{ N s/m}^2$.

Θεωρητικά, ο συντελεστής της εγγενούς διαπερατότητας ενός συγκεκριμένου σκυροδέματος θα πρέπει να είναι ο ίδιος ανεξάρτητα από το αν χρησιμοποιείται στη δοκιμή αέριο ή υγρό. Παρόλα αυτά όμως τα αέρια αποδίδουν μία υψηλότερη τιμή στον συντελεστή λόγω του φαινομένου της ολίσθησης των αερίων· αυτό σημαίνει ότι στα άκρα της ροής αέρια έχουν μια ορισμένη ταχύτητα. Η διαφορά μεταξύ αεροπερατότητας και της υδατοπερατότητας είναι μεγαλύτερη σε μικρότερες τιμές του συντελεστή της εγγενούς διαπερατότητας, ο λόγος του πρώτου με τον δεύτερο κειμένεται από 6 μέχρι 100.

Η αεροπερατότητα επηρεάζεται κυρίως από την συντήρηση, ειδικά σε σκυροδέματα μέτριων και χαμηλών αντοχών. Το σχήμα 4.4 (Neville) μας δείχνει την επίδραση που έχει η συντήρηση ενός σκυροδέματος ηλικίας 28 ημερών: α) στο νερό και β) στον αέρα με σχετική υγρασία 65%. Επίσης, επηρεάζεται σημαντικά από την υγρασία του σκυροδέματος· η αλλαγή από μερικώς υγρές σε πολύ ξηρές συνθήκες έχει δείξει μια αύξηση της τάξης των 2 μονάδων. Γι' αυτό το λόγο θα πρέπει σε όλες τις δοκιμές να χρησιμοποιείται ένα σκυρόδεμα συγκεκριμένων συνθηκών. Συνήθως λοιπόν χρησιμοποιείται σκυρόδεμα που έχει ξηρανθεί σε φούρνο. Βέβαια οι συνθήκες αυτές δεν αντιπροσωπεύουν το σκυρόδεμα σε κανονικές συνθήκες και αυτό που θέλουμε είναι την συμπεριφορά του στο οξυγόνο που παίζει σημαντικό ρόλο στην διάβρωση του οπλισμού.

Ένα δοκίμιο που διατηρείται στον αέρα και σε σταθερή σχετική υγρασία, ακόμα και σε 28 ημέρες, δεν σημαίνει ότι έχει, εσωτερικά, ομοιόμορφα κατανεμημένη υγρασία.

Η διαπερατότητα του σκυροδέματος στο οξυγόνο μπορεί να προσδιοριστεί με την μέθοδο του Cembureau. Παρόλα αυτά, όμως, δεν υπάρχει μια γενικά αποδεκτή μέθοδος.



Relation between oxygen permeability and compressive strength for concretes cured for 28 days in water and in air at a relative humidity of 65 per cent

Σχ. 4.4 Σχέση μεταξύ της διαπερατότητας του οξυγόνου και της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος ηλικίας 28 ημερών που συντηρήθηκαν σε νερό και σε αέρα με σχετική υγρασία 65%.

4.3.1. Ενανθράκωση

Οι έρευνες πάνω στην συμπεριφορά του σκυροδέματος βασίζονται στην υπόθεση ότι έχουμε συντήρηση στον αέρα κάτι που δεν ισχύει για ενυδατωμένο τσιμεντοπολτό. Στην πραγματικότητα ο αέρας περιέχει CO_2 το οποίο, λόγω της υγρασίας, αντιδρά με το ενυδατωμένο τσιμέντο· έτσι ο πραγματικός κίνδυνος είναι το ανθρακικό οξύ αφού το αέριο CO_2 δεν είναι επιβλαβές.

Η δράση του CO_2 λαμβάνει χώρα ακόμα και όταν αυτό βρίσκεται σε μικρές συγκεντρώσεις όπως είναι σε αγροτικές περιοχές, όπου η συγκέντρωσή του είναι περίπου 0,03 % κο. Στο εργαστήριο χωρίς εξαερισμό, η συγκέντρωση μπορεί να ξεπεράσει το 0,1 %· σε μεγάλες πόλεις είναι κατά μέσο όρο 0,3 % και σε εξαιρέσεις φτάνει μέχρι το 1 %. Ένα παράδειγμα σκυροδέματος που εκτίθεται σε

μεγάλες συγκεντρώσεις CO_2 είναι η εσωτερική επένδυση οδικών συράγγων. Ο βαθμός της ενανθράκωσης αυξάνεται με την αύξηση στην συγκέντρωση του CO_2 , ειδικά για υψηλούς λόγους νερού/τσιμέντο, και η μεταφορά του CO_2 γίνεται από το σύστημα των πόρων στον σκληρημένο τσιμεντοπολτό

Από τις υδατούχες ενώσεις του τσιμεντοπολτού, αυτή που αντιδρά πιο γρήγορα με το CO_2 είναι το Ca(OH)_2 , το αποτέλεσμα των οποίων είναι το CaCO_3 , αλλά και άλλες ενώσεις αντιδρούν με το CO_2 όπως διοξείδιο του πυριτίου, οξείδιο του αργιλίου και παράγεται οξείδιο του σιδήρου. Θεωρητικά μία πλήρη αποσύνθεση των ενώσεων του ασβεστίου στο ενυδατωμένο τσιμέντο είναι χημικά δυνατή ακόμη και στις χαμηλές συγκεντρώσεις CO_2 σε κανονικές συνθήκες ατμόσφαιρας, αλλά αυτό στην πράξη δεν είναι πρόβλημα. Μόνο στα τσιμέντα Portland μας απασχολεί η ενανθράκωση του Ca(OH)_2 . Όταν, όμως, το Ca(OH)_2 μειώνεται, για παράδειγμα με δευτερεύουσες αντιδράσεις με ποζολανικό διοξείδιο του πυριτίου, η ενανθράκωση του ένυδρου πυριτικού ασβεστίου, C-S-H, είναι δυνατή. Όταν συμβαίνει αυτό, όχι μόνο παράγεται περισσότερο CaCO_3 , αλλά και τοπήγμα πυριτίου που σχηματίζεται ταυτόχρονα έχει μεγάλους πόρους, μεγαλύτερους από 100 nm, κάτι που διευκολύνει την περαιτέρω ενανθράκωση. Η ενανθράκωση του C-S-H εξετάζεται παρακάτω σε σχέση με την ενανθράκωση σκυροδεμάτων που γίνονται με διάφορα αναμείγματα τσιμεντών.[7]

Αποτελέσματα ενανθράκωσης

Η ενανθράκωση δεν προκαλεί διάβρωση αλλά έχει σημαντικά αποτελέσματα. Ένα από αυτά είναι η συστολή ενανθράκωσης. Όσο αφορά την ανθεκτικότητα, η σημασία της ενανθράκωσης βρίσκεται στο γεγονός ότι μειώνει το pH του νερού των πόρων στο σκληρυμένο τσιμεντοπολτό Portland από 12,6 με 13,5 σε περίπου 9. Όταν όλο το Ca(OH)_2 έχει ενανθρακωθεί η τιμή του pH μειώνεται μέχρι το 8,3. Η σημασία της μείωσης του pH αναλύεται παρακάτω.

Ο οπλισμός σε ένα σκληρημένο τσιμεντοπολτό δημιουργεί γρήγορα ένα λεπτό στρώμα από οξείδιο το οποίο κολλάει δυνατά στον οπλισμό και το προστατεύει απόλυτα από αντιδράσεις με το οξυγόνο και το νερό, δηλαδή από τη δημιουργία σκουριάς και διάβρωσης. Αυτή η κατάσταση του οπλισμού είναι γνωστή σαν

παθητικότητα. Η διατήρηση της παθητικότητας οφείλεται στο αρκετά υψηλό pH του νερού των πόρων και στο λεπτό στρώμα που αναφέραμε προηγουμένως. Έτσι, όταν το στρώμα χαμηλού pH πλησιάσει την επιφάνεια του οπλισμού, το προστατευτικό στρώμα οξειδίου αφαιρείται και ξεκινάει η διάβρωση, με την προϋπόθεση όμως ότι υπάρχει το απαραίτητο οξυγόνο και υγρασία.

Για αυτό το λόγο, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε το βάθος της ενανθράκωσης και ειδικά αν το μέτωπο της ενανθράκωσης έχει φτάσει στην επιφάνεια του οπλισμού. Στην πραγματικότητα, λόγω της ύπαρξης των αδρανών που έχουν ανώμαλη επιφάνεια, το μέτωπο αυτό δεν προχωρά σαν μια ευθεία γραμμή. Επίσης, η ύπαρξη ρωγμών βοηθάει την είσοδο CO₂ έτσι το μέτωπο της ενανθράκωσης μπορεί να προχωράει τοπικά από τις ρωγμές. Σε πολλές περιπτώσεις μπορεί να πραγματοποιηθεί διάβρωση, ακόμα και αν το κυρίως στρώμα ενανθράκωσης είναι πολύ κοντά στην εξωτερική επιφάνεια, από μερική ενανθράκωση.

Βαθμός ενανθράκωσης

Η ενανθράκωση ξεκινά προοδευτικά από την εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος που εκτίθεται στο CO₂ αλλά ο ρυθμός της μειώνεται γιατί το CO₂ πρέπει να διαχυθεί μέσα στους πόρους και την ήδη ενανθρακωμένη επιφάνεια του σκυροδέματος. Αυτή η διάχυση είναι μια αργή διαδικασία αν οι πόροι του ενυδατωμένου τσιμεντοπολτού είναι γεμάτοι με νερό γιατί η διάχυση του CO₂ στο νερό είναι 4 τάξεις μεγέθους βραδύτερη απ' ό,τι στον αέρα. Από την άλλη μεριά, αν δεν υπάρχει αρκετό νερό στους πόρους, το CO₂ παραμένει σε αέρια μορφή και έτσι δεν αντιδρά με το ενυδατομένο τσιμέντο. Βλέπουμε λοιπόν ότι ο βαθμός ενανθράκωσης εξαρτάται από την υγρασία του σκυροδέματος, η οποία διαφέρει ανάλογα με την απόσταση από την εξωτερική επιφάνεια. Λόγω αυτής της διαφοράς, ο βαθμός της μεταφοράς του CO₂ στο μέτωπο της ενανθράκωσης του σκυροδέματος δεν μπορεί να προσδιοριστεί από την εξίσωση της διάχυσης.

Ο υψηλότερος βαθμός ενανθράκωσης επιτυγχάνεται όταν η σχετική υγρασία είναι 50 - 70 %. Σε ένα τυπικό εργαστήριο η υγρασία είναι 65 %, ενώ στην νότια Αγγλία η μέση σχετική υγρασία στο ύπαιθρο το χειμώνα φτάνει το 86 % και το 73 % το καλοκαίρι.

Κάτω από σταθερές υδρομετρικές συνθήκες, το βάθος της ενανθράκωσης αυξάνεται ανάλογα με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου, κάτι που είναι χαρακτηριστικό της απορρόφησης παρά της διάχυσης. Η ενανθράκωση όμως είναι φαινόμενο που περιλαμβάνει ταυτόχρονη δράση του CO₂ και του συστήματος των πόρων. Είναι έτσι δυνατόν να εκφραστεί το βάθος της ενανθράκωσης, D , σε χιλιοστά ως:

$$D = K \cdot t^{0,5}$$

όπου: K = ο συντελεστής ενανθράκωσης σε mm/έτος^{0,5}, και

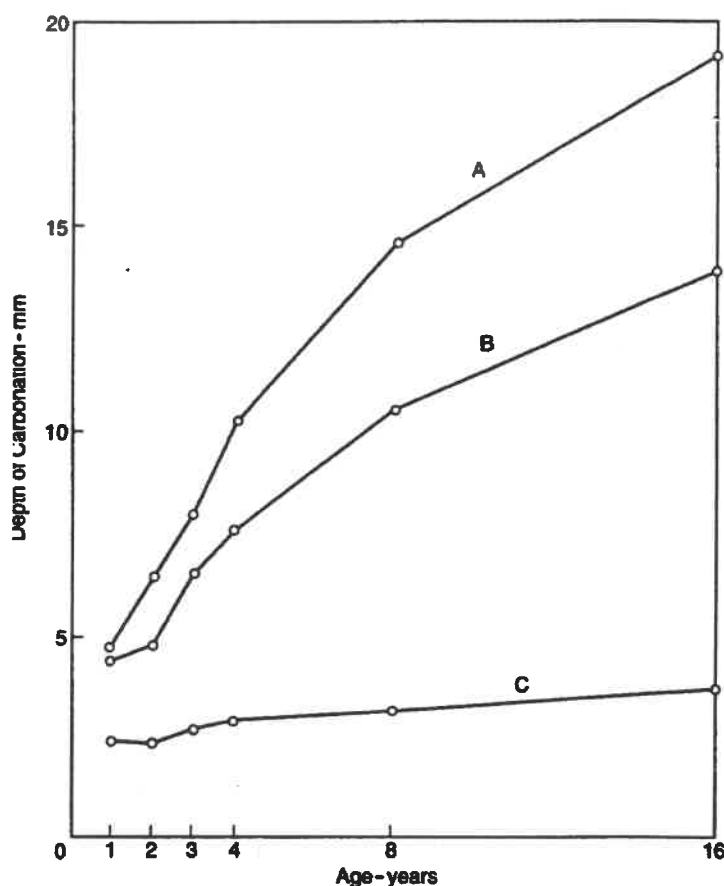
t = ο χρόνος έκθεσης σε έτη.

Οι τιμές του K είναι συχνά μεγαλύτεροι από 3 ή 4 mm/έτος^{0,5} για χαμηλής αντοχής σκυρόδεμα. Άλλος ένας τρόπος να δώσουμε μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα είναι να αναφέρουμε ότι για σκυρόδεμα με λόγο νερό/τσιμέντο 0,60, βάθος ενανθράκωσης 15 mm έχουμε μετά από 15 έτη, αλλά για λόγο 0,45 χρειάζονται 100 έτη. Ένα παράδειγμα της προόδου της ενανθράκωσης για μια περίοδο 16 χρόνων φαίνεται στο σχήμα 4.5 (σχήμα Neville).

Η έκφραση που χρησιμοποιεί την τετραγωνική ρίζα του χρόνου δεν μπορεί να εφαρμοστεί όταν οι συνθήκες έκθεσης δεν είναι σταθερές. Ειδικότερα, αν η επιφάνεια του σκυροδέματος εκτίθεται σε διάφορες συνθήκες υγρασίας, με περιοδικό βρέξιμο, ο βαθμός ενανθράκωσης μειώνεται λόγω της μείωσης της διάχυσης του CO₂ μέσα στους διαβρεγμένους πόρους στον σκληρυμένο τσιμεντοπολτό. Αντίθετα, καλυμμένα μέρη μιας κατασκευής υφίστανται ενανθράκωση με ταχύτερο ρυθμό από μέρη που είναι εκτεθειμένα στη βροχή, η οποία μειώνει σημαντικά την πρόοδο της ενανθράκωσης. Στο εσωτερικό κτιρίων, ο βαθμός ενανθράκωσης μπορεί να είναι υψηλός, αλλά δεν υπάρχουν σοβαρές επιπτώσεις όσο αφορά την διάβρωση του οπλισμού εκτός και αν το ενανθρακωμένο σκυρόδεμα είναι υγρό. Αυτό μπορεί να συμβεί αν νερό διαπεράσει την επένδυση ενός κτιρίου τόσο ώστε να φτάσει την ενανθρακωμένη ζώνη.

Η μεγάλη επιροή που έχει η υγρασία του σκυροδέματος στην ενανθράκωση σημαίνει ότι, ακόμα και σε κτίριο που είναι κατασκευασμένο όλο από το ίδιο

σκυρόδεμα, μπορεί να υπάρχουν σημαντικές διαφορές στο βάθος της ενανθράκωσης σε μία συγκεκριμένη ηλικία. Τοίχοι που εκτίθενται περισσότερο στη βροχή θα έχουν μικρότερο βάθος ενανθράκωσης όπως και κεκλιμένες επιφάνειες όπου κυλάει το νερό της βροχής και τοίχοι που στεγνώνουν μετά από πολύωρη έκθεση στον ήλιο. Συνολικά το μεγαλύτερο βάθος ενανθράκωσης μπορεί είναι 50 % περισσότερο από το μικρότερο βάθος.



Progress of carbonation with time of exposure under different conditions: (A) 20°C and 65 per cent relative humidity; (B) outdoors, protected by a roof; (C) horizontal surface outdoors in Germany. The values are averages for concretes with water/cement ratios of 0.45, 0.60, and 0.80, wet-cured for 7 days

Σχ. 4.5 Πρόοδος της ενανθράκωσης ανάλογα με τον χρόνο έκθεσης κάτω από διάφορες συνθήκες: α) 20°C και 65% RH, β) σε εξωτερικό περιβάλλον, προστατευμένο από οροφή, γ) οριζόντια επιφάνεια σε εξωτερικό περιβάλλον στην Γερμανία. Οι τιμές είναι οι μέσοι όροι για σκυροδέματα με λόγο N/T 0,45, 0,60, 0,80 σε υγρή συντήρηση για 7 ημέρες.

Η μεγάλη επιρροή που έχει η υγρασία του σκυροδέματος στην ενανθράκωση σημαίνει ότι, ακόμα και σε κτίριο που είναι κατασκευασμένο όλο από το ίδιο σκυρόδεμα, μπορεί να υπάρχουν σημαντικές διαφορές στο βάθος της

ενανθράκωσης σε μία συγκεκριμένη ηλικία. Τοίχοι που εκτίθενται περισσότερο στη βροχή θα έχουν μικρότερο βάθος ενανθράκωσης όπως και κεκλιμένες επιφάνειες όπου κυλάει το νερό της βροχής και τοίχοι που στεγνώνουν μετά από πολύωρη έκθεση στον ήλιο. Συνολικά το μεγαλύτερο βάθος ενανθράκωσης μπορεί είναι 50 % περισσότερο από το μικρότερο βάθος.

Παράγοντες που επηρεάζουν την ενανθράκωση

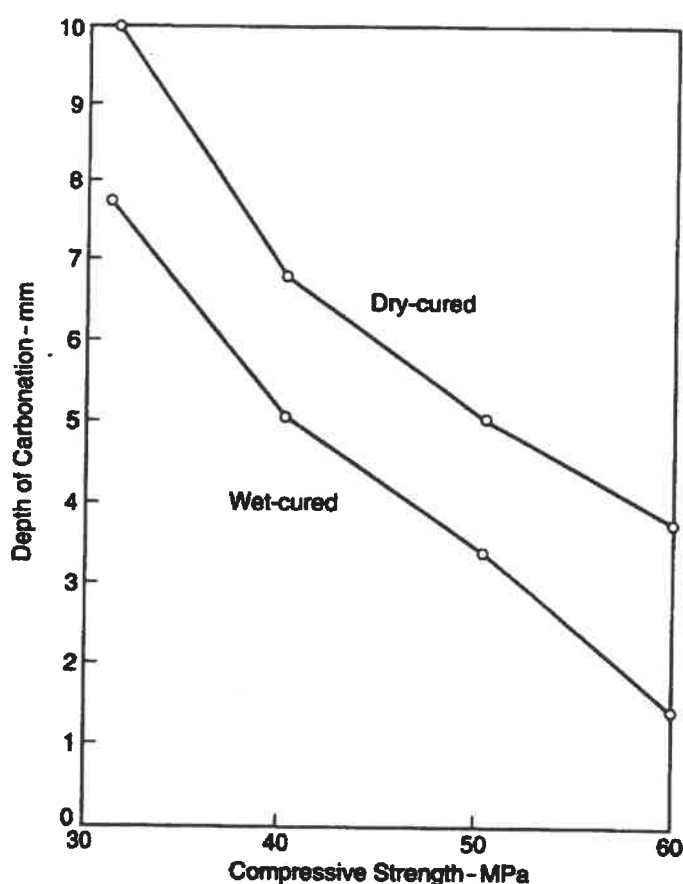
Ο κυριώτερος παράγοντας που ελέγχει την ενανθράκωση είναι η διάχυση στον σκληρυμένο τσιμεντοπολτό. Η διάχυση είναι μια λειτουργία του πορώδους συστήματος του τσιμεντοπολτού που πραγματοποιείται όταν διαχέεται σε αυτό CO_2 . Επίσης σημαντικοί παράγοντες είναι και ο τύπος του τσιμέντου, ο λόγος νερό/τσιμέντο, και ο βαθμός ενυδάτωσης. Όλα τα παραπάνω επηρεάζουν και την αντοχή του σκυροδέματος γι' αυτό και λέγεται συχνά ότι ο βαθμός ενανθράκωσης είναι μια λειτουργία της αντοχής του σκυροδέματος, κάτι που είναι μια ανεπαρκής απλοποίηση.

Εναλλακτικές λύσεις για την χρησιμοποίηση της αντοχής σαν μια παράμετρο περιλαμβάνουν εκφράσεις ενανθράκωσης ως συνάρτηση του λόγου νερό/τσιμέντο ή της περιεκτικότητας τσιμέντου. Όμως δεν υπάρχει από φυσικής άποψης βάση για τον υπολογισμό της περιεκτικότητας του τσιμέντου· όσο αφορά το λόγο νερό/τσιμέντο, μια τέτοια προσέγγιση δεν είναι καλύτερη από την χρησιμοποίηση της αντοχής σαν μια παράμετρο. Πράγματι, ούτε η αντοχή, ούτε ο λόγος νερό/τσιμέντο δίνουν πληροφορίες για την μικροδομή του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού στην ζώνη της επιφάνειας που γίνεται η διάχυση του CO_2 . Ένας παράγοντας που επηρεάζει πολύ σημαντικά είναι η συντήρηση της εξωτερικής επιφάνειας του σκυροδέματος καθόλη τη διάρκεια ζωής.

Το αποτέλεσμα της συντήρησης στην ενανθράκωση είναι ουσιώδες. Στο παρακάτω σχήμα 4.6 φαίνεται το βάθος της ενανθράκωσης σκυροδέματος ηλικίας 28 ημερών και αντοχής μεταξύ 30 και 60 MPa: α)σε υγρή συντήρηση για 28 ημέρες και β)σε συντήρηση στον αέρα με σχετική υγρασία 65 %. Μετά απ' αυτό όλα τα δοκίμια φυλάσσονται για δύο χρόνια στους 20°C και σε σχετική

υγρασία 65%. Πρέπει να επισημάνουμε το επιζήμιο αποτέλεσμα που έχει η έλλειψη υγρής συντήρησης η οποία έχει σαν συνέπεια τη δημιουργία υψηλού πορώδους. Ερευνητές παρατήρησαν πως αυξάνοντας την περίοδο της υγρής συντήρησης από 1 σε 3 ημέρες το βάθος της ενανθράκωσης μειώνεται κατά 40%.

Ας σημειωθεί όμως ότι η έκθεση του σκυροδέματος στο περιβάλλον, σε διάφορα μέρη του κόσμου, μπορεί να περιλαμβάνει συχνές ή παρατεταμένες περιόδους υψηλής υγρασίας και έτσι η ενυδάτωση του τσιμέντου συνεχίζεται με αποτέλεσμα να καθυστερεί η φυσική περίοδος συντήρησης της εξωτερικής επιφάνειας. Γενικά, η απουσία της αρχικής συντήρησης στην ενανθράκωση έχει απότελέσματα που επηρεάζουν την μικροδομή του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού στην εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος, κάτι που διευκολύνει την διάχυση του CO_2 .



Relation between the depth of carbonation and compressive strength of concrete after 2 years' exposure in air at a relative humidity of 65 per cent

Σχ. 4.6 Σχέση μεταξύ του βάθους ενανθράκωσης και της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος μετά από 2 χρόνια έκθεσης σε αέρα με σχετική υγρασία 65%.

Έχει, επίσης, βρεθεί ότι, σε συνεχή ενανθράκωση, σκυρόδεμα με αντοχή μικρότερη από 30MPa (4000 psi) είναι πολύ πιθανό η ενανθράκωση να έχει προχωρήσει τουλάχιστον κατά 15mm σε μια περίοδο ορισμένων χρόνων.

Πρέπει, λοιπόν, να διασφαλίζουμε πως το βάθος της ενανθράκωσης που αναμένουμε στην διάρκεια ζωής της κατασκευής να είναι μικρότερο από την επικάλυψη του οπλισμού. Βλέπουμε, δηλαδή, ότι το απαραίτητο βάθος επικάλυψης και η ποιότητα του σκυροδέματος αλληλοσυνδέονται και όσο αφορά την προστασία του οπλισμού, πρέπει να επιλέγονται και τα δύο μαζί στη φάση του σχεδιασμού.

Ενανθράκωση σκυροδεμάτων που περιέχουν σύνθετα τσιμέντων

Λόγο του ότι στις μέρες μας χρησιμοποιούνται ευρέως σύνθετα τσιμέντων, είναι σημαντικό να γνωρίζουμε την συμπεριφορά σκυροδεμάτων που περιέχουν ιπτάμενη τέφρα και σκωρία υφικαμίνου. Έχουν δημοσιευθεί πολλές μελέτες που συγκρίνουν διάφορες δοκιμές ενανθράκωσης σε σκυροδέματα με ή χωρίς αυτά τα υλικά, αλλά έγιναν συγκρίσεις πάνω σε διάφορες βάσεις. Τέτοια δεδομένα δεν βοηθούν ώστε να γίνουν γενικεύσεις και αυτό που είναι σημαντικό είναι όταν επιλέγονται τέτοια μείγματα σκυροδεμάτων να εκτιμούνται τα χαρακτηριστικά ενανθράκωσης του συγκεκριμένου μείγματος

Η αρχή στην εκτίμηση αυτών των χαρακτηριστικών είναι η γνώση της μικροδομής και άλλων ιδιοτήτων του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού που είναι αποτέλεσμα της χρήσης των διάφορων υλικών που προαναφέραμε και των οποίων οι ιδιότητες επηρεάζουν την ενανθράκωση. Εδώ πρέπει να κάνουμε δύο παρατηρήσεις: πρώτον, η άργιλος στην ιπτάμενη τέφρα αντιδρά με το Ca(OH)_2 που είναι αποτέλεσμα της ενυδάτωσης του τσιμέντου Portland. Κατά συνέπεια, το κράμα του σκυροδέματος οδηγεί σε μικρή συγκέντρωση Ca(OH)_2 στον σκληρυμένο τσιμεντοπολτό και έτσι απαιτείται λιγότερη ποσότητα CO_2 για την αφαίρεση όλου του Ca(OH)_2 και την παραγωγή CaCO_3 . Ο Bier απέδειξε ότι το βάθος της ενανθράκωσης είναι μεγαλύτερο όταν η ποσότητα του Ca(OH)_2 είναι μικρή. Κατά συνέπεια η ύπαρξη ιπτάμενης τέφρας έχει σαν αποτέλεσμα την πιο γρήγορη

ενανθράκωση. Υπάρχει όμως και άλλο ένα αποτέλεσμα της αντίδρασης μεταξύ της ποζολανικής αργίλου και του $\text{Ca}(\text{OH})_2$, που καταλήγει σε πυκνότερη δομή του τσιμεντοπολτού ώστε η διάχυση να μειώνεται και να επιβραδύνεται η ενανθράκωση.

Το ερώτημα που γεννάται είναι: ποιό είναι το κυριώτερο αποτέλεσμα; Ένας σημαντικός παράγοντας που μπορεί να μας βοηθήσει να απαντήσουμε είναι η συντήρηση. Η καλή συντήρηση είναι απαραίτητη για να συντελεστούν οι ποζολανικές αντιδράσεις. Επίσης έχουν γίνει και δοκιμές με συντήρηση 1 ημέρας σε σκυρόδεμα με ιπτάμενη τέφρα. Οι δοκιμές δείχνουν ότι ένα τέτοιο σκυρόδεμα παρουσιάζει υψηλή ενανθράκωση είναι όμως και κακής ποιότητας. Τα αποτελέσματα της συντήρησης στην ενανθράκωση σκυροδέματος που περιέχει ιπτάμενη τέφρα παραμένουν ακόμα και μετά από αρκετό χρονικό διάστημα. Από την άλλη μεριά, σκυροδέματα με τσιμέντο με ιπτάμενη τέφρα μέχρι 30 % και με αντοχή μεγαλύτερη από 35 MPa (5000 psi) δεν έδειξαν κάποια αύξηση, ή μια πολύ μικρή αύξηση στην ενανθράκωση όταν στο μείγμα περιλαμβάνεται ιπτάμενη τέφρα.

Η χρησιμοποίηση σκωρίας υψικαμίνου στο ανάμειγμα του σκυροδέματος δημιουργεί την ανάγκη για ακόμη καλύτερη συντήρηση. Κατά συνέπεια, κακώς συντηρημένο σκυρόδεμα που περιέχει σκωρία παρουσιάζει πολύ μεγάλη ενανθράκωση· έχουν αναφερθεί βάθη από 10 ως 20 mm μετά από έκθεση ενός χρόνου. Μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε σκωρία έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερα βάθη ενανθράκωσης. Όταν όμως η περιεκτικότητα σε σκωρία υψικαμίνου του αναμείγματος είναι κάτω από 50% και το σκυρόδεμα εκτίθεται σε CO_2 συγκέντρωσης 0,03 %, η αύξηση της ενανθράκωσης είναι πολύ μικρή.

Λόγω της χρήσης φύλλερ στα νέου τύπου τσιμέντα είναι χρήσιμο να αναφέρουμε ότι δεν επηρεάζουν καθόλου την μικροδομή του σκληρημένου τσιμεντοπολτού και κατά συνέπεια ούτε και την ενανθράκωση.

Τσιμέντα με παράγοντες ανθεκτικούς στα θειικά άλατα παρουσιάζουν βάθος ενανθράκωσης 50 % μεγαλύτερο από αυτό που παρουσιάζουν τσιμέντα Portland. Γι' αυτό το λόγο μπορεί να χρειαστεί αυξημένη επικάλυψη για τον οπλισμό όταν

χρησιμοποιούνται τέτοια τσιμέντα. Επίσης, η ενανθράκωση αυξάνεται όταν το σκυρόδεμα περιέχει **regulated set** τσιμέντο.

Ενανθράκωση παρουσιάζουν και σκυροδέματα με τσιμέντο υψηλής περιεκτικότητας σε άργιλο, όμως επειδή η ενυδάτωση ενός τέτοιου τσιμέντου δεν παράγει $\text{Ca}(\text{OH})_2$ αυτό που αντιδρά με το CO_2 είναι το αργιλικό ασβέστιο CAH και το CAH . Τα τελικά προϊόντα είναι το CaCO_3 και αργιλικό πήκτωμα.

Η ενανθράκωση του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού υψηλής περιεκτικότητας σε αργίλιο μπορεί να οδηγήσει σε καταστροφή του προστατευτικού στρώματος του οπλισμού, ο οποίος είναι σε επαφή με το νερό των πόρων με pH χαμηλότερο από αυτό του τσιμέντου Portland, περίπου ανάμεσα στο 11,4 και 11,8. Ο βαθμός ενανθράκωσης τσιμεντοπολτού υψηλής περιεκτικότητας σε αργίλιο που έχει υποστεί μετατροπή είναι πολύ μεγαλύτερος απ' ό,τι πριν τη μετατροπή.[7]

Μετρήσεις ενανθράκωσης

Οι εργαστηριακές τεχνικές που μπορούν να προσδιορίσουν το βάθος της ενανθράκωσης περιλαμβάνουν χημικές αναλύσεις, διάθλαση ακτίνων Χ, υπέρυθρη φασματοσκοπία και θερμοσταθμική ανάλυση. Μια συνηθισμένη και απλή μέθοδος υπολογισμού της έκτασης της ενανθράκωσης είναι ο ψεκασμός με διάλυμα φαινολοφθαλεΐνης σε αλκοόλη της επιφάνειας που έχει προκύψει από διάρυξη ενός δοκιμίου. Το ελεύθερο $\text{Ca}(\text{OH})_2$ χρωματίζεται μωβ-κόκκινο ενώ το ενανθρακωμένο τμήμα παραμένει στο φυσικό γκρι χρώμα. Με την πρόοδο της ενανθράκωσης της επιφάνειας που έχει μόλις εκτεθεί, το μωβ-κόκκινο σταδιακά εξαφανίζεται. Η διαδικασία περιγράφεται από την RILEM [9]. Η δοκιμή είναι αρκετά εύκολο να πραγματοποιηθεί και είναι γρήγορη αλλά πρέπει να θυμόμαστε ότι το μωβ-κόκκινο χρώμα προδίδει την παρουσία $\text{Ca}(\text{OH})_2$ όχι όμως υποχρεωτικά και την απουσία ενανθράκωσης. Πράγματι, η δοκιμή της φαινολοφθαλεΐνης δίνει μια μέτρηση του pH (το μωβ-κόκκινο χρώμα δηλώνει τιμή πάνω από 9,5) αλλά δεν διαχωρίζει ανάμεσα σε ένα χαμηλό pH που οφείλεται σε ενανθράκωση ή από άλλα όξινα αέρια. Όσο αφορά στον κίνδυνο της διάβρωσης του οπλισμού, μπορεί οι επιπτώσεις ενός χαμηλού pH να μην είναι σημαντικές, χρειάζεται όμως προσοχή όταν ερμηνεύουμε το χρωματικό αποτέλεσμα.

Η δοκιμή της φαινολοφθαλεΐνης δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί σε τσιμέντο υψηλής περιεκτικότητας σε αργίλιο γιατί, αντίθετα με το τσιμέντο Portland, δεν περιέχει ελεύθερη άσβεστο.

Αν δεν είναι δυνατή η θραύση των δοκιμίων, μπορούμε να πάρουμε δείγμα σκόνης του σκυροδέματος με τρυπάνι που προοδευτικά θα διεισδύει και σε μεγαλύτερα βάθη. Τα δείγματα σκόνης ψεκάζονται στη συνέχεια με φαινολοφθαλεΐνη και συνεχίζουμε όπως και στην προηγούμενη δοκιμή. Ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί έτσι ώστε να μην αναμείξουμε ελεύθερη άσβεστο από το μη ενανθρακωμένο τμήμα του σκυροδέματος, με αποτέλεσμα να χρωματιστεί όλο το δείγμα και να δίνει την εντύπωση απουσίας ενανθράκωσης.

Για να προσδιορίσουμε πόσο γρήγορα ένα σκυρόδεμα μπορεί να ενανθρακωθεί μπορούμε να πραγματοποιήσουμε μια επιταχυνόμενη δοκιμή. Μια τέτοια δοκιμή περιλαμβάνει την έκθεση του δείγματος σε συγκεντρωμένο CO_2 ποσοστού c_s επί τις εκατό. Το βάθος της ενανθράκωσης μετά από ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα έκθεσης t_t , μπορεί να βρεθεί από τον χρόνο t_s , που έχει επιτευχθεί το ίδιο βάθος ενανθράκωσης υπό συγκέντρωση CO_2 c_s τις εκατό, βασιζόμενοι στο γεγονός ότι ο χρόνος είναι αντιστρόφως ανάλογος της συγκέντρωσης του CO_2 :

$$t_t : t_s = c_s : 100$$

Στην ελβετική μέθοδο η συγκέντρωση του CO_2 είναι 100%· συνήθως η συγκέντρωση είναι 4-5%. Για να πραγματοποιηθεί η ενανθράκωση η σχετική υγρασία πρέπει να είναι 60-70 %.

Για την ερμηνεία των επιταχυνόμενων δοκιμών χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή, όχι μόνο γιατί η επί-τόπου ενανθράκωση επηρεάζεται από τις συνθήκες έκθεσης, ειδικά από τη διάβροχη από τη βροχή και την ξήρανση από τον ήλιο και τον αέρα, αλλά και επειδή η υψηλή περιεκτικότητα σε CO_2 αντιστρέφει τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα. Για παράδειγμα, ο Bier χρησιμοποιώντας μια συγκέντρωση CO_2 2%, βρήκε ότι το βάθος της ενανθράκωσης ενός καλά συντηρημένου σκυροδέματος που περιέχει ιπτάμενη τέφρα ή σκωρία υψικαμίνου είναι περίπου διπλάσιο απ' ό,τι όταν το σκυρόδεμα περιέχει τσιμέντο Portland. Η αύξηση αυτή δεν παρουσιαζόταν όταν η συγκέντρωση του CO_2 ήταν 0,03 % και η

περιεκτικότητα σε ιπτάμενη τέφρα ήταν κάτω από 30 % ή σε σκωρία υψικαμίνου κάτω από 50 %. Μια πιθανή εξήγηση αυτής της διαφοράς στη συμπεριφορά είναι το γεγονός ότι, σε υψηλή συγκέντρωση CO_2 , η ενανθράκωση του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ακολουθείται από την ενανθράκωση του C-S-H.

Έχει παρατηρηθεί εκτεταμένη ενανθράκωση του C-S-H του σκυροδέματος από τους Kobayashi et al., όμως δεν υπάρχουν πληροφορίες για τον τύπο του τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκε.

Άλλες πλευρές της ενανθράκωσης

Η ενανθράκωση μπορεί να έχει και θετικά αποτελέσματα. Επειδή το CaCO_3 καταλαμβάνει μεγαλύτερο όγκο από το $\text{Ca}(\text{OH})_2$ που αντικαθιστά, το πορώδες του ενανθρακωμένου σκυροδέματος μειώνεται. Επιπλέον, το νερό που ελευθερώνεται από το $\text{Ca}(\text{OH})_2$ κατά την ενανθράκωση μπορεί να βοηθήσει στην ενυδάτωση του μέχρι τότε μη ενυδατωμένου τσιμέντου. Αυτές οι αλλαγές είναι ευεργετικές και έχουν ως αποτέλεσμα την αυξημένη επιφανειακή σκληρότητα, αυξημένη αντοχή στην επιφάνεια, μειωμένη επιφανειακή περατότητα, μειωμένη κινητικότητα της υγρασίας και αυξημένη ανθεκτικότητα στους τύπους προσβολής που ελέγχονται από την περατότητα. Από την άλλη, επιταχύνει την διάβρωση του οπλισμού που οφείλεται στα χλωρίδια.

Αντίθετα από τα σκυροδέματα με τσιμέντο Portland, εκείνα με υπερθειούχα τσιμέντα παρουσιάζουν κατά την ενανθράκωση μια μείωση της αντοχής, η οποία όμως, επειδή πραγματοποιείται μόνο στην εξωτερική επιφάνεια του σκυροδέματος, δεν είναι πολύ σημαντική από την άποψη της δομής.

Λόγω του ότι η ενανθράκωση επηρεάζει το πορώδες όπως και το μέγεθος των πόρων (μειώνοντας τον όγκο των πόρων, ειδικά των μικρών) της εξωτερικής ζώνης του σκυροδέματος, η διείσδυση του χρώματος στο σκυρόδεμα διαφέρει. Κατά συνέπεια και επειδή το χρώμα εξαρτάται από τη σχετική υγρασία μπορούμε να δούμε γιατί οι διαφορές στην ποιότητα του χρώματος μπορεί να μας απασχολήσουν.

Οι Sakuta et al. έχουν προτείνει τη χρήση πρόσθετων που απορροφούν το διοξείδιο του άνθρακα που διεισδύει στο σκυρόδεμα και έτσι προλαμβάνουν την ενανθράκωση.[10]

4.4. Η κατάσταση του χάλυβα μέσα στο σκυρόδεμα

Το σκυρόδεμα παρέχει στο χάλυβα προστασία έναντι διάβρωσης, την ονομαζόμενη “παθητική” προστασία. Αιτία είναι η αλκαλικότητα του σκυροδέματος εξαιτίας του υδροξειδίου του ασβεστίου Ca(OH)_2 υποπροϊόντος της ενυδατώσεως του τσιμέντου. Έτσι για μεγάλες τιμές του pH (από 9-12,8) σχηματίζεται στην επιφάνεια του μετάλλου ένα πολύ λεπτό και σφιχτά προσκολλημένο στρώμα οξειδίων του σιδήρου. Το στρώμα οξειδίων σχηματίζεται μόνο σε καθαρή επιφάνεια του μετάλλου. Όσο υπάρχει το προστατευτικό στρώμα, δεν θα συμβεί διάβρωση του χάλυβα, ακόμα και αν υπάρχουν οι παράγοντες οι οποίοι απαιτούνται για την εξέλιξη του φαινομένου της διάβρωσης. Διάβρωση του χάλυβα επισημαίνεται σε διάφορες περιπτώσεις, όπως :

- Το σκυρόδεμα είναι κακής ποιότητας και παύει να παρέχει παθητική προστασία στον χάλυβα.
- Το περιβάλλον δεν ήταν το αναμενόμενο ή άλλαξε κατά τη διάρκεια χρήσεως της κατασκευής.
- Ο χάλυβας έρχεται σε επαφή με υλικά τα οποία δεν παρουσιάζουν αλκαλικότητα. Τα υλικά αυτά είναι πιθανόν να είναι μέρος της κατασκευής ή να έρθουν σε επαφή με τον χάλυβα μετά από τυχόν ρηγμάτωση του σκυροδέματος.
- Ο χάλυβας έχει κατασκευαστικές ατέλειες ή είναι εξαιρετικά ευαίσθητος ή έρχεται σε επαφή με άλλα μέταλλα.

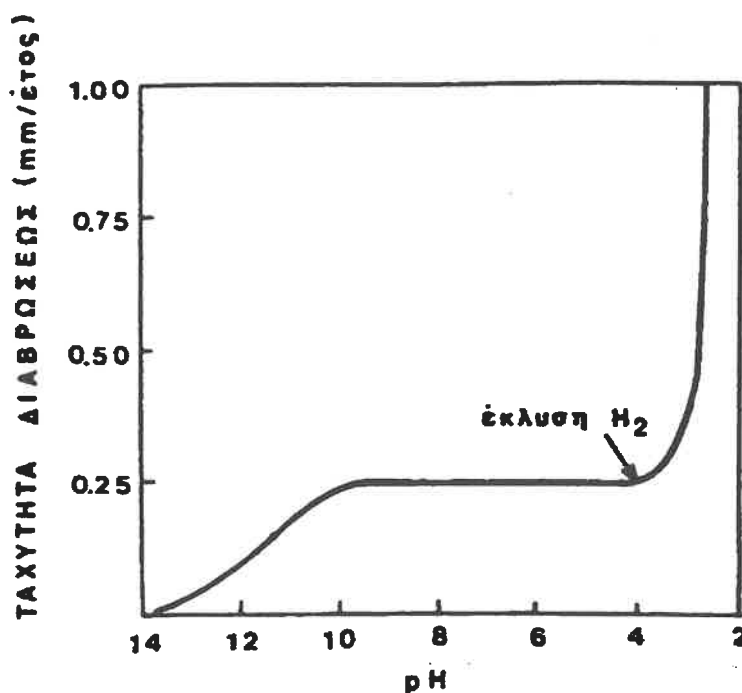
Ο τρόπος με τον οποίο διαβρώνεται ο χάλυβας ποικίλει σημαντικά, ανάλογα με την αιτία που προκαλεί τη διάβρωση. Αν θέλουμε να κατατάξουμε τις μορφές διαβρώσεως σε κατηγορίες, πρέπει να διακρίνουμε τις εξής περιπτώσεις :

- Γενική ή ομοιόμορφη διάβρωση

- Τοπική διάβρωση
 - ♦ Διάβρωση κατά βελονισμό (pitting)
 - ♦ Μικρορρηγματώδης διάβρωση (crevice)
 - ♦ Διάβρωση μεταξύ των κόκκων (intergranular)
- Διάβρωση λόγω αναπτύξεως εξωτερικής διαφοράς δυναμικού
 - ♦ Γαλβανική δράση (galvanic)
 - ♦ Ηλεκτρολυτική διάβρωση (electrolytic)
- Διάβρωση υπό μηχανική τάση (stress - corrosion).

4.4.1. Γενική ή ομοιόμορφη διάβρωση

Χαρακτηριστικό της γενικής διάβρωσης είναι ότι η επιφάνεια του μετάλλου καλύπτεται σχεδόν ομοιόμορφα από τα προϊόντα της διαβρώσεως. Η γενική διάβρωση πραγματοποιείται όταν η αλκαλικότητα του σκυροδέματος έχει χαθεί σε ευρεία περιοχή. Τότε το προστατευτικό στρώμα οξειδίων θα καταστραφεί και θα αρχίσει η διάβρωση.



Σχ. 4.7 Επίδραση της τιμής του pH στην ταχύτητα διάβρωσης σιδήρου σε αεριζόμενο μαλακό νερό υπό θερμοκρασία δωματίου.

Αιτία μείωσης του pH σε ευρεία περιοχή στο σκυρόδεμα είναι :

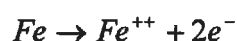
- ♦ Απόπλυση του $\text{Ca}(\text{OH})_2$ από το σκυρόδεμα λόγω επιδράσεως νερού
- ♦ Ενανθράκωση του σκυροδέματος
- ♦ Επίδραση ανθρακικών ή θειικών αλάτων (έχει παρατηρηθεί χωρίς όμως να έχει τεκμηριωθεί επαρκώς).

4.4.2. Μηχανισμός διάβρωσης του χάλυβα

Η διάβρωση του χάλυβα είναι ένα σύνθετο χημικό και ηλεκτροχημικό φαινόμενο. Η ευστάθεια του χάλυβα μέσα στο σκυρόδεμα εξαρτάται από το ηλεκτρικό δυναμικό από το pH και από τη θερμοκρασία του σκυροδέματος.

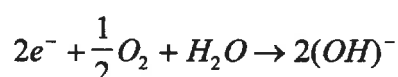
Το φαινόμενο της ηλεκτρολύσεως μπορεί να διακριθεί σε δύο απλές διαδικασίες : της ανόδου και της καθόδου. Για να μπορεί να γίνει ηλεκτρόλυση, η άνοδος και η κάθοδος πρέπει να συνδέονται μεταξύ τους ηλεκτρικά και ηλεκτρολυτικά. Η ράβδος του χάλυβα προσφέρει την ηλεκτρική σύνδεση, ενώ το νερό των πόρων του σκυροδέματος δρα ως ηλεκτρολύτης.

Ως άνοδος συμπεριφέρεται το τμήμα του χάλυβα όπου έχει καταστραφεί το προστατευτικό στρώμα οξειδίων. Σε αυτή την περιοχή τα άτομα σιδήρου μετετρέπονται σε ιόντα, ενώ ελευθερώνονται ηλεκτρόνια.

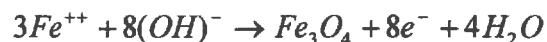


Το δυναμικό του αδιάβρωτου σιδήρου με κλίμακα αναφοράς την κλίμακα υδρογόνου είναι ίσο με $E_A = -440 \text{ mV}_H$. Στην άνοδο, το δυναμικό μικραίνει σημαντικά. Υπό την επίδραση αυτής της διαφοράς δυναμικού τα ηλεκτρόνια τα οποία ελευθερώνονται στην άνοδο μεταφέρονται προς την κάθοδο.

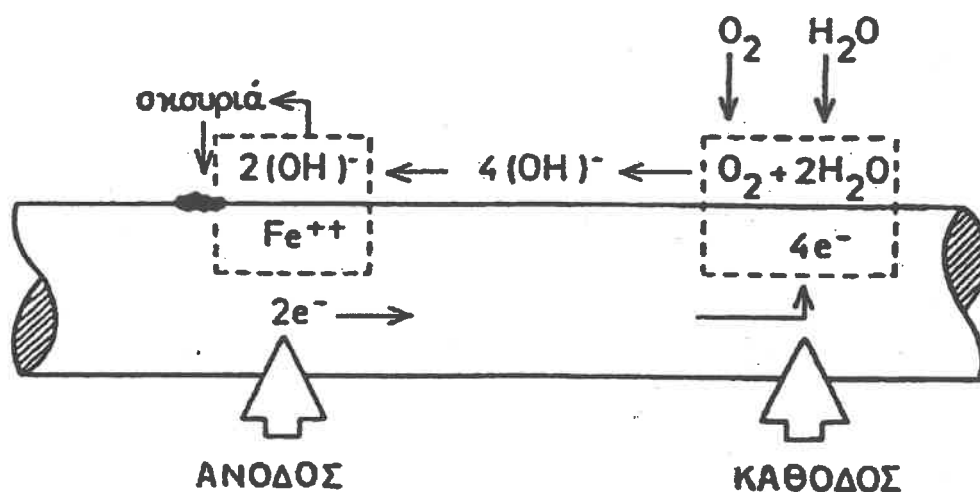
Ως κάθοδος συμπεριφέρεται εκείνη η περιοχή του χάλυβα όπου υπάρχει νερό και οξυγόνο, χωρίς να είναι απαραίτητο να έχει καταστραφεί το λεπτό στρώμα των οξειδίων. Σε αυτή τη περιοχή, ενώνονται τα ηλεκτρόνια με το νερό και το οξυγόνο, παράγονται δε ιόντα υδροξυλίου.



Το δυναμικό αυξάνεται και γίνεται ίσο με $E_x = +401mV_H$. Αν τα ιόντα υδροξυλίου κινηθούν μέσα στο νερό των πόρων από την περιοχή της καθόδου προς την περιοχή της ανόδου, θα ενωθούν με τα ιόντα του σιδήρου και θα σχηματίσουν σκουριά :



Με αυτήν την αντίδραση είναι δυνατόν να σχηματισθούν διάφορα οξείδια του σιδήρου, π.χ. FeO, Fe_2O_3 . Στο σκυρόδεμα σχηματίζεται FeO ή Fe_3O_4 . Αυτό συμβαίνει γιατί δεν επιτρέπεται μεγάλη διόγκωση του μετάλλου εξαιτίας της πίεσεως την οποία ασκεί το σκυρόδεμα. Τα οξείδια FeO και Fe_3O_4 έχουν μικρότερο όγκο από το οξείδιο του Fe_2O_3 .



Σχ. 4.8 Απλοποιημένο προσομοίωμα της ηλεκτροχημικής διαδικασίας διάβρωσης του σιδηροπλισμού.

Από τις αντιδράσεις οξειδώσεως φαίνεται ότι όσο νερό συνδυάζεται στην κάθοδο τόσο αποδίδεται μετά το σχηματισμό της σκουριάς. Επομένως, μόνο το οξυγόνο καταναλώνεται για την διάβρωση του χάλυβα, ενώ το νερό χρειάζεται απλώς για να βοηθήσει τη διαδικασία ηλεκτρολήσεως.

Είναι δυνατόν να πραγματοποιηθεί διάβρωση του χάλυβα και σε περιοχή όπου εμποδίζεται η πρόσβαση του οξυγόνου, αρκεί το σκυρόδεμα να είναι αρκετά υγρό ώστε να έχουμε το φαινόμενο της ηλεκτρόλησης.

4.4.3. Διάβρωση κατά βελονισμό

Η διάβρωση κατά βελονισμό οφείλεται αποκλειστικά στην επίδραση χλωριόντων. Τα ιόντα (Cl^-) μπορεί να βρεθούν στο σκυρόδεμα είτε εξ αρχής με την παρασκευή του, είτε να διεισδύσουν από το περιβάλλον αργότερα. Η διείσδυση γίνεται μέσω πόρων εξ' ολοκλήρου ή μερικώς γεμάτων με νερό.

Κατά τη διάρκεια της διαβροχής, μεγάλες ποσότητες νερού με διαλυμένα άλατα εισδύουν στο σκυρόδεμα. Κατά τη διάρκεια της ξηράνσεως, το νερό εξατμίζεται ενώ τα άλατα παραμένουν στο σκυρόδεμα. Όταν η διαδικασία αυτή επαναλαμβάνεται δημιουργούνται μεγάλες συγκεντρώσεις χλωριόντων στην περιοχή του σκυροδέματος που διαβρέχεται και ξηραίνεται.

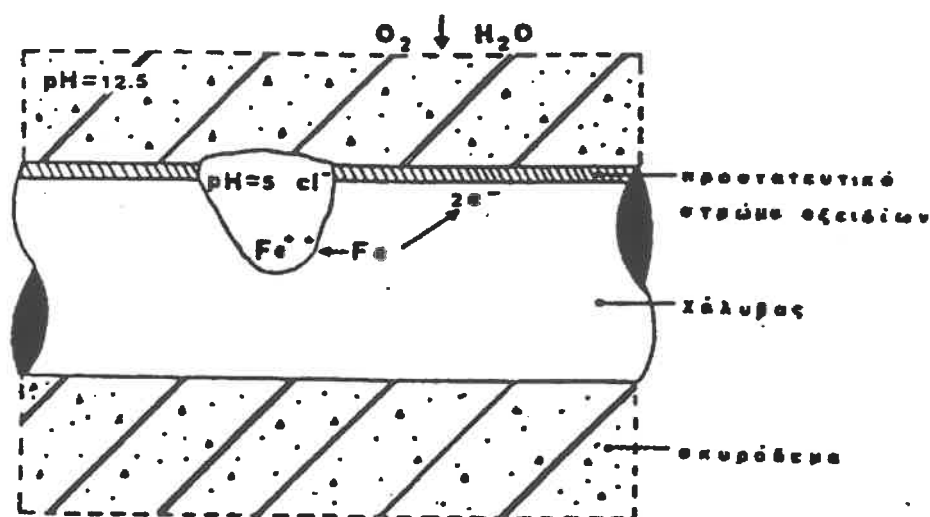
Από τα χλωριόντα που υπάρχουν στο σκυρόδεμα, μια ποσότητα δεσμεύεται χημικά από τον τσιμεντοπολτό, ενώ τα υπόλοιπα χλωριόντα παραμένουν ελεύθερα. Η διάβρωση του χάλυβα προκαλείται από τα ελεύθερα χλωριόντα.

Σε σκυρόδεμα που περιέχει χλωριόντα εξ' αρχής, ο χάλυβας διαβρώνεται λιγότερο απ' ότι αν ο χάλυβας βρισκόταν σε σκυρόδεμα στο οποίο η ίδια ποσότητα χλωριόντων διεισδύει απ' έξω. Μετά την ενανθράκωση, ο κίνδυνος διαβρώσεως των οπλισμών αυξάνεται, ακόμα και αν το σκυρόδεμα περιέχει μικρές ποσότητες χλωριόντων.

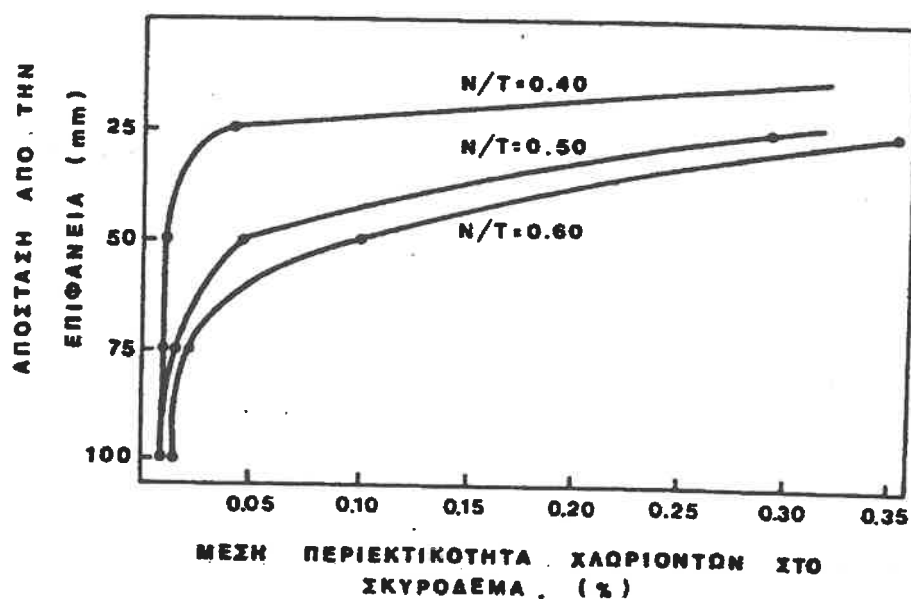
Η επικρατέστερη θεωρία που περιγράφει την επίδραση των χλωριόντων στην διάβρωση του χάλυβα, είναι η θεωρία του μεταβατικού συμπλόκου. Σύμφωνα με αυτή τα χλωριόντα μπορούν να διαπεράσουν το προστατευτικό στρώμα οξειδίων μέσα από τους πόρους του στρώματος με μεγαλύτερη ευκολία από άλλα ιόντα. Μπορούν ακόμα να διαλύσουν το στρώμα οξειδίων κάνοντας ευκολότερη τη διείσδυσή τους. Η επιφάνεια του καθαρού μετάλλου απορροφά τα χλωριόντα, το δε δυναμικό του χάλυβα σ' αυτή τη περιοχή μειώνεται πάρα πολύ (άνοδος) ενώ η παραπλήσιες περιοχές έχουν μεγάλο δυναμικό (κάθοδος).

Στις μικρές ανοδικές περιοχές, τα χλωριόντα ενώνονται με τα ιόντα σιδήρου για να σχηματίσουν ένα ευδιάλυτο σύμπλοκο μόριο χλωριούχου μετάλλου. Το

σύμπλοκο αυτό μόριο μπορεί να απομακρυνθεί από την άνοδο, να οξειδωθεί σε κάποια περιοχή (κάθοδος) και να ελευθερώσει το ιόν του χλωρίου. Το ελεύθερο ιόν του χλωρίου είναι μ' αυτό το τρόπο ικανό να επαναλάβει τη διαδικασία διαβρώσεως του σιδήρου.



Σχ. 4.9 Απλοποιημένο προσομοίωμα της ηλεκτροχημικής διαδικασίας διάβρωσης του σιδηροπλισμού.



Σχ. 4.10 Επίδραση του λόγου N/T στην διείσδυση χλωριόντων στο σκυρόδεμα.

Για την επίδραση των χλωριόντων απαιτούνται ταυτόχρονα οξυγόνο και υγρασία. Σε χάλυβα διαρκώς βυθισμένο σε νερό με χλωριούχα άλατα, δεν εμφανίζεται διάβρωση κατά βελονισμό.

Οι παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση του χάλυβα από χλωρίοντα είναι οι εξής :

- Ποιότητα και πάχος επικάλυψης
- Περιεκτικότητα του σκυροδέματος σε τσιμέντο - Πρόσθετα
- Είδος και συγκέντρωση των χλωριούχων αλάτων
- Περιβάλλον. [10]

ΕΙΔΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

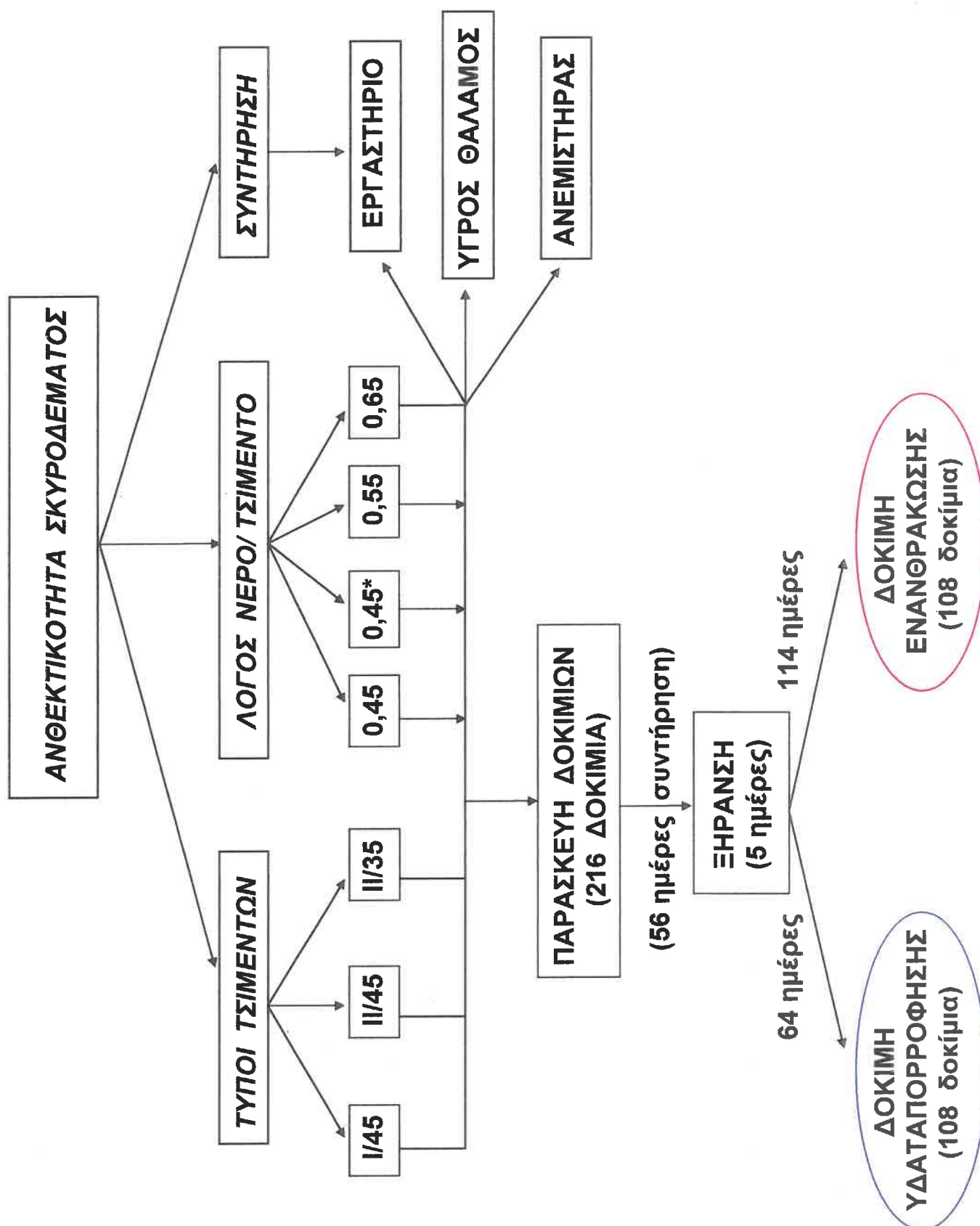
1. ΣΚΟΠΟΣ ΤΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ

Η διπλωματική εργασία καταστρώθηκε πάνω σε μία γενική συλλογιστική που ως σκοπό είχε να εξετάσει την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος μέσω της σημαντικότερης ιδιότητάς της, της διαπερατότητας. Ανάλογα με το ρευστό που διεισδύει στο σκυρόδεμα η διαπερατότητα διαχωρίζεται στην υδατοπερατότητα και την αεροπερατότητα. Η διαπερατότητα όμως επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες. Οι σημαντικότεροι από τους οποίους, ο λόγος νερό/τσιμέντο, ο τύπος του τσιμέντου και η συντήρηση επιλέχθηκαν με σκοπό να μελετηθεί η επίδρασή τους στην διαπερατότητα του σκυροδέματος.

Χρησιμοποιήθηκαν οι τρεις συνηθέστεροι στην πράξη λόγοι νερό/τσιμέντο, ο 0,45, ο 0,65 καθώς και ο 0,55 που είναι μία ενδιάμεση τιμή τους. Οι τιμές αυτές των λόγων επιλέχθηκαν έτσι ώστε τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών να είναι εμφανή. Για τον λόγο $N/T = 0,45$ έγιναν δύο αναμείγματα για τον κάθε τύπο τσιμέντου, ένα με σταθερό όγκο τσιμέντου και ένα με σταθερό όγκο νερού. Από τους τύπους τσιμέντου χρησιμοποιήθηκαν οι τρεις συνηθέστεροι της ελληνικής αγοράς, ο Ι45, ο ΙΙ45 και ο ΙΙ35. Τέλος για τη συντήρηση έγινε προσπάθεια να προσομοιωθούν οι πραγματικές συνθήκες έκθεσης του σκυροδέματος, έτσι τα δοκίμια συντηρήθηκαν σε νερό (υγρός θάλαμος), σε συνθήκες απότομης ξήρανσης (ανεμιστήρας) και σε συνθήκες περιβάλλοντος εργαστηρίου.

Η υδατοπερατότητα εξετάσθηκε μέσω της δοκιμής της υδαταπορρόφησης όπως περιγράφεται από τους κανονισμούς της RILEM [11]. Για την αεροπερατότητα χρησιμοποιήθηκε η δοκιμή της ενανθράκωσης ως η σημαντικότερη, λόγω του ότι η διείσδυση του CO_2 στο οπλισμένο σκυρόδεμα είναι πιθανόν να προκαλέσει διάβρωση του οπλισμού του (χάλυβας).

Παρασκευάστηκαν 12 αναμείγματα (3 τύποι τσιμεντου $\times$ 4 λόγους N/T) από 27 δοκίμια το καθένα, δηλαδή συνολικά 327 δοκίμια. Από τα 27 δοκίμια του κάθε αναμείγματος τα 9 συντηρήθηκαν στο νερό, τα επόμενα 9 στο περιβάλλον εργαστηρίου (25°C και 65% RH) και τα τελευταία 9 σε συνθήκες απότομης ξήρανσης. Το 1/3 των δοκιμίων (108 δοκίμια) χρησιμοποιήθηκε για τη δοκιμή της υδαταπορρόφησης, αντίστοιχα και για τη δοκιμή της ενανθράκωσης και τέλος το υπόλοιπο 1/3 για τη μέτρηση των αντοχών στις 7, 28, 55 και 71 ημέρες (βλέπε διάγραμμα ροής Σχ. 1.1)



ΣΧ. 1.1 Διάγραμμα ροής

ΠΙΝΑΚΑΣ 1.1 : ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ-ΚΑΘΗΣΕΩΝ ΑΝΑΜΕΙΓΜΑΤΩΝ

ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΚΕΤ	ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	N/T	ΤΣΙΜΕΝΤΟ Kgr/m3	ΝΕΡΟ Kgr/m3	ΑΔΡΑΝΗ Kgr/m3	ΚΑΘΗΣΗ (cm)
34	I 45	0,45	330	148,5	1952	4
36	I 45	0,55	330	181,5	1863,8	10
38	I 45	0,65	330	214,5	1775,7	17
49	I 45	0,45*	422,2	190	1762,5	8
54	II 45	0,45	330	148,5	1944,6	5
40	II 45	0,55	330	181,5	1856,5	10
43	II 45	0,65	330	214,5	1768,3	17
57	II 45	0,45*	422,2	190	1753	9,5
61	II 35	0,45	330	148,5	1934,8	2,5
45	II 35	0,55	330	181,5	1846,7	11
47	II 35	0,65	330	214,5	1758,6	15
63	II 35	0,45*	422,2	190	1740,5	11

2. ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

2.1. ΥΛΙΚΑ

Τσιμέντο

Χρησιμοποιήθηκαν οι εξής τρεις τύποι τσιμέντου: I 45, II 45, II 35 της ΑΓΕΤ ΗΡΑΚΛΗΣ. Οι ποσότητες ζυγίστηκαν σε ζυγαριά με ακρίβεια ± 5 gr.

Νερό

Το νερό ήταν το νερό του δικτύου ύδρευσης της ΕΥΔΑΠ και ζυγίστηκε σε ζυγαριά με ακρίβεια ± 5 gr.

Αδρανή

Τα αδρανή ήταν της εταιρείας ΛΑΤΟ με τα εξής χαρακτηριστικά:

- άμμος με υγρασία 0,99% και κοκκομετρία όπως φαίνεται στον πρώτο πίνακα που ακολουθεί καθώς και στο διάγραμμα 1.
- γαρμπίλι, με κοκκομετρία όπως φαίνεται στον δεύτερο πίνακα που ακολουθεί καθώς και στο διάγραμμα 2.

Ρευστοποιητής

Σε ορισμένα από τα αναμείγματα χρησιμοποιήθηκε ρευστοποιητής REOBILD 561, ανάλογα με τις απαιτήσεις σε εργασιμότητα, και χρησιμοποιήθηκε ζυγαριά με ακρίβεια $\pm 0,001$ gr.

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ ΕΡΕΥΝΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

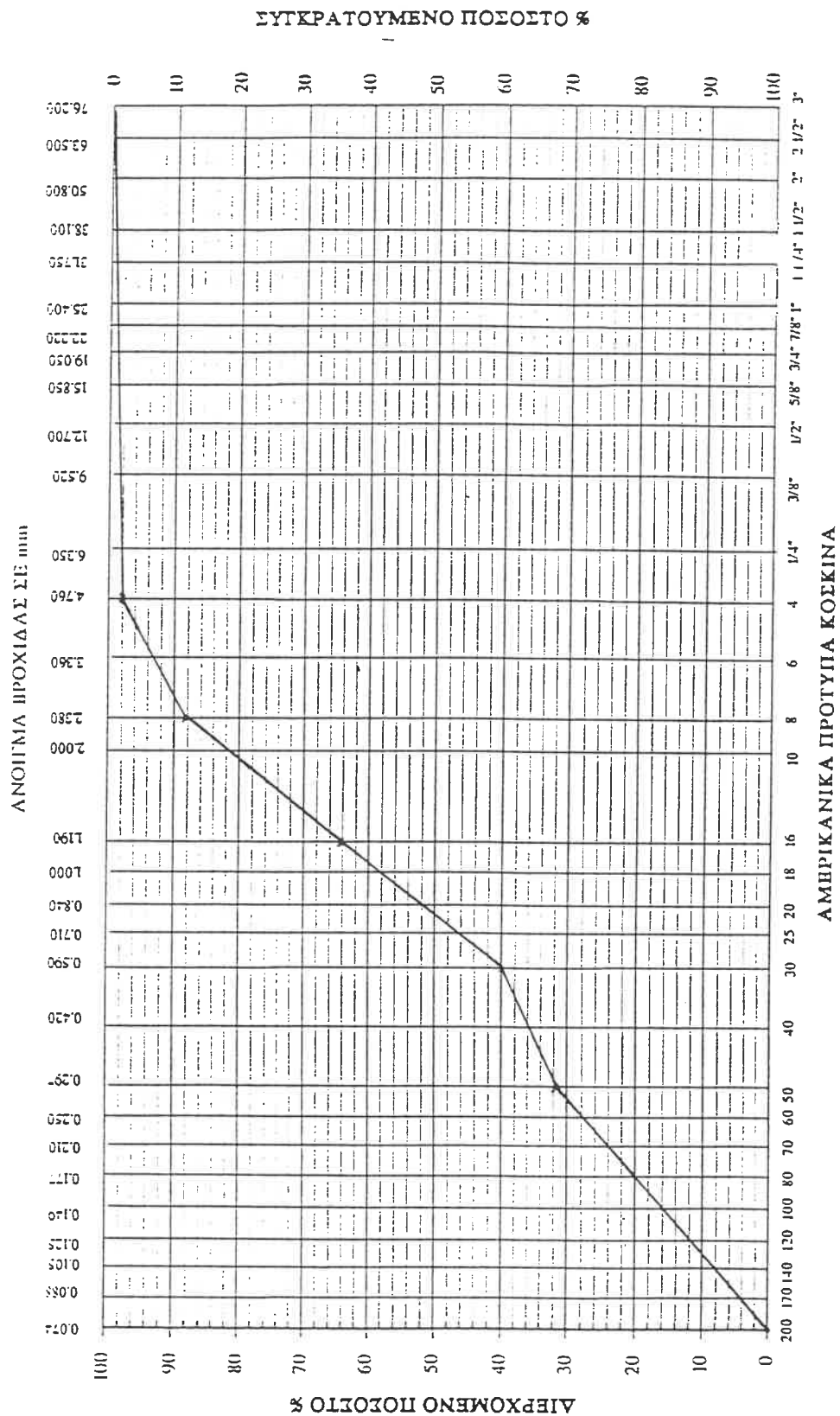
ΔΕΛΤΙΟ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Στοιχεία Δείγματος : Άμμος

Βάρος ολικού δείγματος				Διερχόμενο βάρος	
Πρότυπο μέγεθος κόσκινου	Αριθμός κόσκινου	Συγκρατούμενο βάρος			
		gr	%	gr	%
75,00	3"				
63,00	2 ½"				
50,00	2"				
37,50	1 ½"				
31,50	1 ¼"				
25,00	1"				
19,00	¾"				
16,00	5/8"				
12,50	½"				
9,50	3/8"				
6,30	¼"				
4,75	No 4	4	0,2	1973	99,80
2,36	No 8	227,5	11,50	1749,5	88,50
2,00	No 10				
1,18	No 16	699,1	35,36	1277,9	64,64
0,60	No 30	1161,5	58,75	815,5	41,25
0,43	No 40				
0,30	No 50	1348,5	68,21	628,5	31,79
0,18	No 80				
0,15	No 100				
0,08	No 200				
	Παιπάλη				
	Ολ. βάρος	1977			

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 1 - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Στοιχεία Δείγματος: Άμμος



ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΕΛΛΗΝΙΚΟΥ ΚΕΝΤΡΟΥ ΕΡΕΥΝΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

ΔΕΛΤΙΟ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

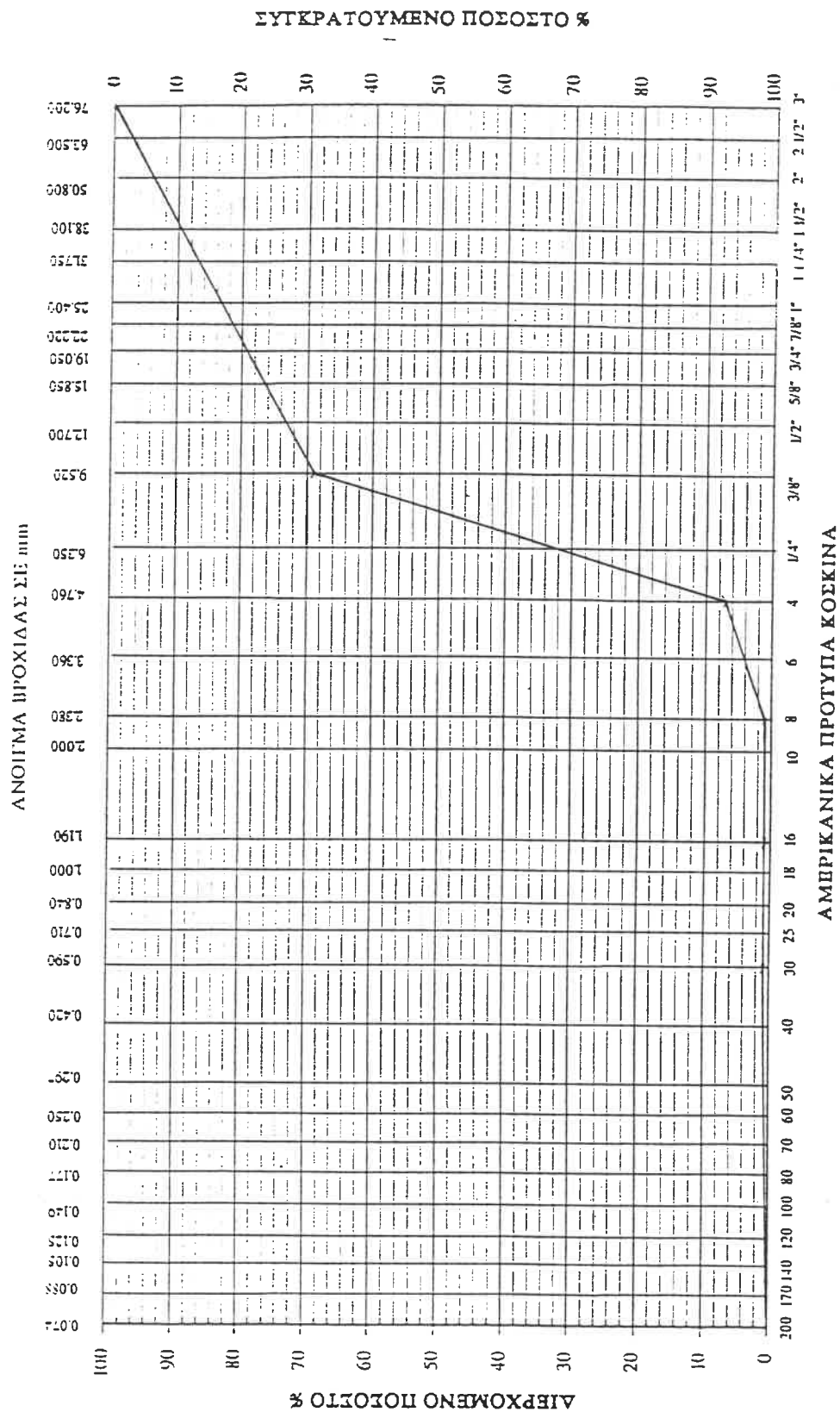
Στοιχεία Δείγματος : Γαρμπίλι

Βάρος ολικού δείγματος				Διερχόμενο βάρος	
Πρότυπο μέγεθος κόσκινου	Αριθμός κόσκινου	Συγκρατούμενο βάρος			
		gr	%	gr	%
75,00	3"				
63,00	2 ½"				
50,00	2"				
37,50	1 ½"				
31,50	1 ¼"				
25,00	1"				
19,00	¾"				
16,00	5/8"				
12,50	½"				
9,50	3/8"	728	31,19	1604,9	68,79
6,30	¼"				
4,75	No 4	2162,5	92,70	170,4	7,30
2,36	No 8	2313,1	99,15	19,8	0,85
2,00	No 10				
1,18	No 16	2315,8	99,27	17,1	0,73
0,60	No 30	2316,8	99,31	16,1	0,69
0,43	No 40				
0,30	No 50				
0,18	No 80				
0,15	No 100				
0,08	No 200				
	Παιπάλη				
	Ολ. βάρος	2332,9			

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ 2 –

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΚΟΚΚΟΜΕΤΡΙΚΗΣ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

Στοιχεία Δείγματος : Γαρμπίλι



2.2. ΜΕΛΕΤΗ ΣΥΝΘΕΣΗΣ

Από τον κάθε τύπο τσιμέντου κατασκευάστηκαν 4 αναμείγματα (βλέπε Πίν.1.1). Για τον κάθε λόγο νερού προς τσιμέντο (N/T) 0,45, 0,55, 0,65 με συγκεκριμένη ποσότητα τσιμέντου υπολογίζονται οι ποσότητες του νερού και των αδρανών στο ένα κυβικό μέτρο σκυροδέματος σύμφωνα με τη θεμελιώδη σχέση:

$$T/\gamma_1 + N/\gamma_2 + A/\gamma_3 + \alpha = 1 \text{ m}^3$$

όπου: T= η ποσότητα του τσιμέντου που στην συγκεκριμένη περίπτωση ισούται με 330 kg

N= η ποσότητα νερού σε kg

A= η συνολική ποσότητα των αδρανών σε kg

α = η ποσότητα του αέρα που περιέχεται μέσα στο νωπό σκυρόδεμα και θεωρήθηκε ότι ισούται με 0,015 kg

γ_1 = το ειδικό βάρος του εκάστοτε τύπου τσιμέντου σε kg/m³

γ_2 = το ειδικό βάρος του νερού που ισούται με 1000 kg/m³

γ_3 = το μέσο ειδικό βάρος των αδρανών που ισούται με 2670 kg/m³

Για τον λόγο N/T=0,45 έγινε άλλο ένα ανάμειγμα όπου με συγκεκριμένη ποσότητα νερού αυτή τη φορά, υπολογίστηκαν οι ποσότητες των υπολοίπων υλικών. Έτσι, στον παραπάνω τύπο θεωρούμε γνωστή την ποσότητα του νερού N = 190 kg και άγνωστες τις υπόλοιπες ποσότητες T, A.

Πιο αναλυτικά,λοιπον,για τον κάθε λόγο νερού προς τσιμέντο έχουμε:

<u>N /T= 0,45</u>	T = 330 kg	και	T = 422,2 kg
	N = 148,5 kg		N = 190 kg
	A = 1952,0 kg		A = 2374,7 kg

<u>N /T = 0,55</u>	T = 330 kg	<u>N /T = 0,65</u>	T = 330 kg
	N = 181,5 kg		N = 214,5 kg
	A = 1863,8 kg		A = 1775,7 kg

Τα αδρανή υπολογίστηκαν έτσι ώστε η άμμος και το γαρμπίλι να αποτελούν το καθένα το 50% του συνόλου των αδρανών.

Η ποσότητα του ρευστοποιητή που χρησιμοποιήθηκε κάθε φορά φαίνεται στο παράρτημα και υπολογίστηκε έτσι ώστε να πέρνουμε περίπου την ίδια κάθηση (με κάποιες ανοχές) για τους ίδιους λόγους N/T (βλέπε Πιν.1.1).

Η μηχανή που χρησιμοποιήθηκε για την ανάμειξη των παραπάνω ποσοτήτων είναι αυτή που φαίνεται στην παρακάτω φωτογραφία.



2.3. ΣΥΜΠΥΚΝΩΣΗ ΚΑΙ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Τα κυβικά δοκίμια που κατασκευάστηκαν ήταν ακμής 10cm και χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικοί τύποι μητρών. Στον ένα τύπο το κάθε καλούπι είχε βάρος 16kg ενώ στους άλλους δύο είχε 9kg.

Η συμπίκνωση έγινε σε δονητική τράπεζα για χρόνο 3 – 5 sec ανάλογα με την κάθηση του αναμείγματος, όπως φαίνεται στο παράρτημα. Κατά τη δόνηση, λόγω της διαφοράς του βάρους των διαφόρων τύπων μητρών, προστέθηκε στις πιο ελαφριές μία μεταλλική πλάκα βάρους 7kg έτσι ώστε η συμπίκνωση να είναι ομοιόμορφη και στα 27 δοκίμια.

Μετά την συμπύκνωση τα δοκίμια μεταφέρθηκαν στον υγρό θάλαμο του εργαστηρίου όπου επικρατούν συνθήκες 95% υγρασίας και $20 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$. Σκεπάστηκαν με νάυλον καλύμματα για να μην βραχούν και πάρουν και άλλη ποσότητα νερού από την υπολογισμένη και έμειναν εκεί μέχρι την σκλήρυνση του σκυροδέματος,

Ο χρόνος σκλήρυνσης διαφέρει για τα διάφορα αναμείγματα. Στα αναμείγματα με λόγο $N/T=0,45$ η προσθήκη μεγάλης ποσότητας ρευστοποιητή με σκοπό να πάρουμε την επιθυμητή κάθηση, επιβράδυνε τον χρόνο σκλήρυνσης με αποτέλεσμα τα δοκίμια να χρειάζονται άλλη μία μέρα στον υγρό θάλαμο πριν το ξεκαλούπωμα.

Μετά το ξεκαλούπωμα και το καθάρισμα των μητρών τα δοκίμια ζυγίστηκαν σε ζυγαριά με υποδιαίρεση 0,1 gr και μετρήθηκε το ύψος τους με παχύμετρο. Στο παράρτημα φαίνεται το βάρος και το μέσο ύψος του κάθε αριθμημένου δοκιμίου.

Από τα 27 δοκίμια που κατασκευάστηκαν για το κάθε ανάμειγμα 9 φυλάχθηκαν στον υγρό θάλαμο μέσα σε λεκάνες με νερό για 55 – 57 ημέρες οπότε και ξεκίνησαν οι προετοιμασίες για την δοκιμή της υδαταπορρόφησης. Άλλα 9 δοκίμια τοποθετήθηκαν για 7 ημέρες μπροστά σε έναν ανεμιστήρα με συνεχή λειτουργία για να γίνει εντατική ξήρανση ενώ το υπόλοιπο διάστημα μέχρι τις ~56 ημέρες φυλάχθηκαν στο εργαστήριο σε συνθήκες δωματίου $15^{\circ}\text{C} - 22^{\circ}\text{C}$ και υγρασίας ~60%. Τα τελευταία 9 φυλάχθηκαν για όλο το απαιτούμενο διάστημα στο εργαστήριο, σε συνθήκες ~60% υγρασίας και θερμοκρασίας $15^{\circ}\text{C} - 22^{\circ}\text{C}$.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ

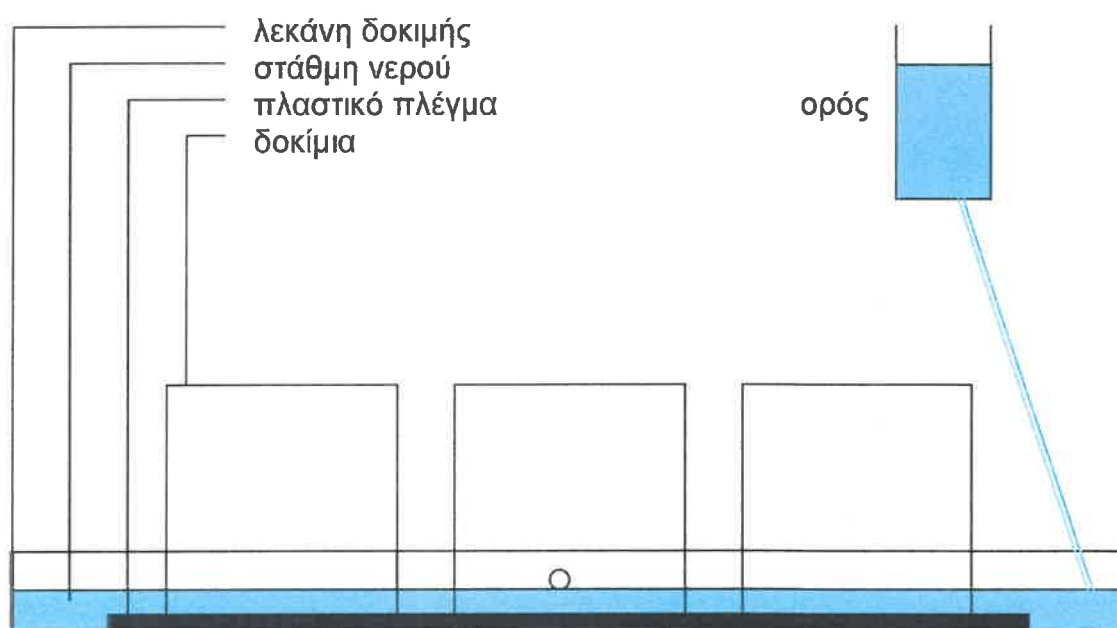
Πριν τις δοκιμές της υδαταπορρόφησης και της ενανθράκωσης τα δοκίμια ξηράνθηκαν έτσι ώστε να απομακρυνθεί η υγρασία που πλεόναζε και που έφραζε τους πόρους. Σε ηλικία, λοιπόν, 56 ή 57 ημερών τα δοκίμια μπήκαν στο φούρνο σε θερμοκρασία 60°C και έμειναν για 72 ώρες. Κατόπιν βγήκαν, τυλίχθηκαν με σελοφάν και έμειναν έτσι μέχρι την ημερομηνία των δοκιμών. Με αυτό μπορέσαμε να εξισορροπήσουμε την υγρασία στο εσωτερικό των δοκιμίων έτσι ώστε να είναι ομοιόμορφη παντού αφού κατά την ξήρανση η υγρασία μετακινείται από το εσωτερικό προς τα έξω και έτσι σε κάποιο βάθος μπορεί να έχουμε μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε νερό απ' ό,τι σε άλλο.

3.1. Υδαταπορρόφηση

Η δοκιμή της υδαταπορρόφησης έγινε όταν τα δοκίμια ήταν ηλικίας 63 ή 64 ημερών. Σε κάθε δοκιμή εξετάζονταν εννέα κυβικά δοκίμια από το κάθε ανάμειγμα (τρία από την κάθε συντήρηση) ακμής 10cm. Τα δοκίμια αυτά τοποθετήθηκαν σε μία λεκάνη στον πάτο της οποίας είχε τοποθετηθεί πλαστικό πλέγμα έτσι ώστε όλα τα δοκίμια να βρίσκονται στο ίδιο επίπεδο, να είναι το ίδιο βυθισμένα στο νερό και το νερό να έρχεται σε επαφή με την κάτω έδρα των δοκιμίων. Στην πλαεινή πλευρά της λεκάνης είχαμε ανοίξει μια μικρή τρύπα έτσι ώστε η στάθμη του νερού να μην ξεπερνά το 1cm και για να διατηρήσουμε σταθερό αυτό το ύψος η λεκάνη είχε συνδεθεί με ένα δοχείο με νερό μέσω ενός σωλήνα ορού όπου ρυθμίζαμε την ροή του νερού ανάλογα με την απορρόφηση (βλέπε Σχ. 3.1). Πριν να τοποθετήσουμε το κάθε δοκίμιο στη λεκάνη είχαμε τυλίξει τις πλαϊνές έδρες του με κολλητική ταινία (εκτός από το 1 cm που έρχεται σε επαφή με το νερό) για να ελέγχουμε την απορρόφηση και την εξάτμιση από τις πλαϊνές πλευρές έτσι ώστε η κίνηση του νερού να είναι από την κάτω προς την επάνω έδρα.[11]

Για το κάθε ανάμειγμα το πρώτο ζύγισμα έγινε πριν μπουν τα δοκίμια στο νερό. Την πρώτη ημέρα ζυγίσματα γίνονταν κάθε μισή ώρα τις πρώτες 5 ώρες (γιατί

τότε παρουσιάζονται οι μεγαλύτερες μεταβολές) και κάθε μία ώρα τις επόμενες 4 ώρες. Τα ζυγίσματα συνεχίστηκαν για άλλες δύο ημέρες, κατά τις οποίες, την δεύτερη ημέρα έγινε ένα ζύγισμα στις 24 ώρες και άλλο ένα στις 33 ώρες μετά το πρώτο ζύγισμα. Την τρίτη ημέρα έγινε το τελευταίο ζύγισμα 48 ώρες μετά το πρώτο. Πριν από το κάθε ζύγισμα τα δοκίμια μόλις έβγαιναν από το νερό σκουπίζονταν με απορροφητικό χαρτί έτσι ώστε η μεταβολή του βάρους που θέλαμε να μετρήσουμε να οφείλεται μόνο στο νερό που απορροφήθηκε από τους πόρους του σκυροδέματος και όχι σε σταγονίδια που μπορεί να υπήρχαν στις πλευρές.



Σχ. 3.1 Σχήμα δοκιμής υδαταπορρόφησης

3.2. Ενανθράκωση

Σε ηλικία 113 ή 114 ημερών έγινε η δοκιμή της ενανθράκωσης στην οποία χρησιμοποιήθηκαν πλαστικοί σάκοι (μαύρες σακούλες σκουπιδιών). Στις σακούλες ανοίχθηκαν δύο τρύπες· στη μία προσαρμόστηκε ένα μικρό σωληνάκι απ' όπου θα γίνει και η εισαγωγή του CO_2 και η άλλη χρησιμοποιήθηκε για την απομάκρυνση του ατμοσφαιρικού αέρα από το εσωτερικό της σακούλας. Μετά

από την εισαγωγή του CO_2 και την απομάκρυνση του ατμοσφαιρικού αέρα οι δύο τρύπες καθώς και το άνοιγμα της σακούλας σφραγίστηκαν καλά με μονωτική ταινία.

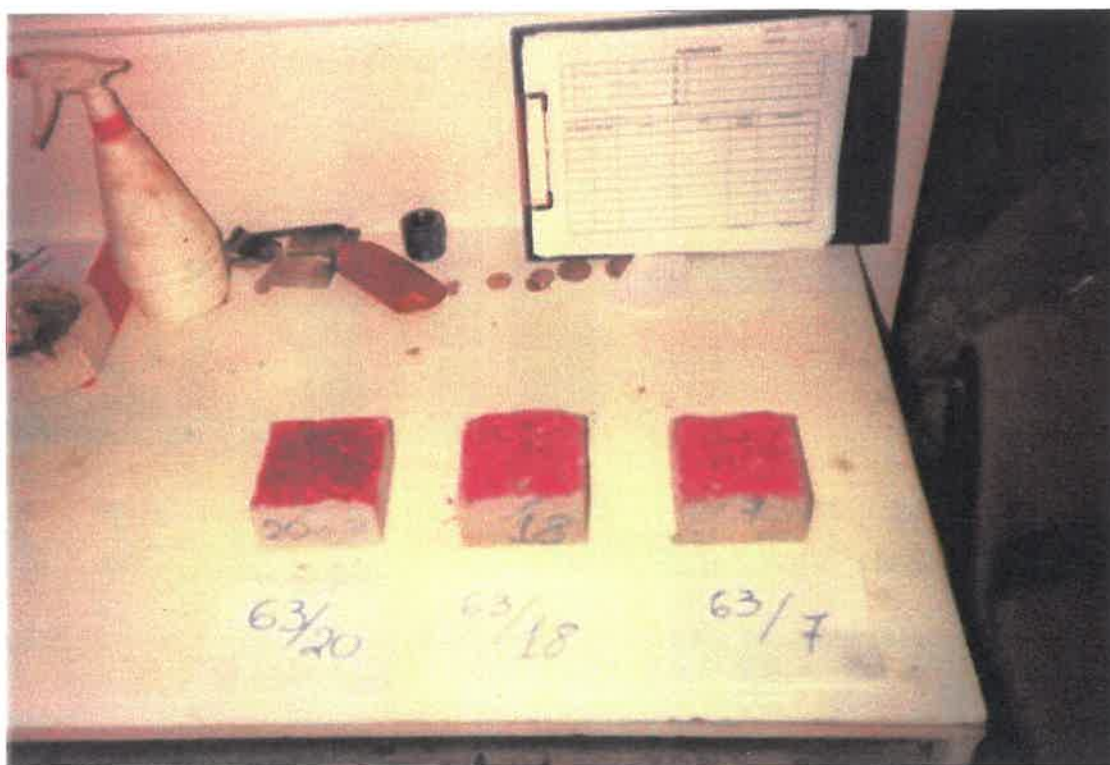
Τα δοκίμια (εννέα για το κάθε ανάμειγμα, τρία δηλαδή από την κάθε συντήρηση) τοποθετήθηκαν, μέσα στην σακούλα, πάνω σε πλαστικό πλέγμα ώστε το CO_2 να κυκλοφορεί και κάτω από την κάτω έδρα και η διείσδυση του αερίου να γίνει ομοιόμορφα απ' όλες τις πλευρές. Το κάθε ανάμειγμα έμεινε στη σακούλα για 15 ημέρες ενώ η ποσότητα του διοξειδίου ανανεώνονταν στις 7 ημέρες έτσι ώστε να διατηρείται περίπου σταθερή η πίεση του CO_2 .

Μετά τις 15 ημέρες τα δοκίμια έπρεπε να διαρρηχθούν και να μετρηθεί η διείσδυση του CO_2 . Για να γίνει η θραύση κατά ένα όσο το δυνατόν κατακόρυφο επιπέδο τοποθετήσαμε ανάμεσα στην πάνω και κάτω πλευρά του δοκιμίου και τις πλευρές της πρέσας, από μία χαλύβδινη ράβδο στο ίδιο κατακόρυφο επίπεδο. Η πρέσα που χρησιμοποιήθηκε φαίνεται στην φωτογραφία που ακολουθεί.



Μετά τη θραύση η κάθε πλευρά που διαχωρίστηκε ψεκάστηκε με αλκοολούχο διάλυμα φαινολοφθαλεΐνης 1% το οποίο χρωματίζει με ένα έντονο μωβ χρώμα τα μέρη που δεν έχουν υποστεί αλλοίωση από το διοξείδιο. Τα δοκίμια έμεναν προκειμένου να στεγνώσουν στο εργαστήριο άλλη μία μέρα, οπότε και και

γίνονταν οι μετρήσεις του βάθους της διείσδυσης του αερίου (δηλ. το μη χρωματισμένο τμήμα του δοκιμίου) με ένα υποδεκάμετρο. Ο μέσος όρος και από τις δύο πλευρές της θραύσης αποτελεί το βάθος της ενανθράκωσης. [9] Στην φωτογραφία παρακάτω βλέπουμε τα τρία δείγματα, ένα από την κάθε συντήρηση, του αναμείγματος 63 (II 35-0,45*) μετά την θραύση και τον ψεκασμό με το διάλυμα φαινολοφθαλεΐνης. Η συντήρησή τους, από τα αριστερά, είναι νερό, εργαστήριο, ανεμιστήρας.



4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ ΚΑΙ ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ

4.1. Αποτελέσματα πειραμάτων

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των πειραμάτων της υδαταπορρόφησης με τη μορφή διαγραμμάτων, της ενανθράκωσης με τη μορφή ιστογραμμάτων καθώς και ο πίνακας των αντοχών των 12 αναμειγμάτων. Τέλος, παρουσιάζεται ένα διάγραμμα που δείχνει τη μεταβολή του βάρους λόγω ξήρανσης σε μια σειρά δοκιμαστικών δοκιμίων.

Οι πειραματικές μετρήσεις της υδαταπορρόφησης έδειξαν τη μεταβολή της αύξησης βάρους του δοκιμίου που οφείλεται στο νερό που απορροφά κατά τη διάρκειά τους. Επειδή όμως η υδαταπορρόφηση των αδρανών θεωρείται αμελητέα (προσρόφηση άμμου ~ 1-1,5%, προσρόφηση γαρμπιλιού ~ 0,5%), κρίναμε σκόπιμο να ανάγουμε τα αποτελέσματα στην υδαταπορρόφηση του τσιμεντοπολτού. Αυτό έγινε υπολογίζοντας το ποσοστό της μάζας του τσιμεντοπολτού στο 1m³ για κάθε ανάμειγμα με τον παρακάτω τύπο:

$$\frac{T + N}{T + N + A + \alpha} = \% \text{ τσιμεντοπολτού στο } 1\text{m}^3$$

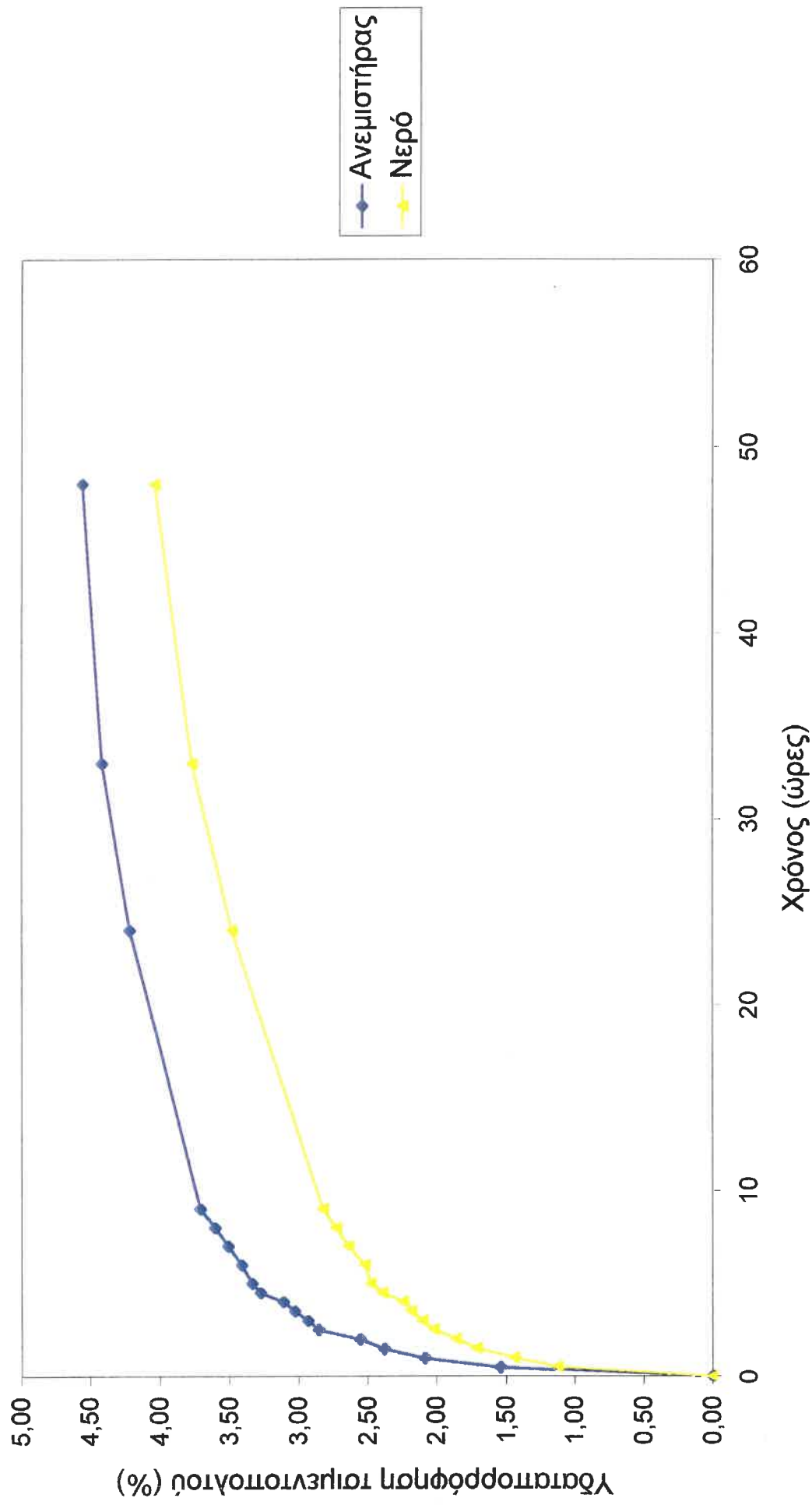
Στη συνέχεια, γνωρίζοντας αυτό το ποσοστό, υπολογίσαμε τη μάζα του τσιμεντοπολτού για το κάθε δοκίμιο του κάθε αναμείγματος. Για τη στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων χρησιμοποιήσαμε τον μέσο όρο της υδαταπορρόφησης του τσιμεντοπολτού από τρία δοκίμια της κάθε συντήρησης.

Ανάλογα, και στην στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων της ενανθράκωσης χρησιμοποιήσαμε τον μέσο όρο της διείσδυσης του CO₂ τριών δοκιμίων της κάθε συντήρησης για το κάθε ανάμειγμα.

Ο σχολιασμός των αποτελεσμάτων των πειραμάτων γίνεται στις τέσσερις ενότητες που ακολουθούν :

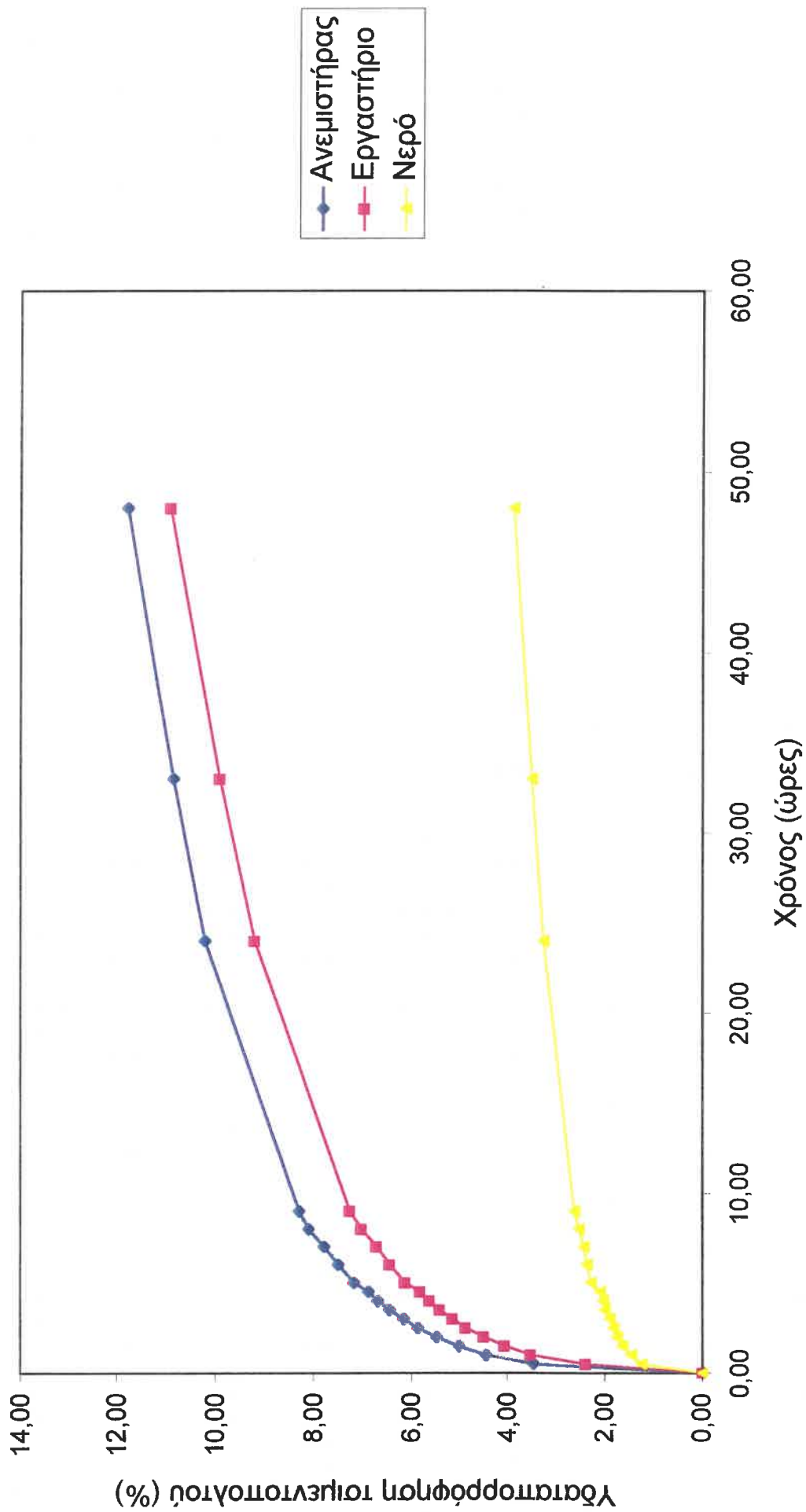
- α) Στα Σχ. 4.1 έως Σχ. 4.12 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της υδαταπορρόφησης του τσιμεντοπολτού του κάθε αναμείγματος συναρτήσει του χρόνου, για την κάθε συντήρηση .
- β) Στα Σχ. 4.13 έως Σχ. 4.21 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της υδαταπορρόφησης του τσιμεντοπολτού των τριών τύπων τσιμέντου στην κάθε συντήρηση συναρτήσει του χρόνου, για τους τέσσερις διαφορετικούς λόγους N/T.
- γ) Στα Σχ. 4.22 έως Σχ. 4.33 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της υδαταπορρόφησης του τσιμεντοπολτού για τους τέσσερις λόγους N/T και τις τρεις συντηρήσεις συναρτήσει του χρόνου, για τους τρεις τύπους τσιμέντου.
- δ) Στα Σχ. 4.34 έως 4.36 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της διείσδυσης του CO₂, για τον κάθε τύπο τσιμέντου συναρτήσει του λόγου N/T, για την κάθε συντήρηση.

Ανάμειγμα 34 - I45/0,45



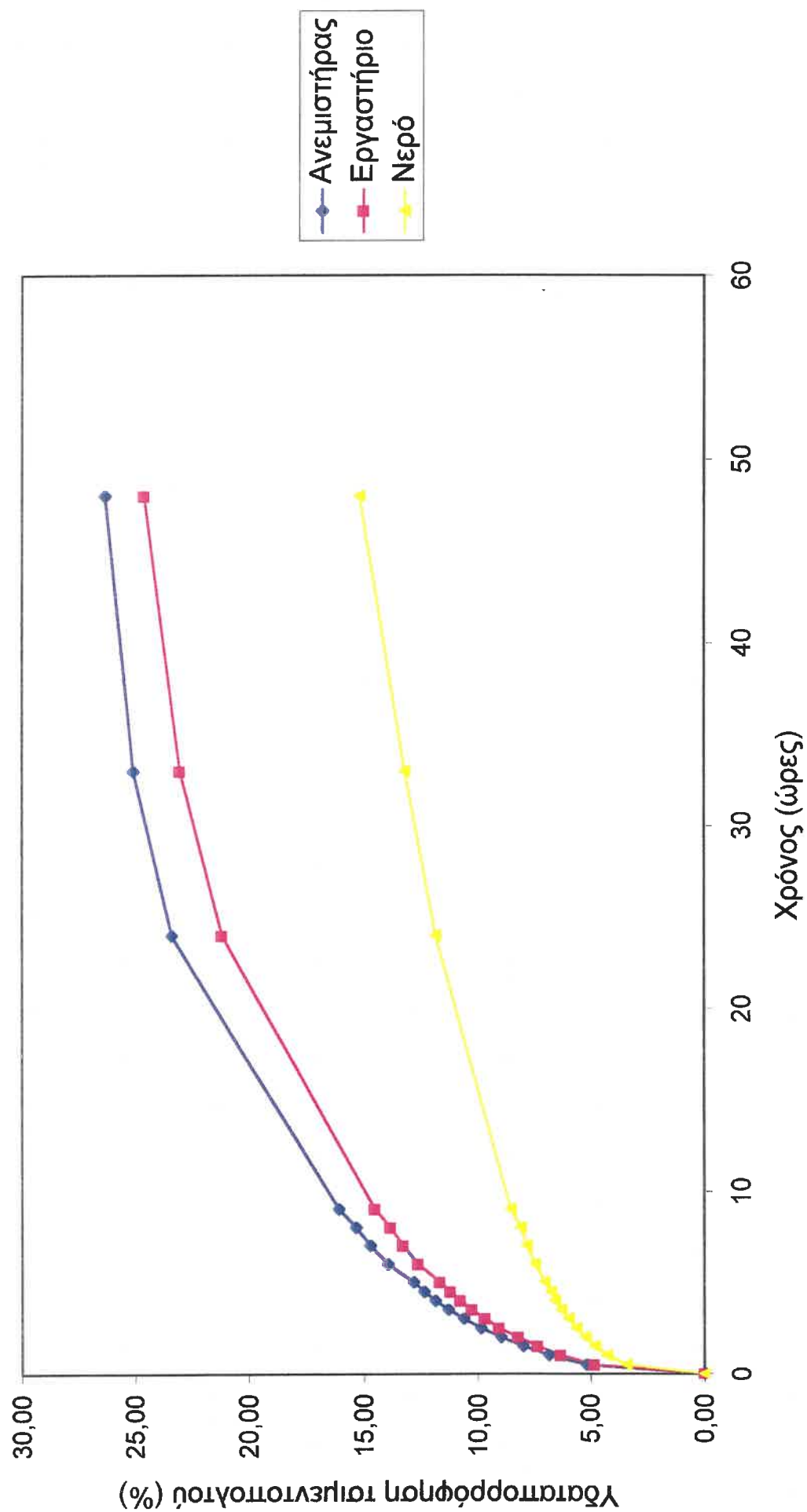
Σχ. 4.1 Υδαταπορρόφηση τσιμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Ανάμειγμα 36 - I45/0,55



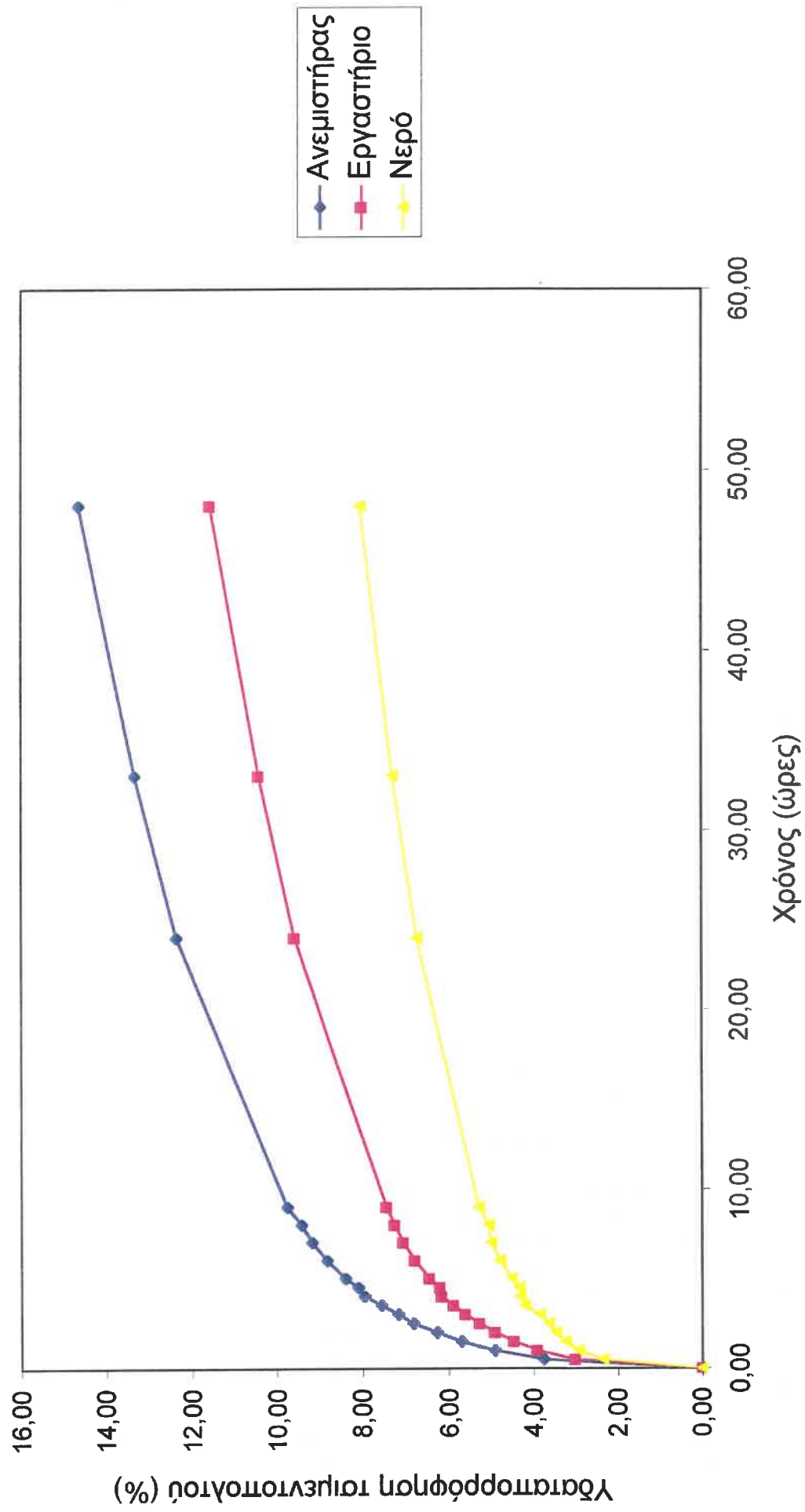
Σχ. 4.2 Υδαταπορρόφηση τσιμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Ανάμειγμα 38 - Ι45/0,65



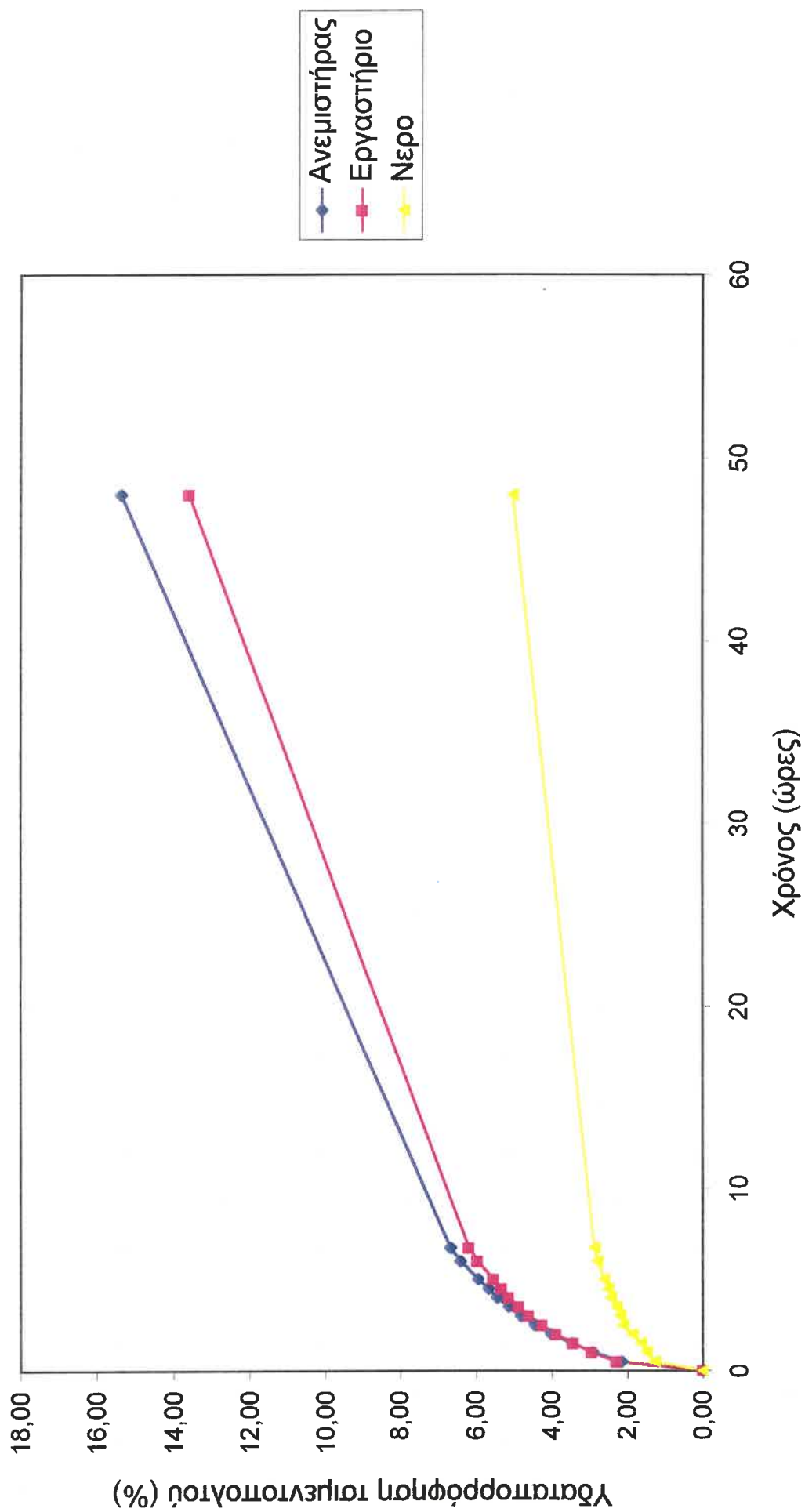
Σχ. 4.3 Υδατορρόφηση τσιμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Ανάμειγμα 40 - II45/0,55



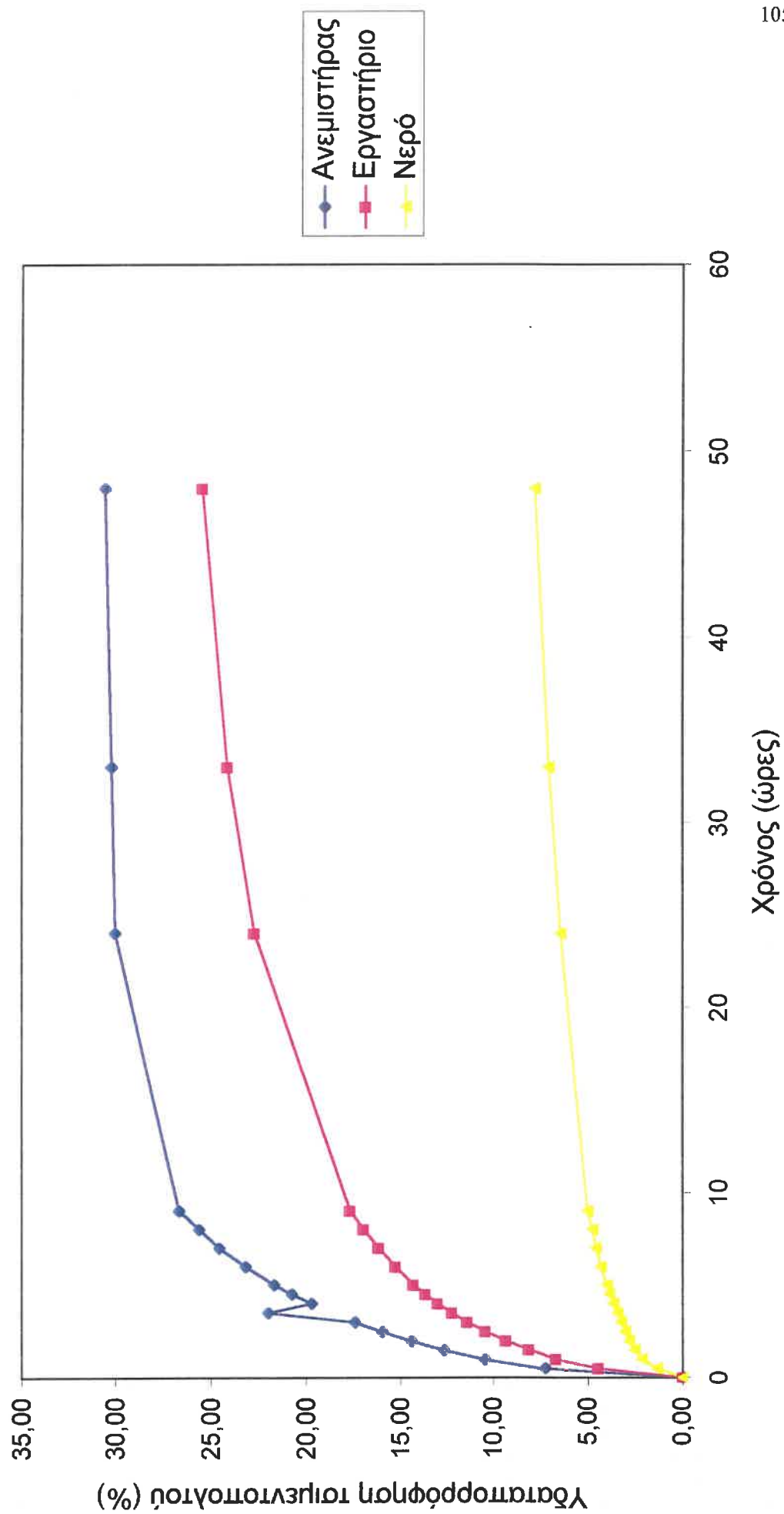
ΣΧ. 4.4 Υδαταπορρόφηση τσιμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Ανάμειγμα 43 - II45/0,65



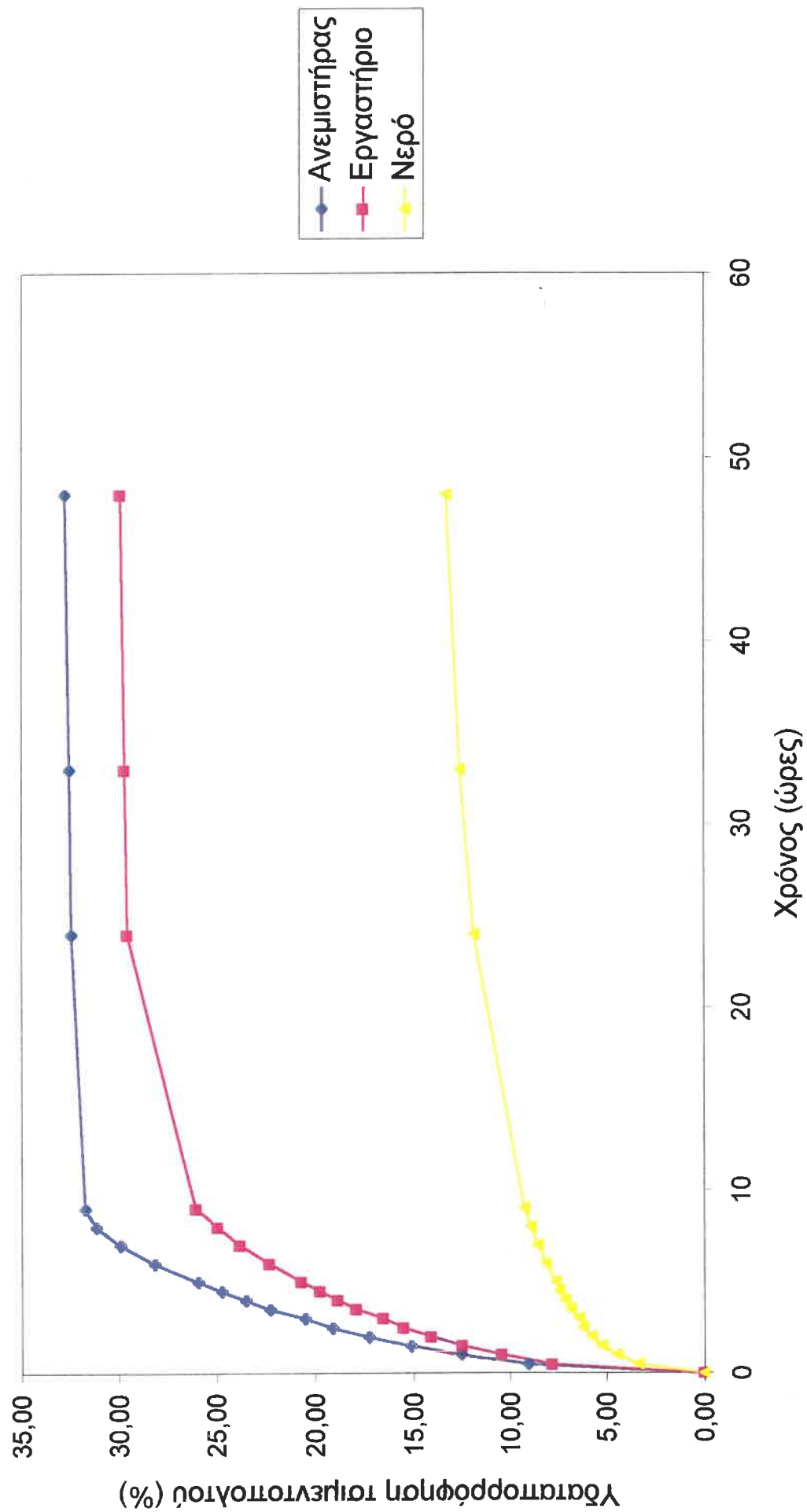
Σχ. 4.5 Υδαταπορρόφηση τσιμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Ανάμειγμα 45 - II35/0,55



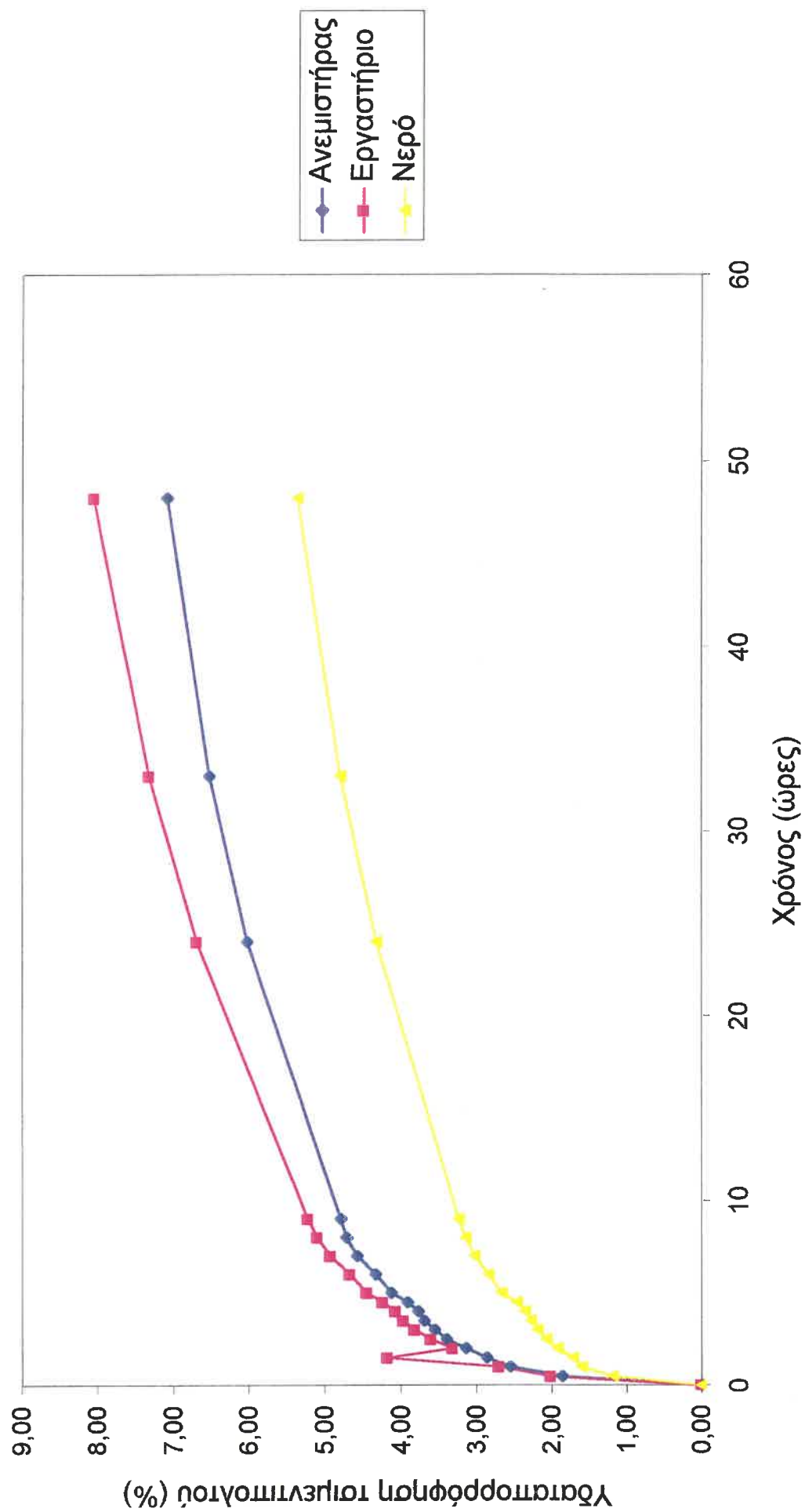
Σχ. 4.6 Υδαταπορρόφηση τσιμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Ανάμειγμα 47 - II35/0,65



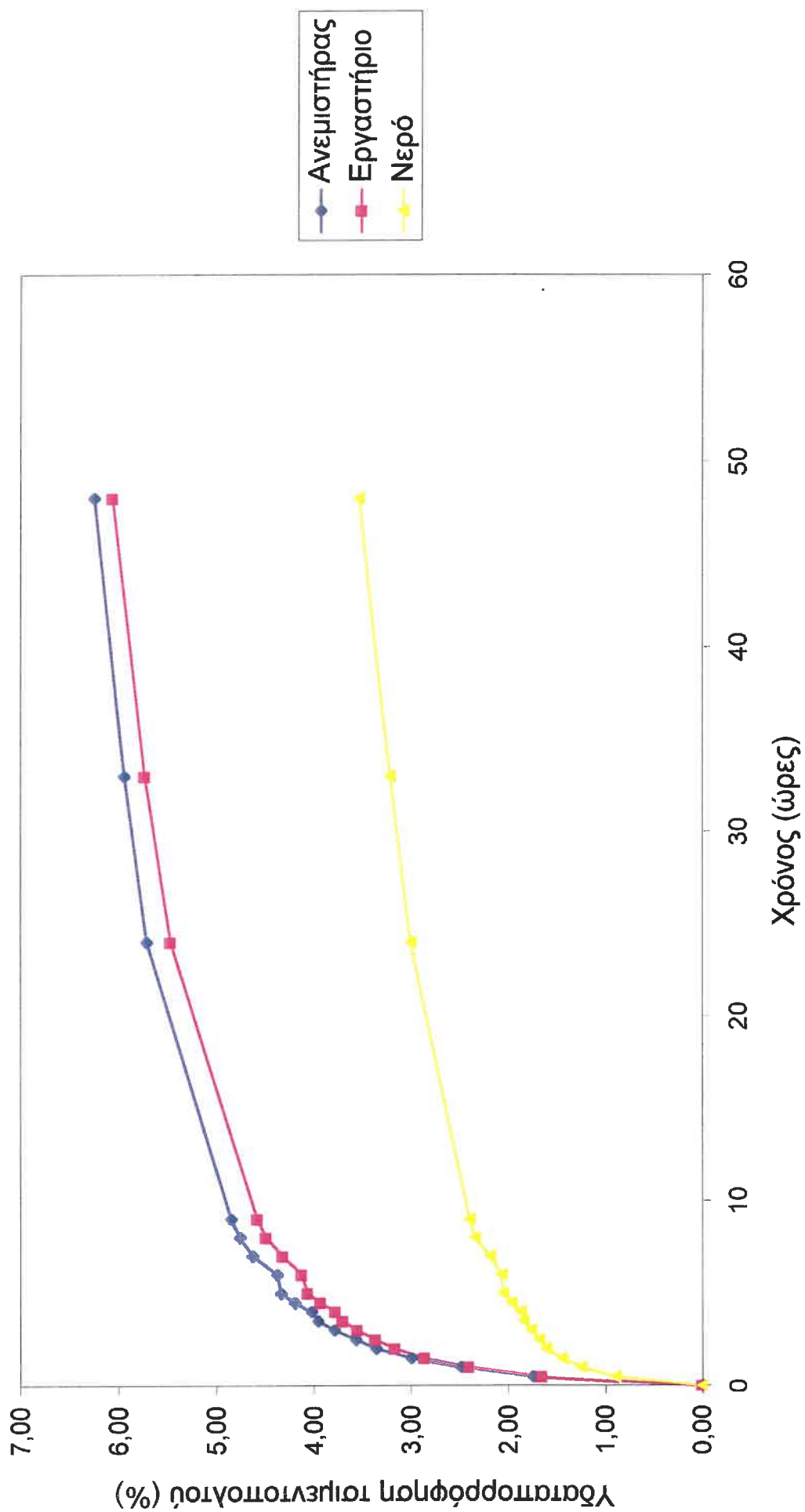
Σχ. 4.7 Υδαταπορρόφηση τσιμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Ανάμειγμα 49 - Ι45/0,45*



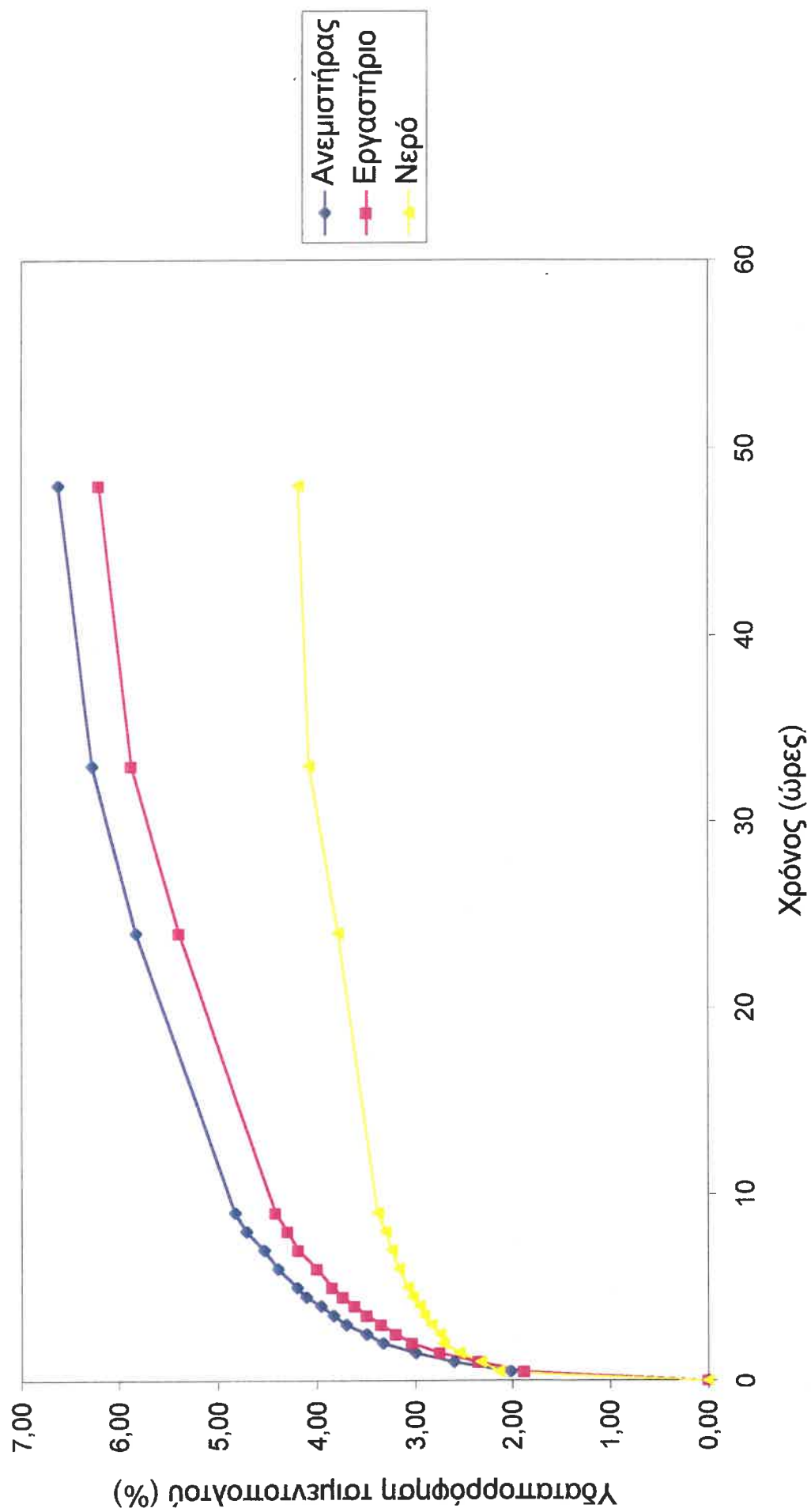
Σχ. 4.8 Υδαταπορρόφηση τσιμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Ανάμειγμα 54 - II45/0,45



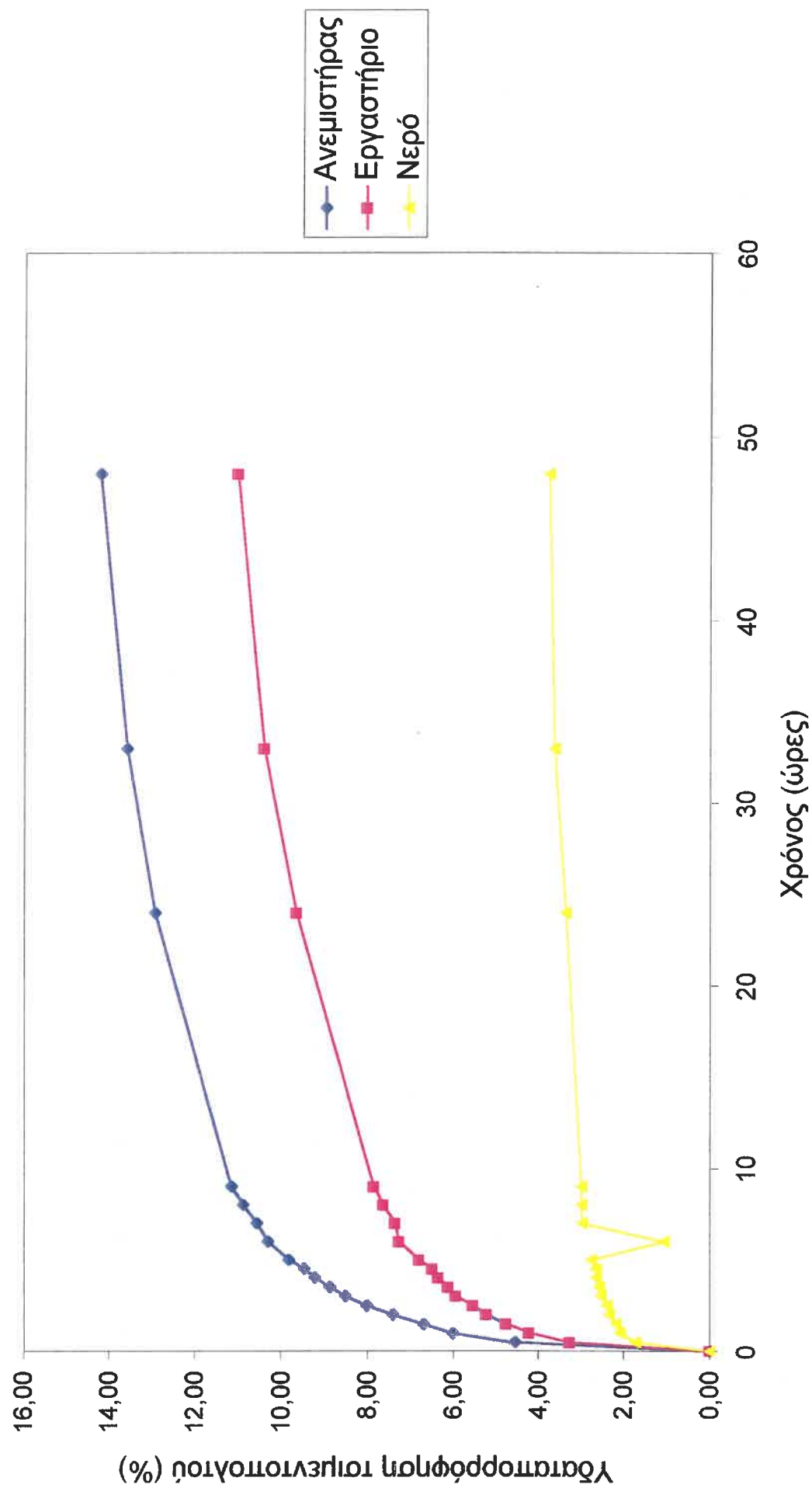
Σχ. 4.9 Υδαταπορρόφηση τσιμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Ανάμειγμα 57 - II45/0,45*



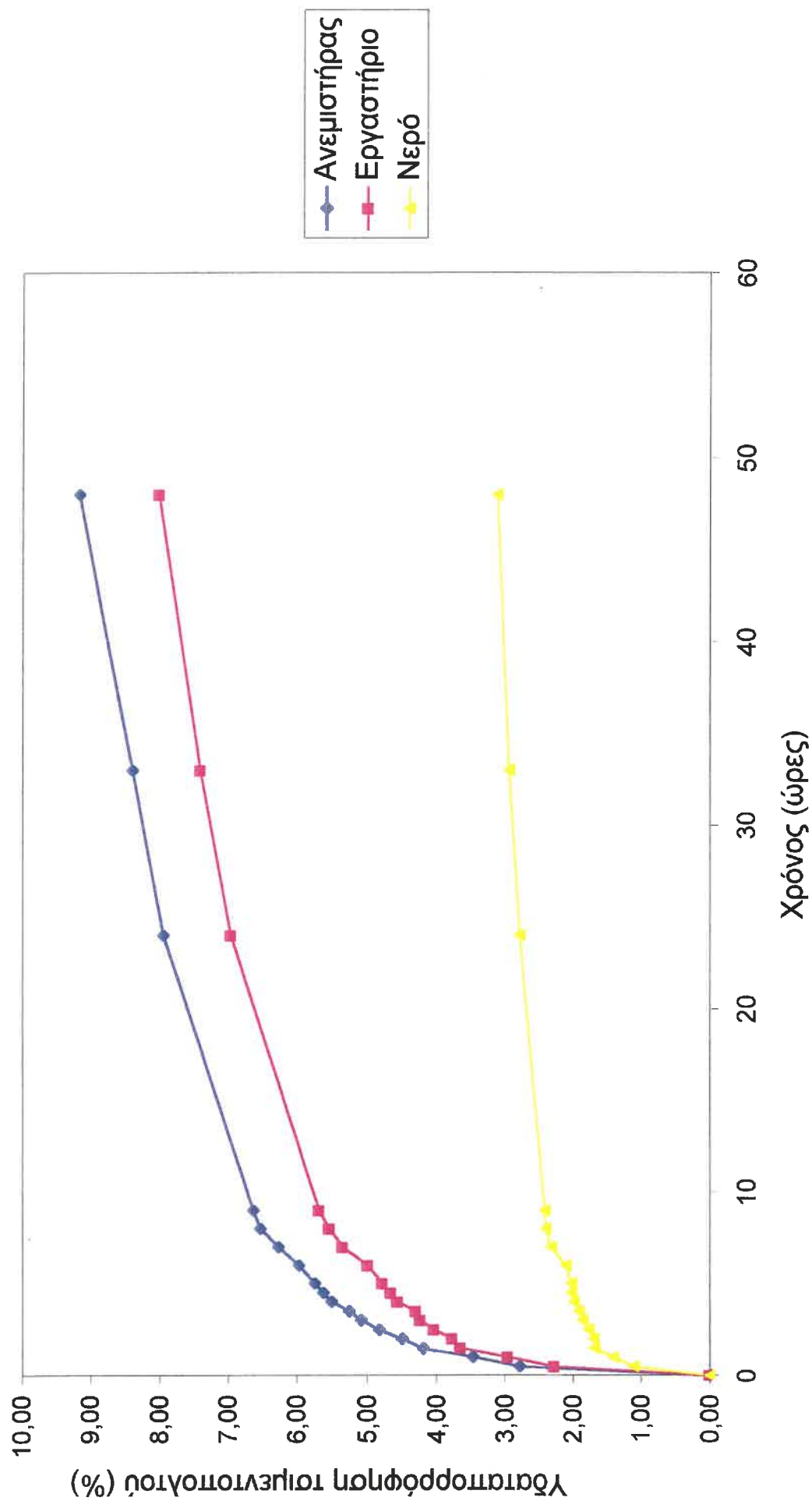
Σχ. 4.10 Υδαταπορρόφηση τιμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Ανάμειγμα 61 - II35/0,45



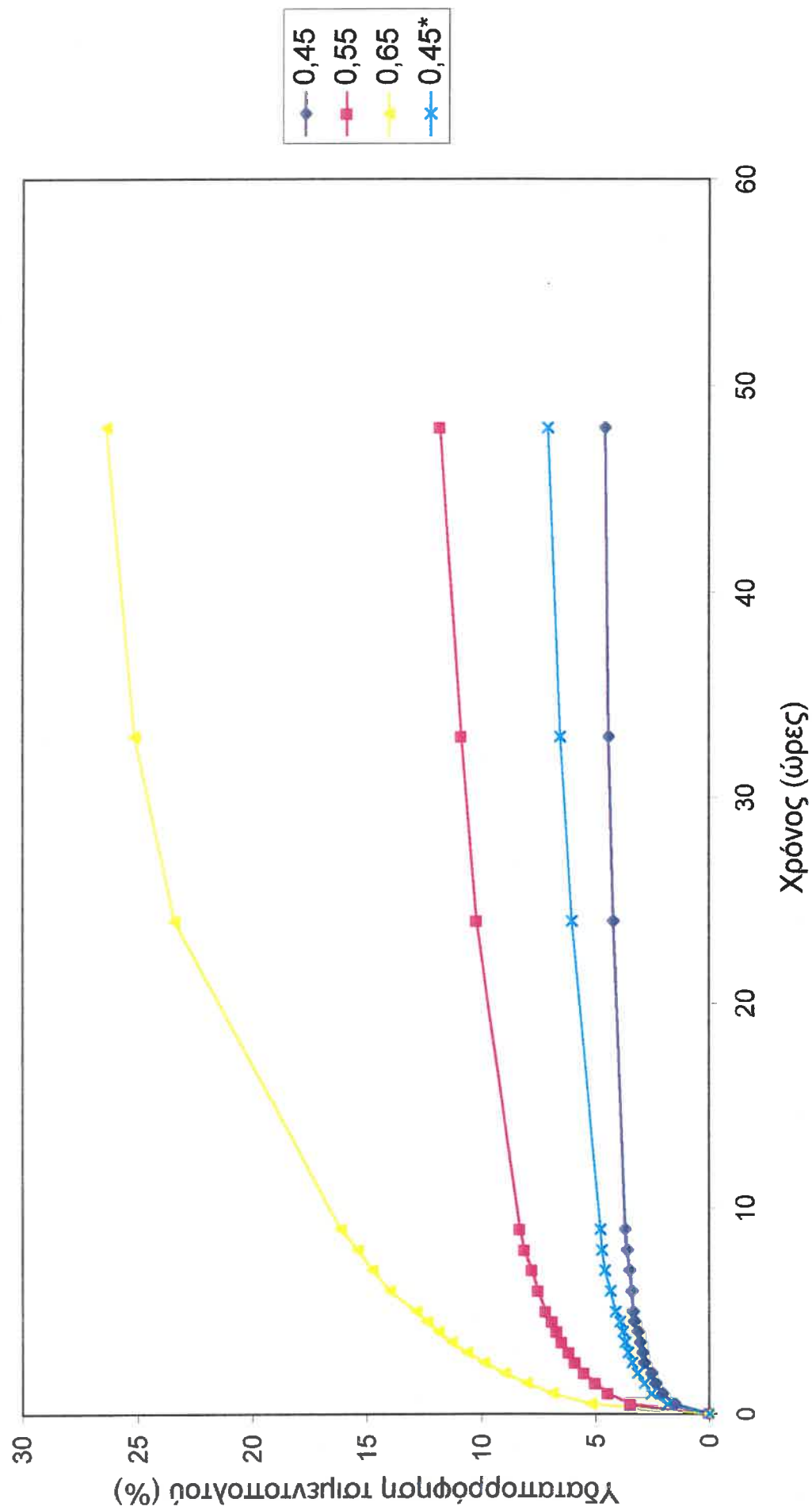
ΣΧ. 4.11 Υδατορρόφηση τσιμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Ανάμειγμα 63 - II35/0,45*



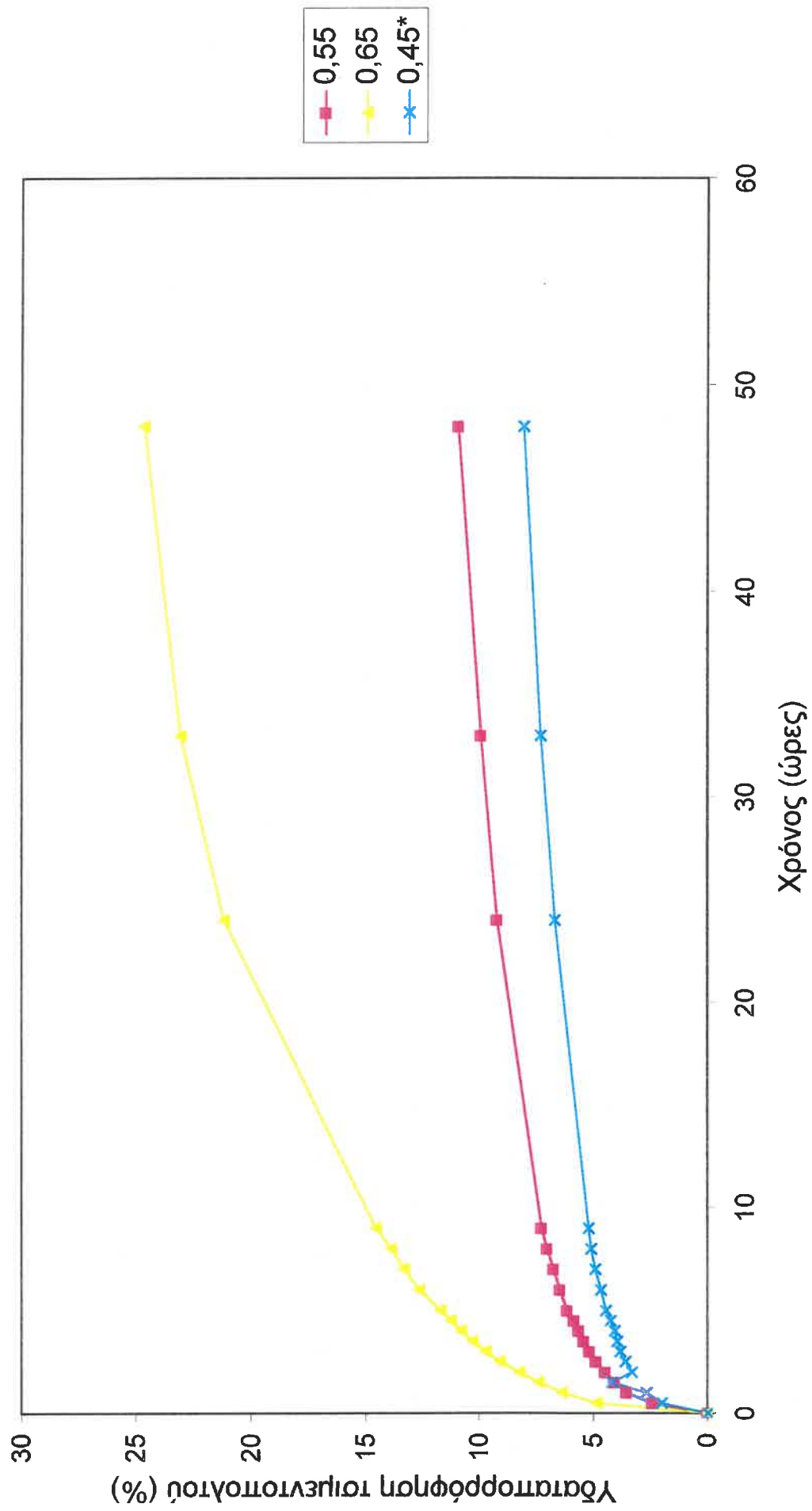
Σχ. 4.12 Υδαταπορρόφηση τσιμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Τσιμέντο Ι45-Ανεμιστήρας



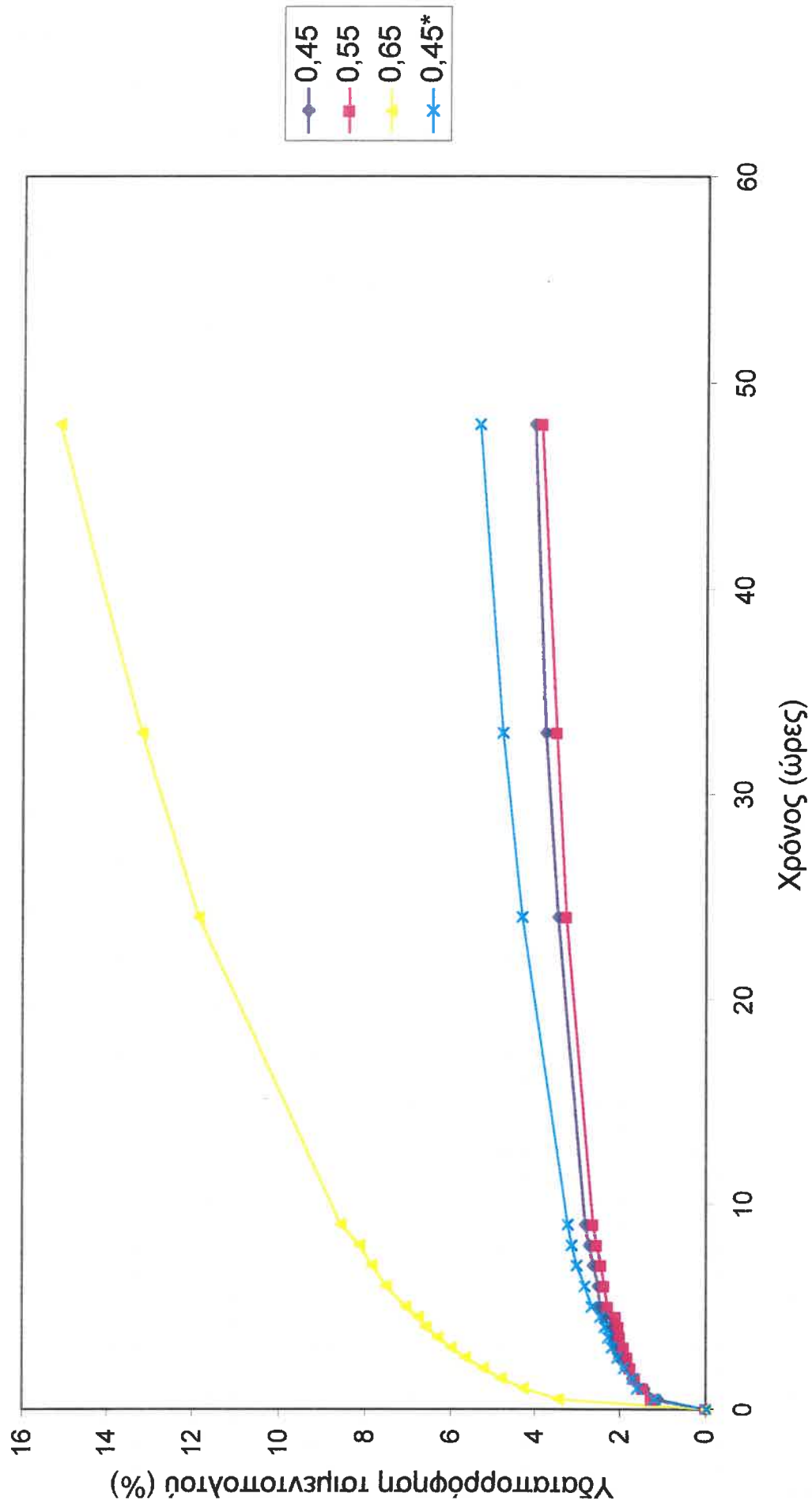
Σχ. 4.13 Υδαταπορρόφηση τσιμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Τσιμέντο Ι 45 - Εργαστήριο



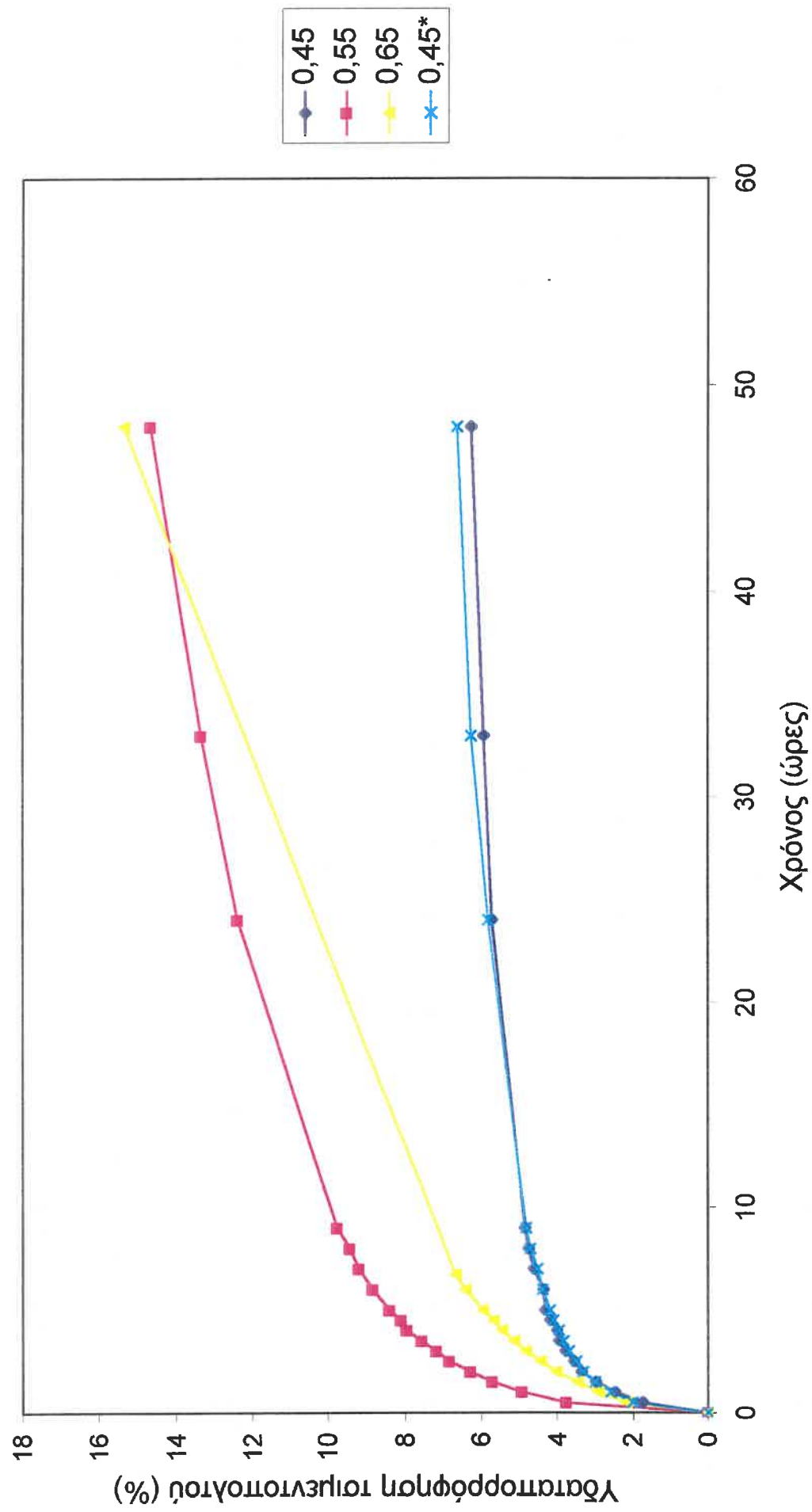
Σχ. 4.14 Υδαταπορρόφηση τσιμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Τσιμέντο Ι 45 - Νερό



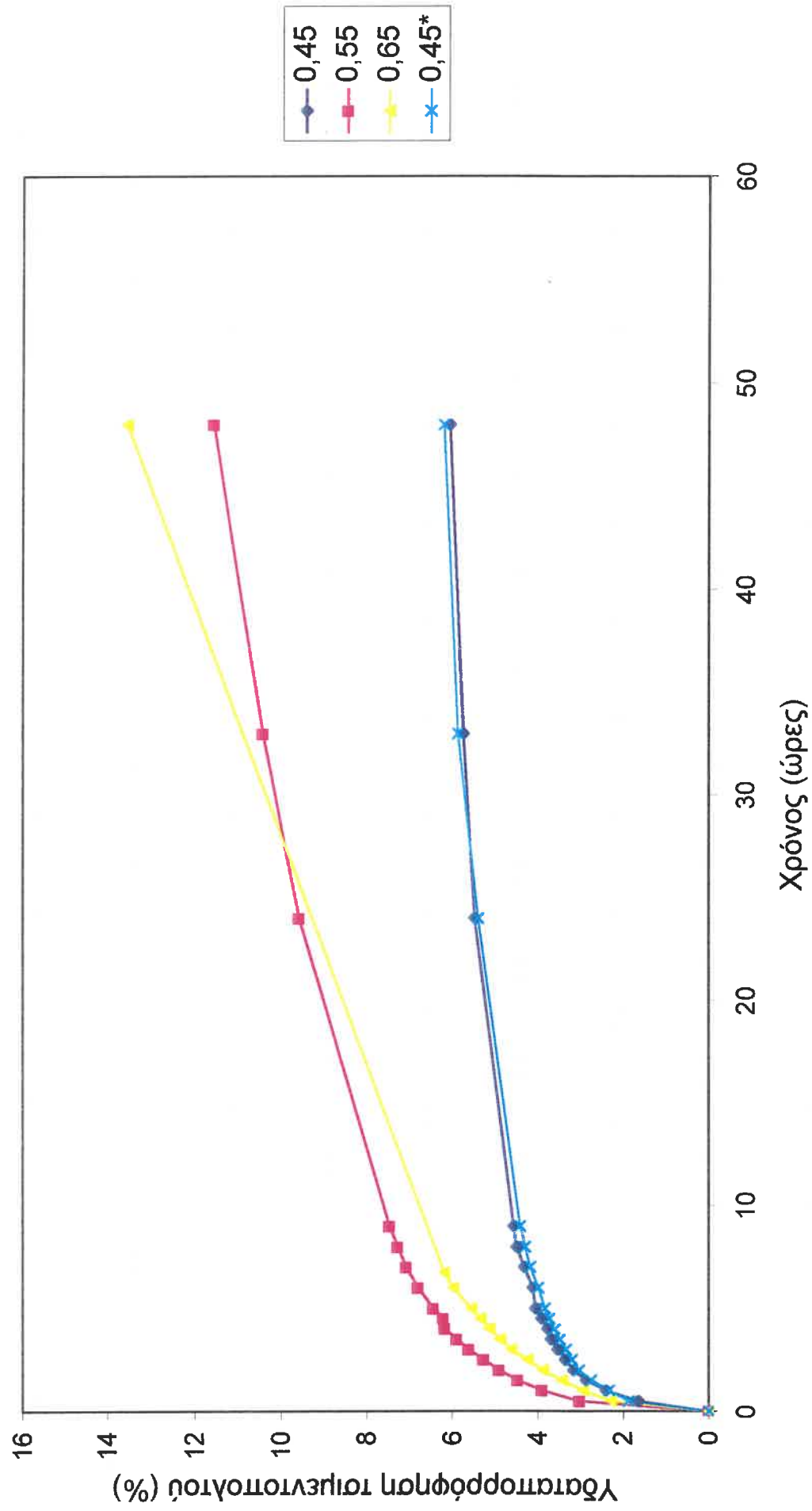
Σχ. 4.15 Υδαταπορρόφηση τσιμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Τσιμέντο ΙΙ45-Ανεμιστήρας



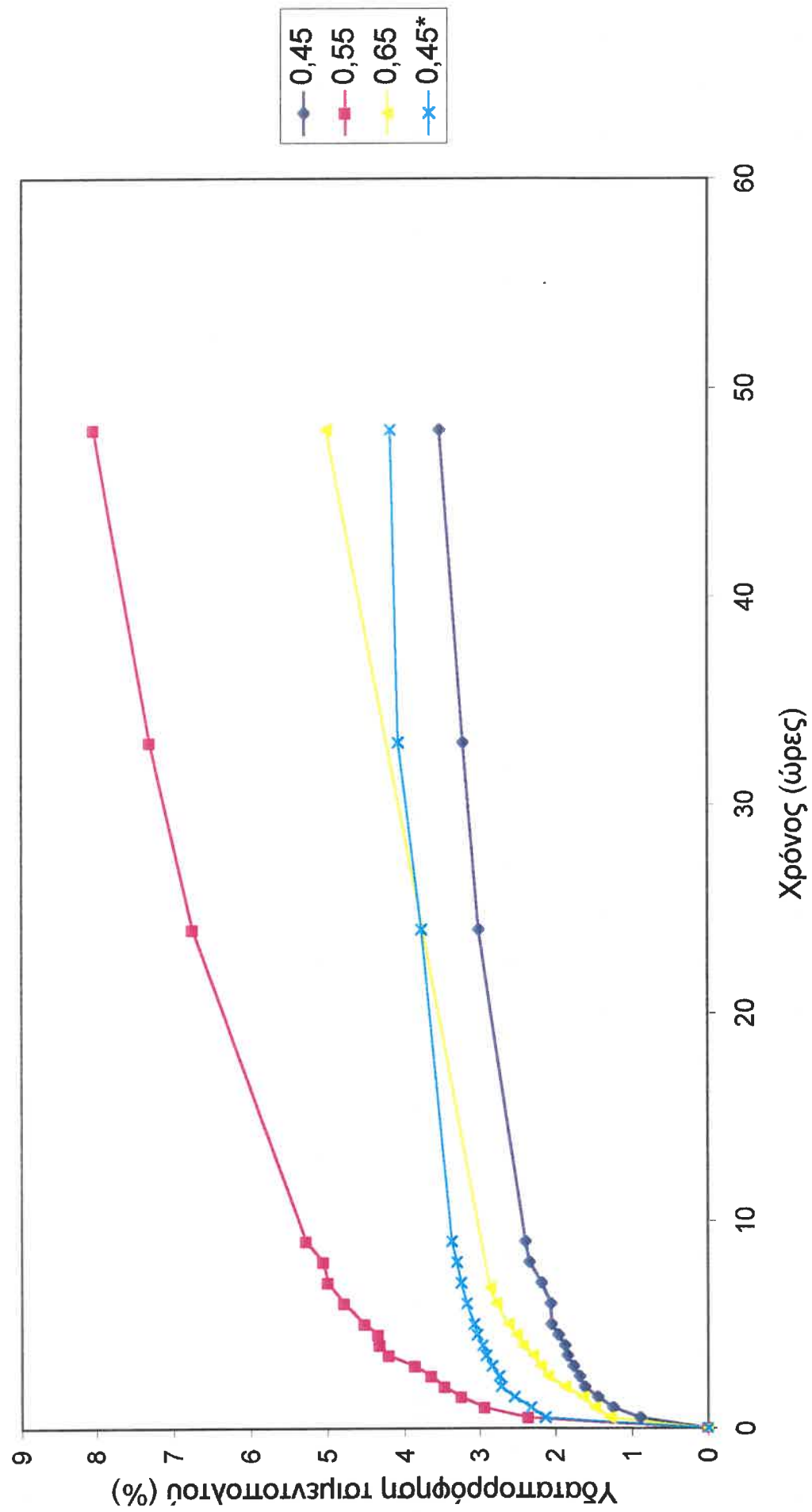
Σχ. 4.16 Υδατορρόφηση τσιμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Τσιμέντο ΙΙ 45 - Εργαστήριο



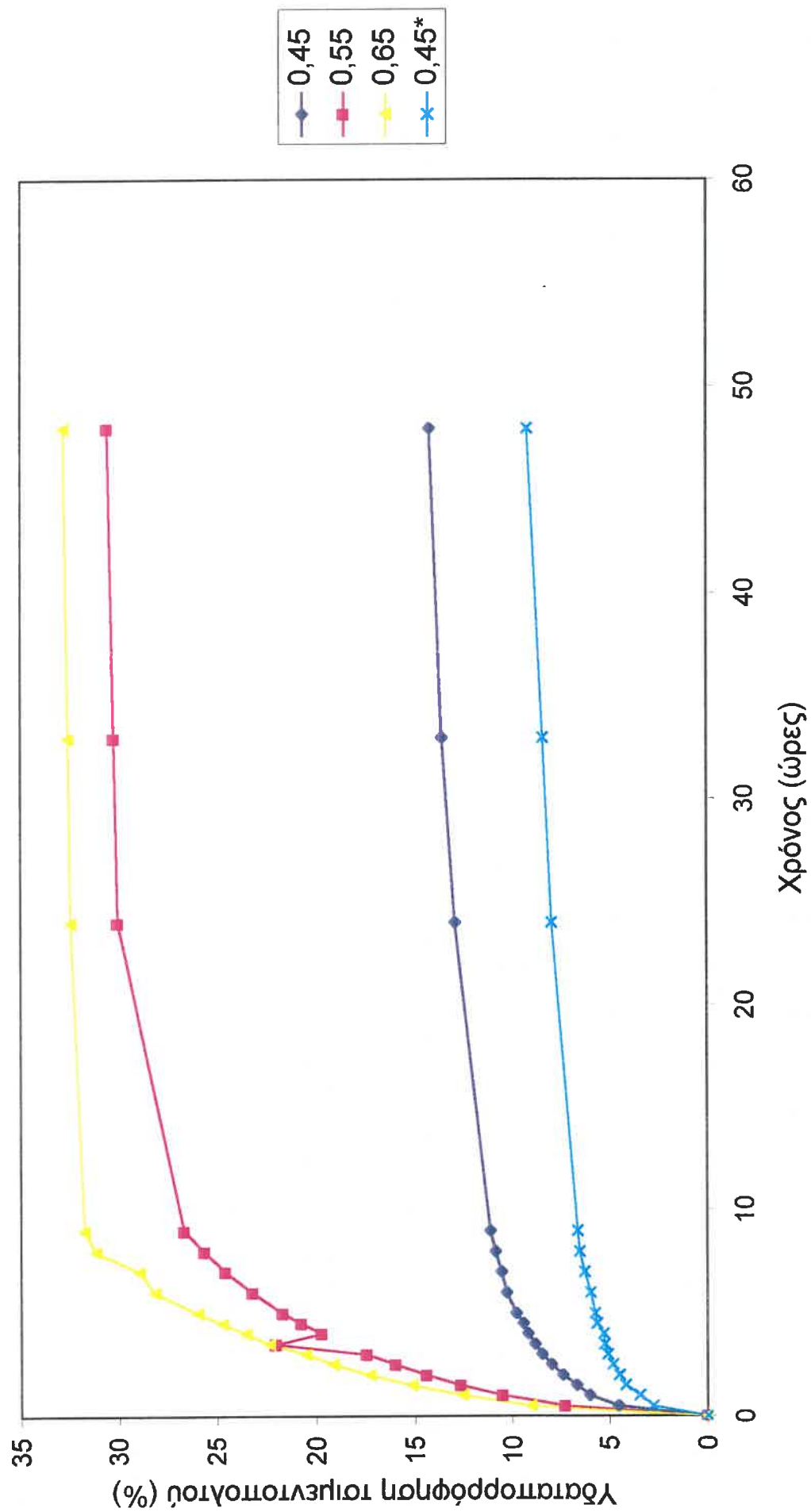
ΣΧ. 4.17 Υδαταπορρόφηση τσιμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Τσιμέντο ΙΙ 45 - Νερό



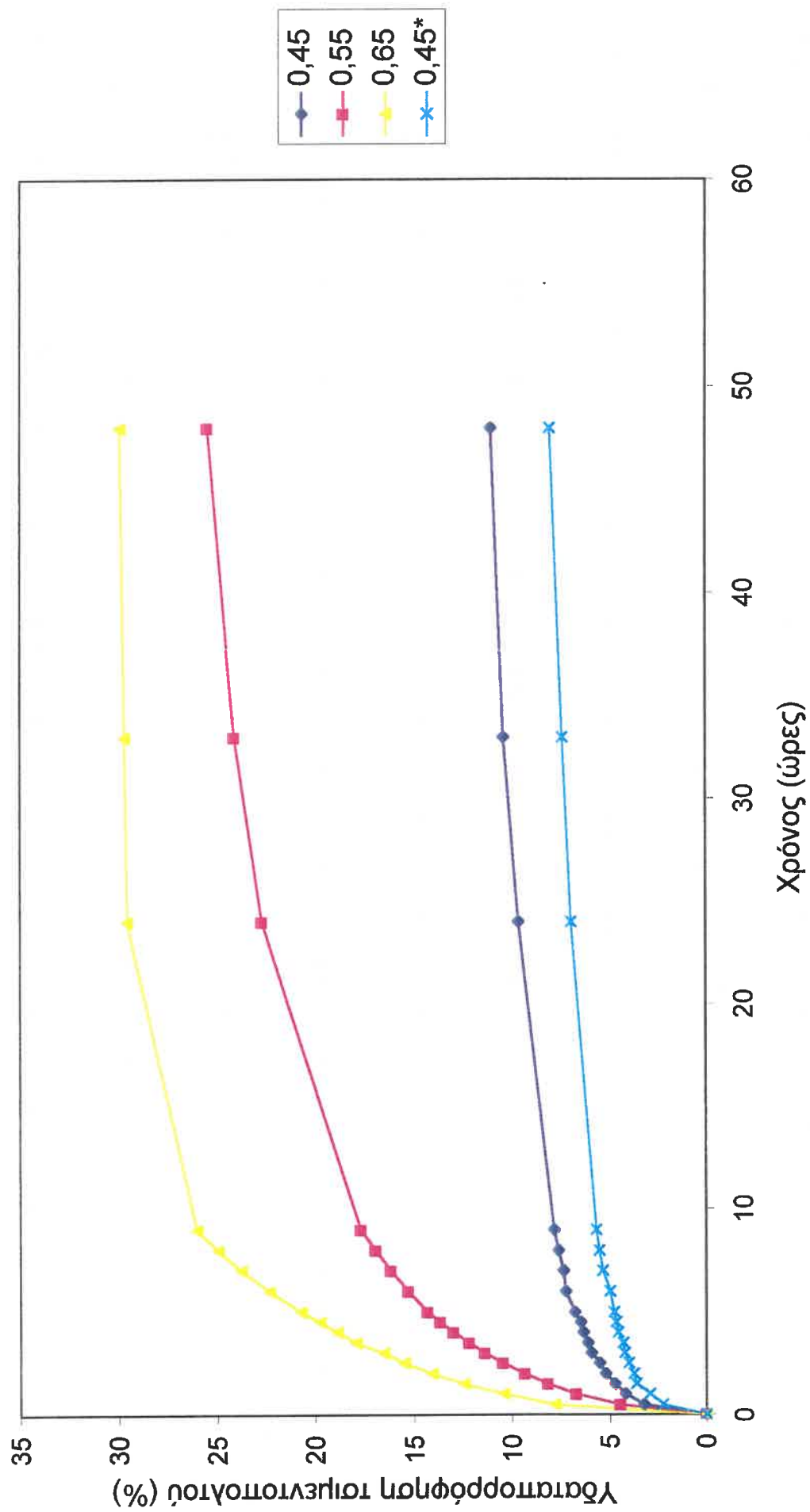
Σχ. 4.18 Υδαταπορρόφηση τσιμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Τσιμέντο ΙΙ35-Ανεμιστήρας



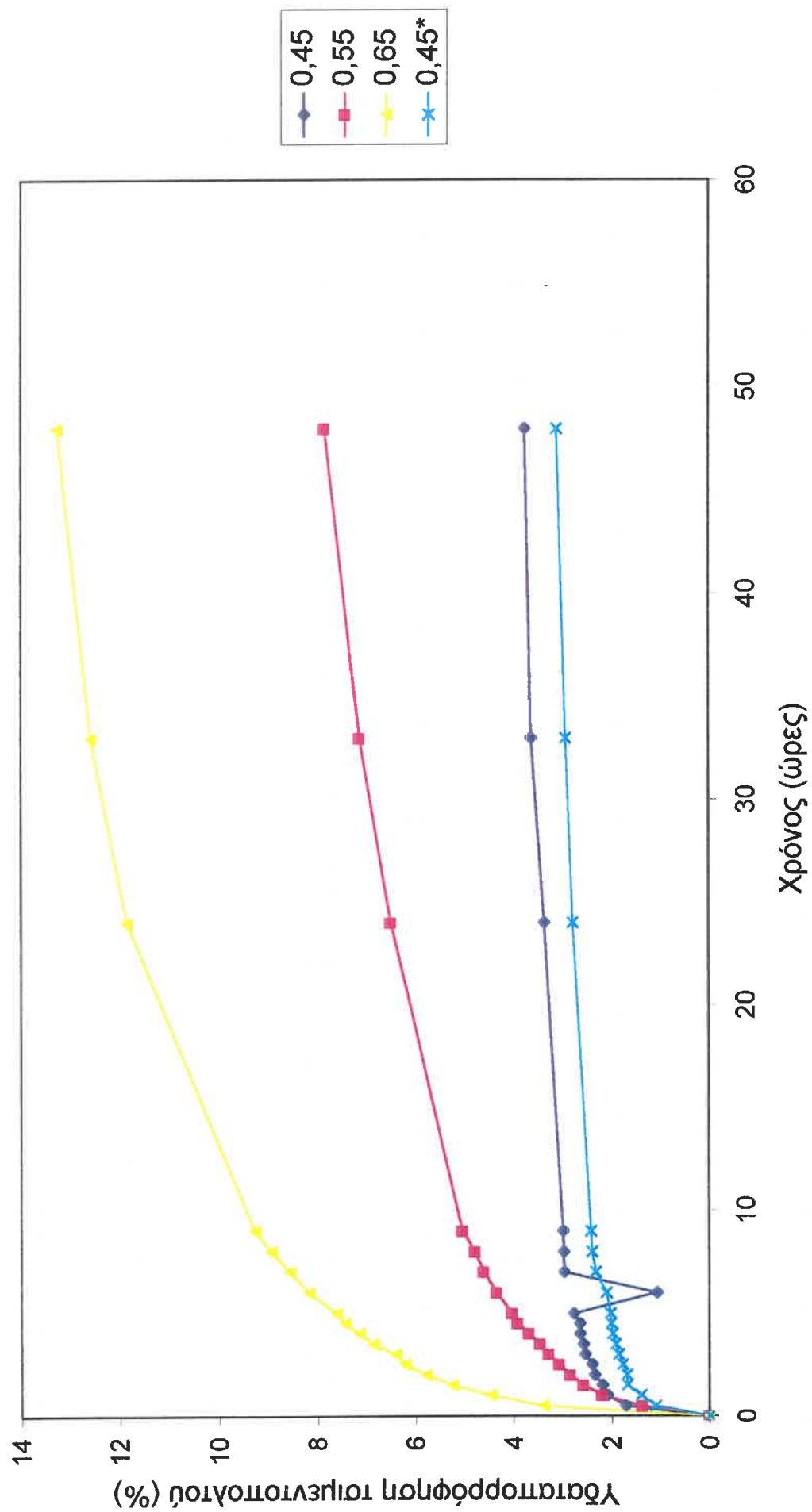
Σχ. 4.19 Υδατορρόφηση τσιμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Τσιμέντο ΙΙ 35 - Εργαστήριο



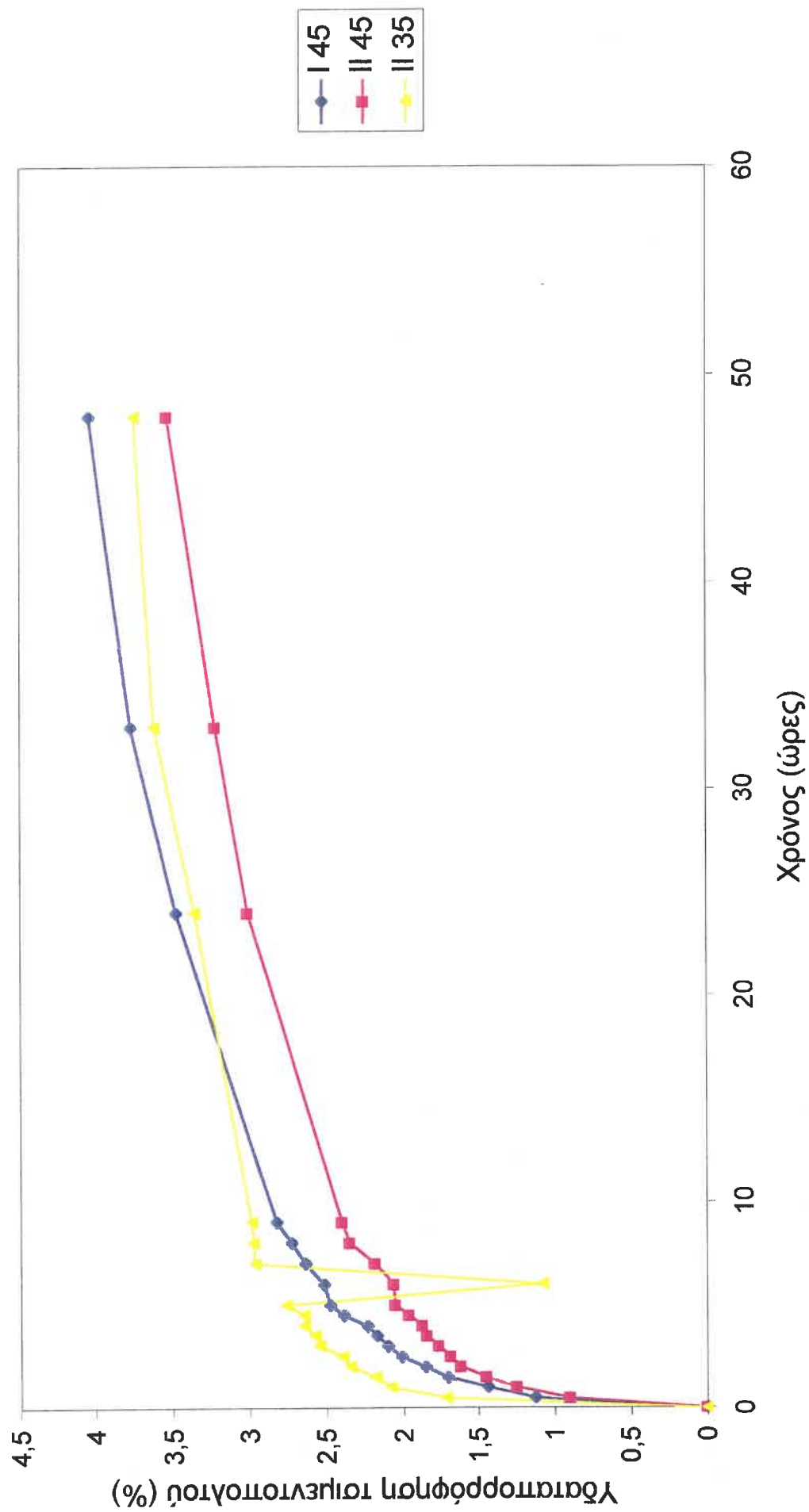
Σχ. 4.20 Υδαταπορρόφηση τσιμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Τσιμέντο ΙΙ 35 - Νερό



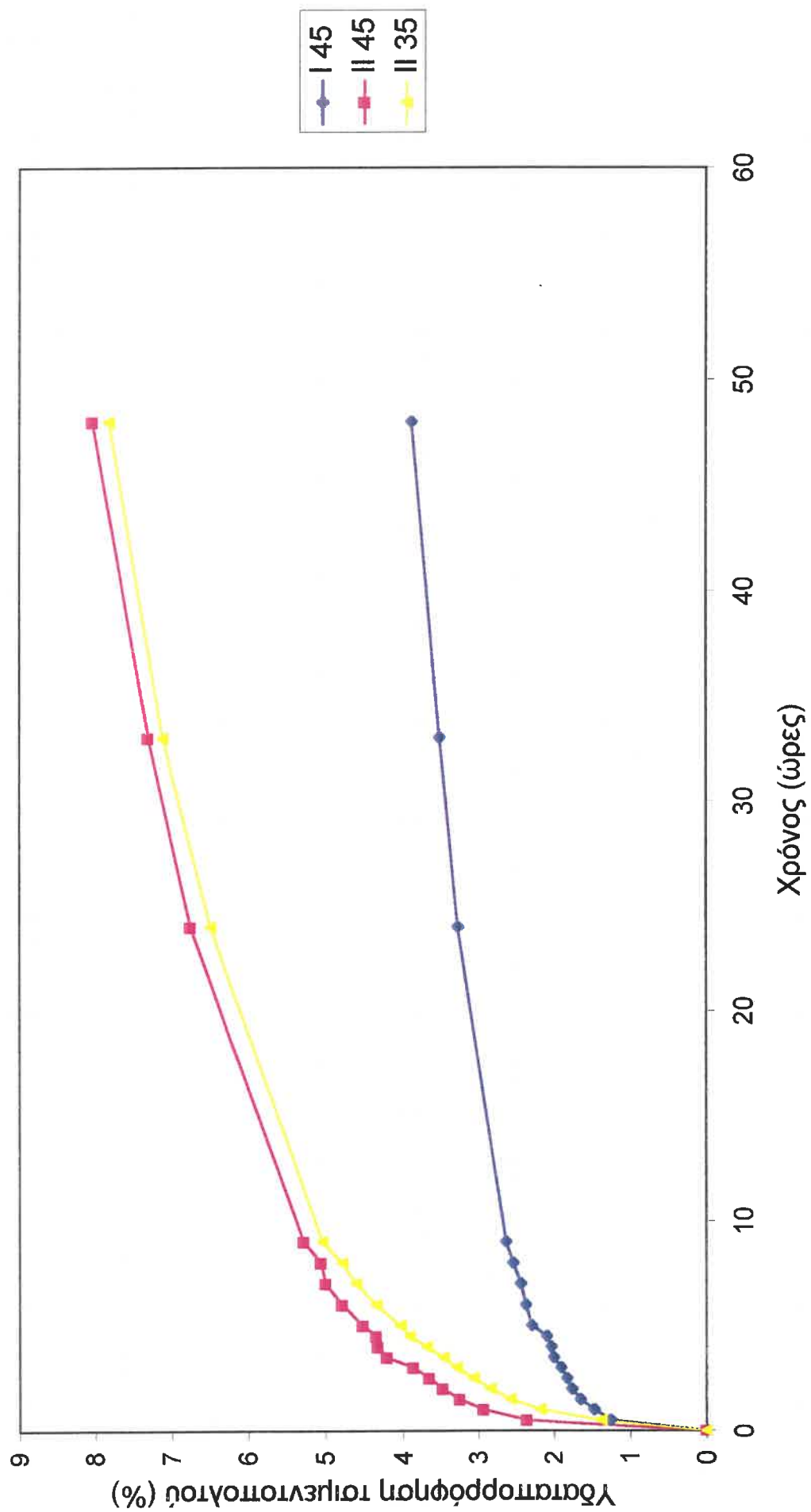
Σχ. 4.21 Υδατορρόφηση τσιμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Λόγος $N/T=0,45$ - Νερό



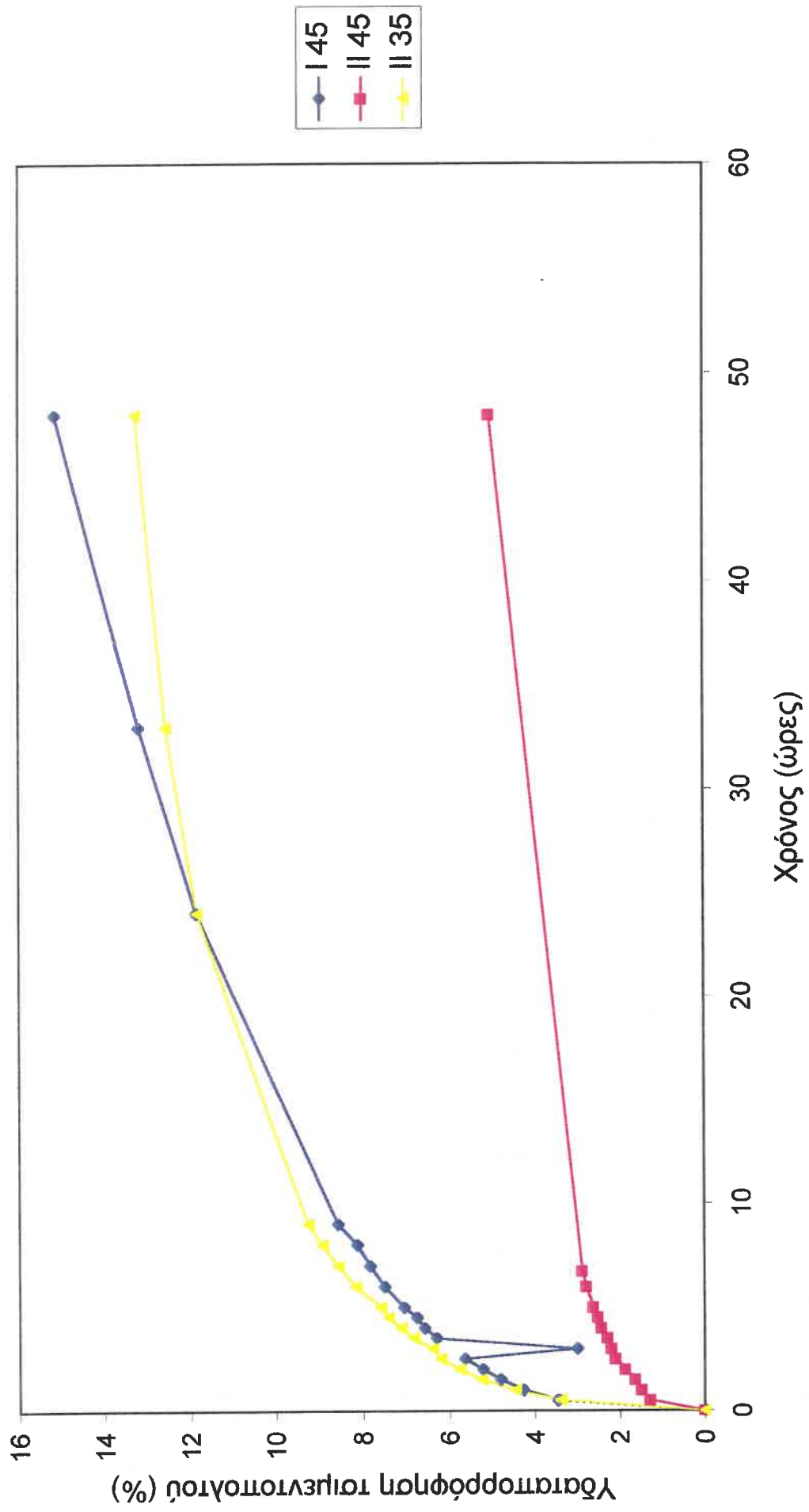
ΣΧ 4.22 Υδατορρόφηση τιμμενοπολιτού συναρτήσει του χρόνου

Λόγος $N/T=0,55$ - Νερό



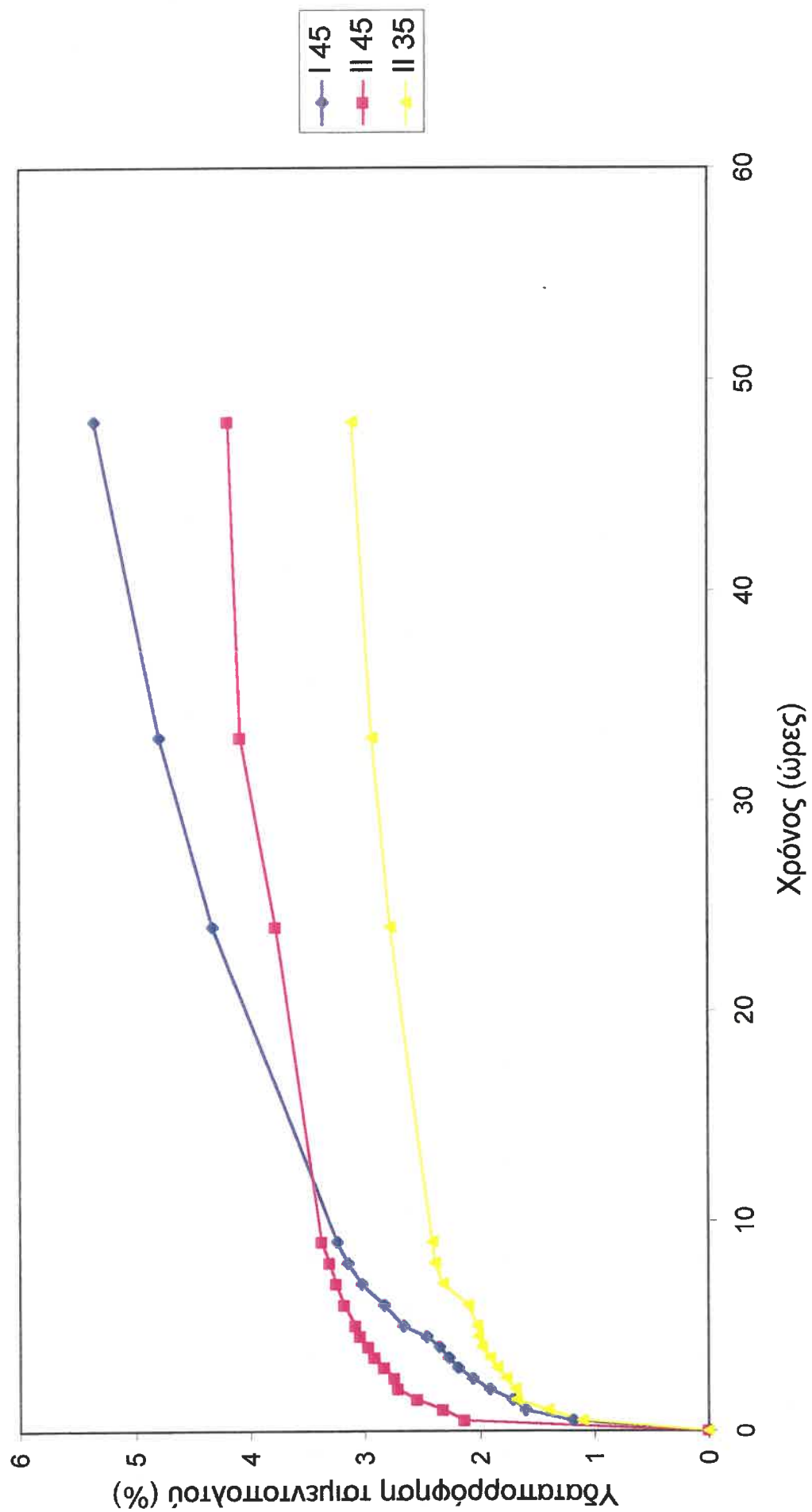
Σχ. 4.23 Υδατορρόφηση τιμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Λόγος $N/T=0,65$ - Νερό



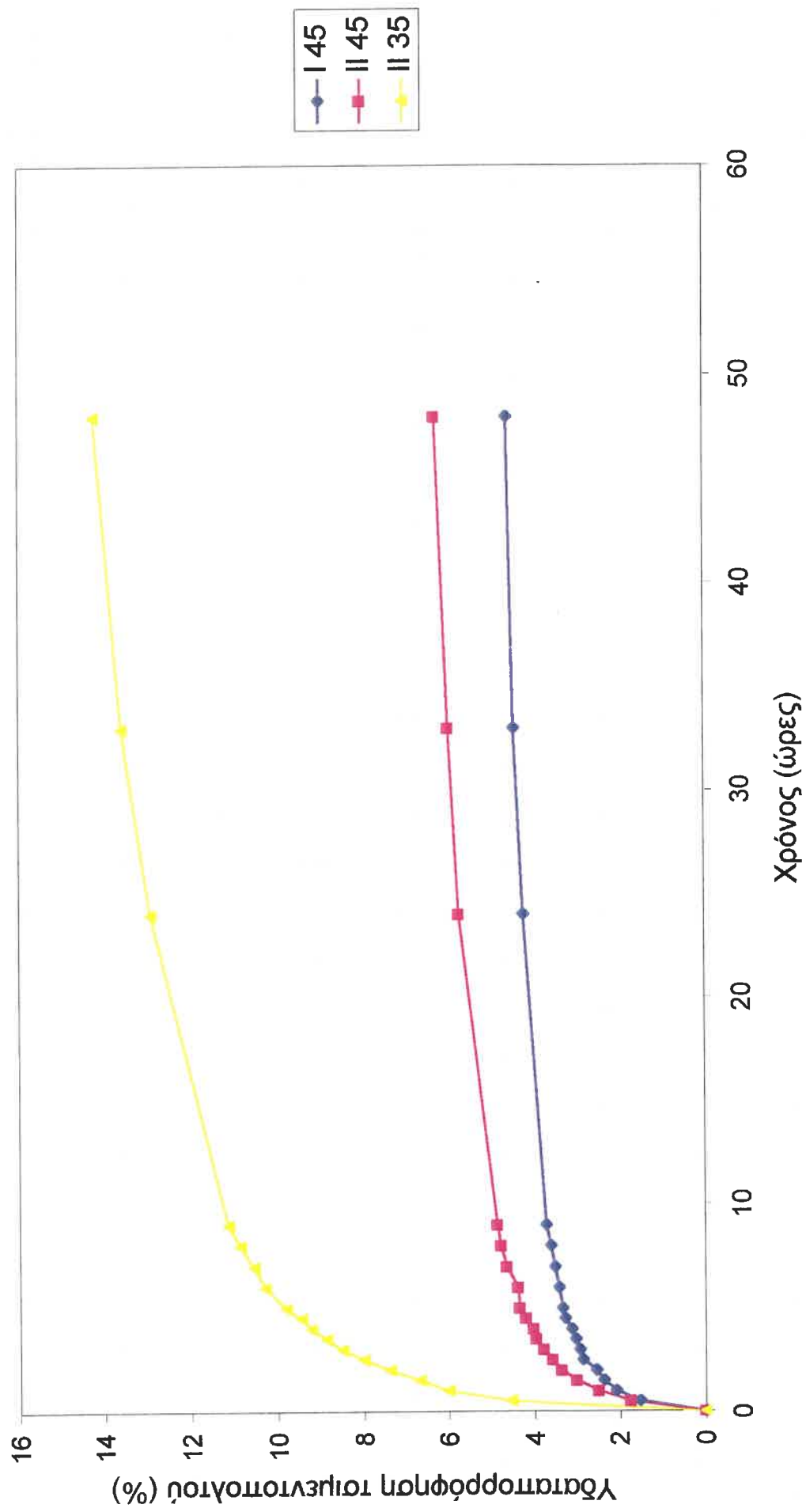
Σχ. 4.24 Υδατορρόφηση τιμμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Λόγος $N/T=0,45^*$ - Νερό



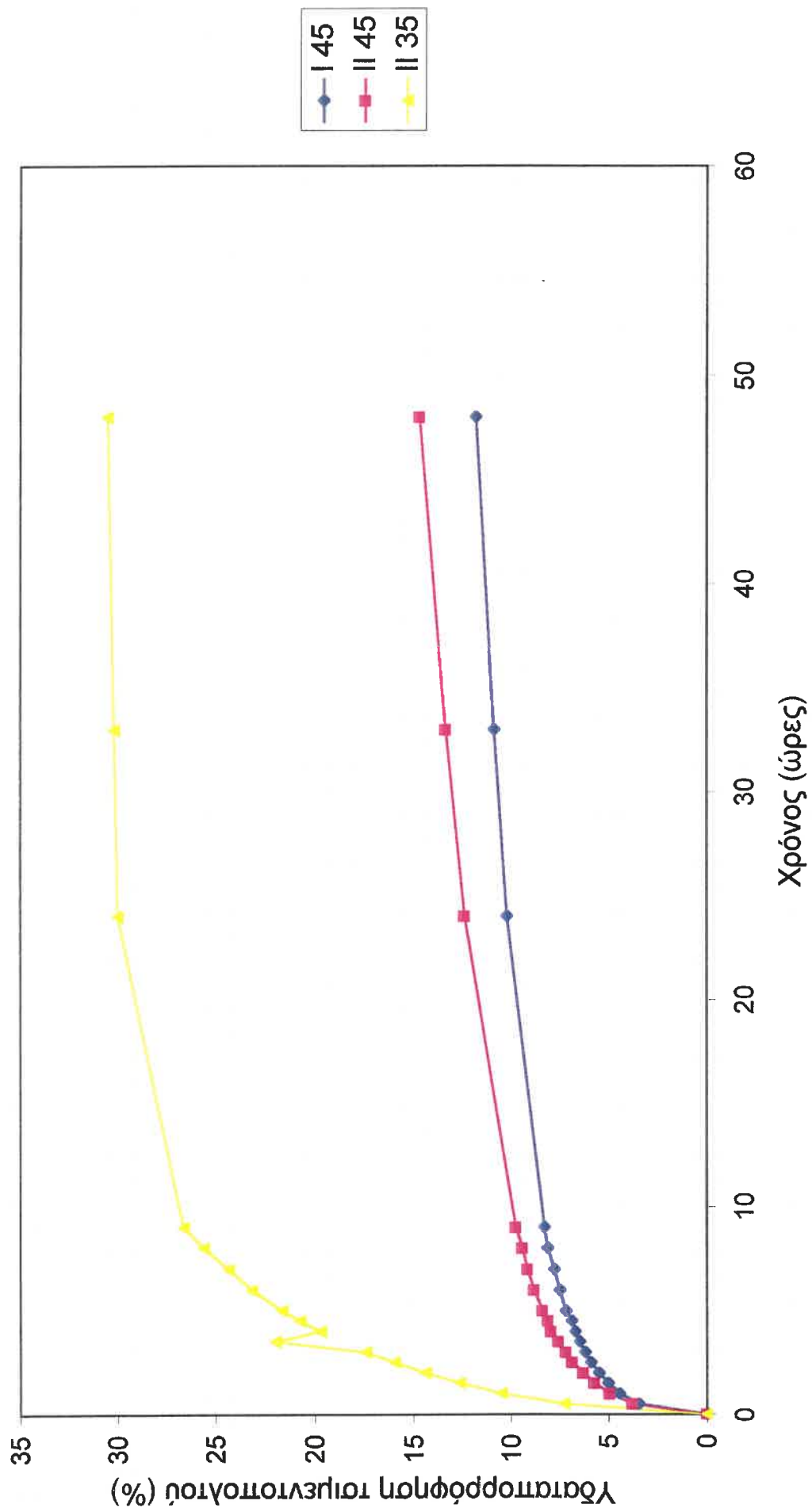
Σχ. 4.25 Υδατορρόφιση τιμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Λόγος $N/T=0,45$ - Ανεμιστήρας



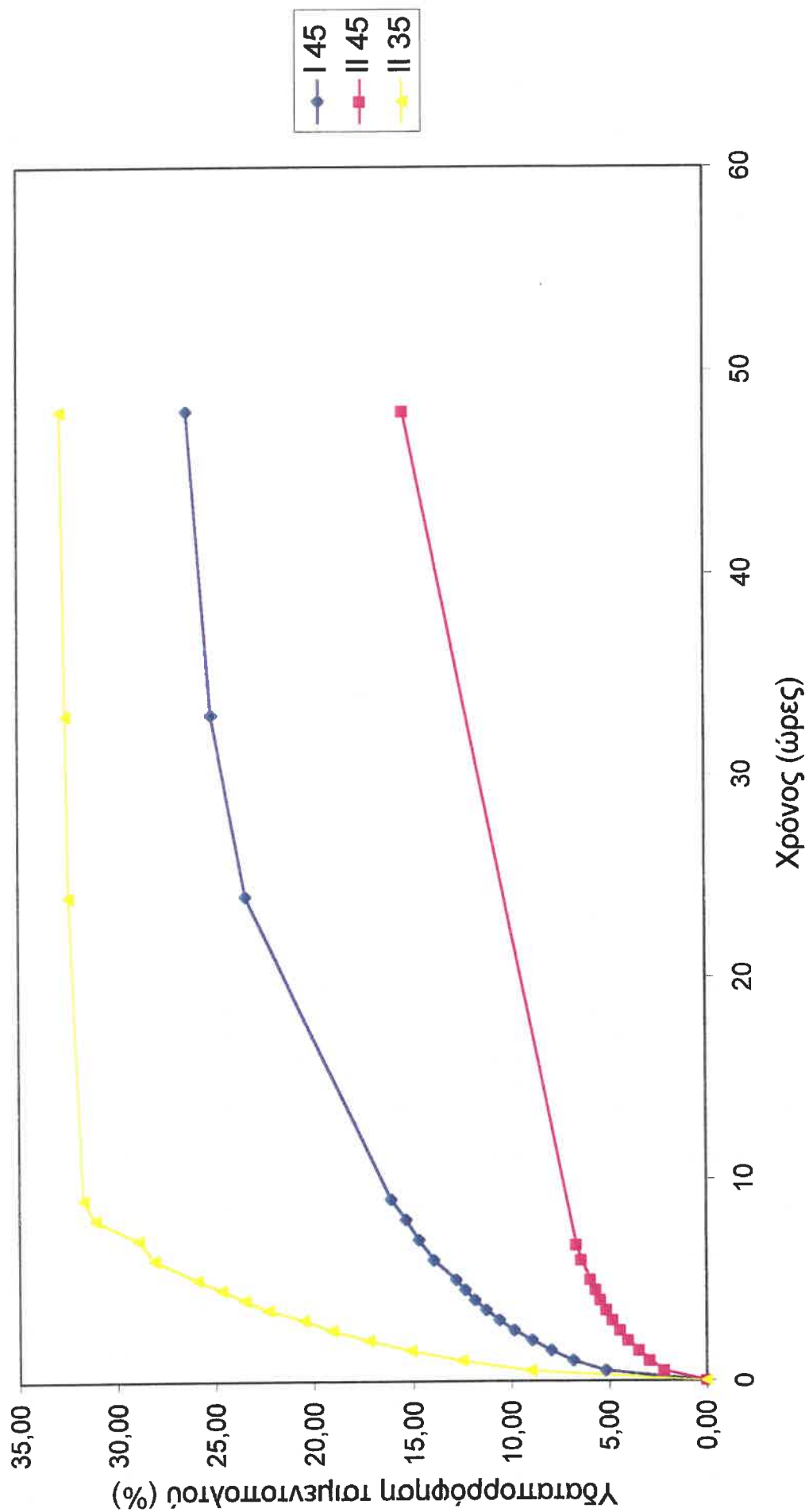
Σχ. 4.26 Υδατορρόφηση τιμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Λόγος $N/T=0,55$ - Ανεμιστήρας



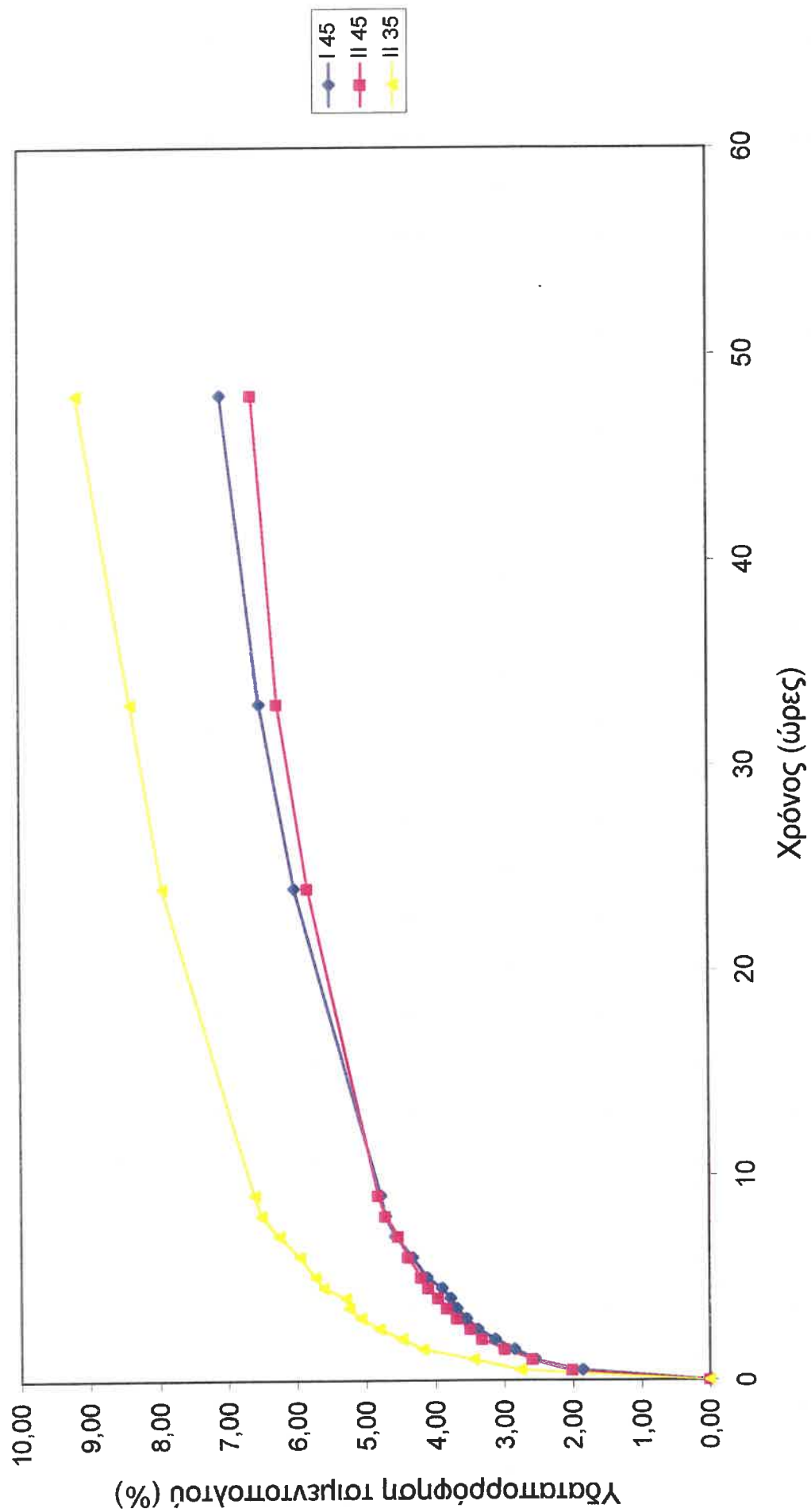
Σχ. 4.27 Υδατορρόφηση τιμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Λόγος $N/T=0,65$ - Ανεμιστήρας



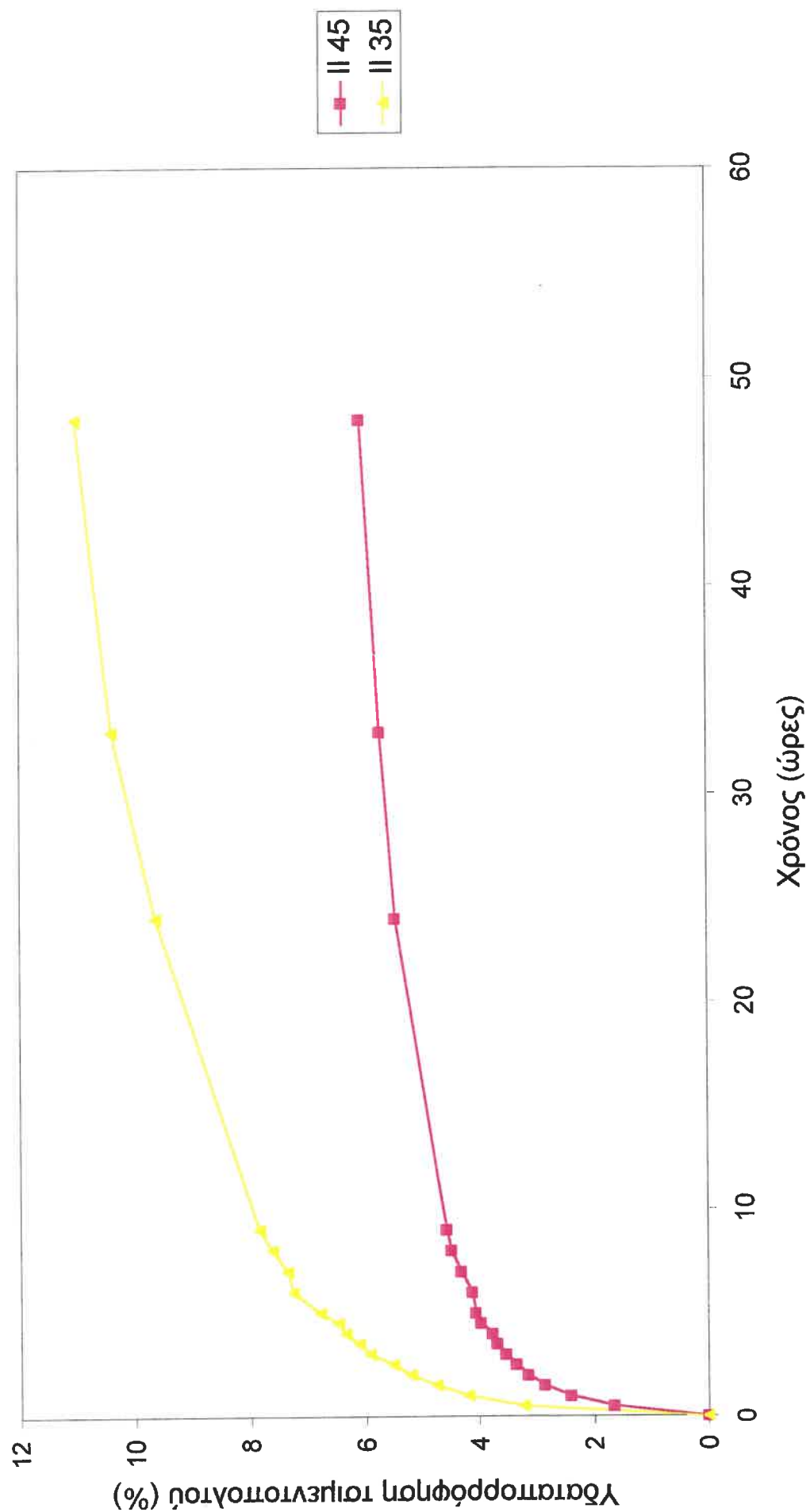
ΣΧ. 4.28 Υδατορρόφηση τιμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Λόγος $N/T=0,45^*$ - Ανεμιστήρας



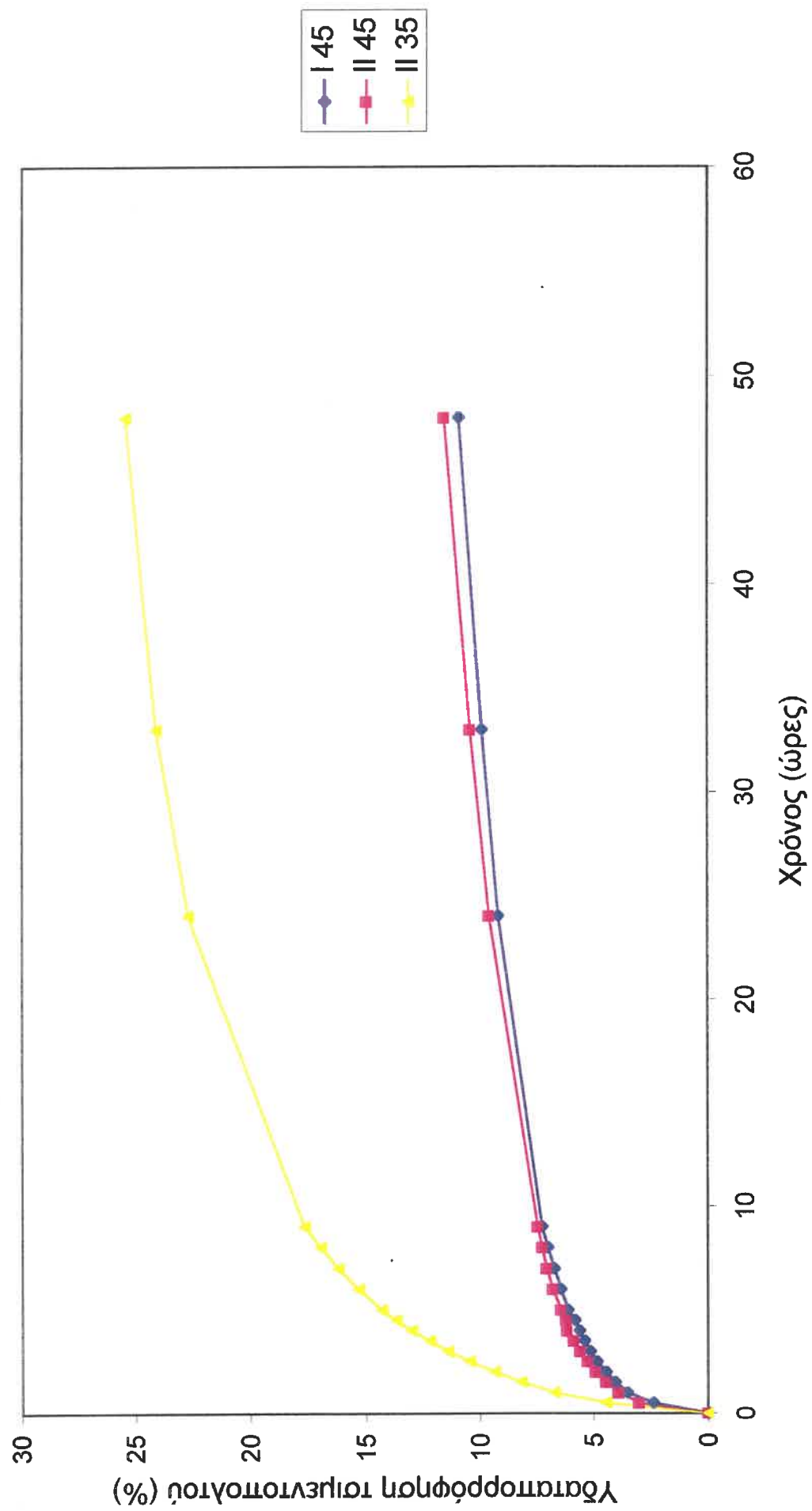
Σχ. 4.29 Υδατορρόφηση τιμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Λόγος $N/T=0,45$ - Εργαστήριο



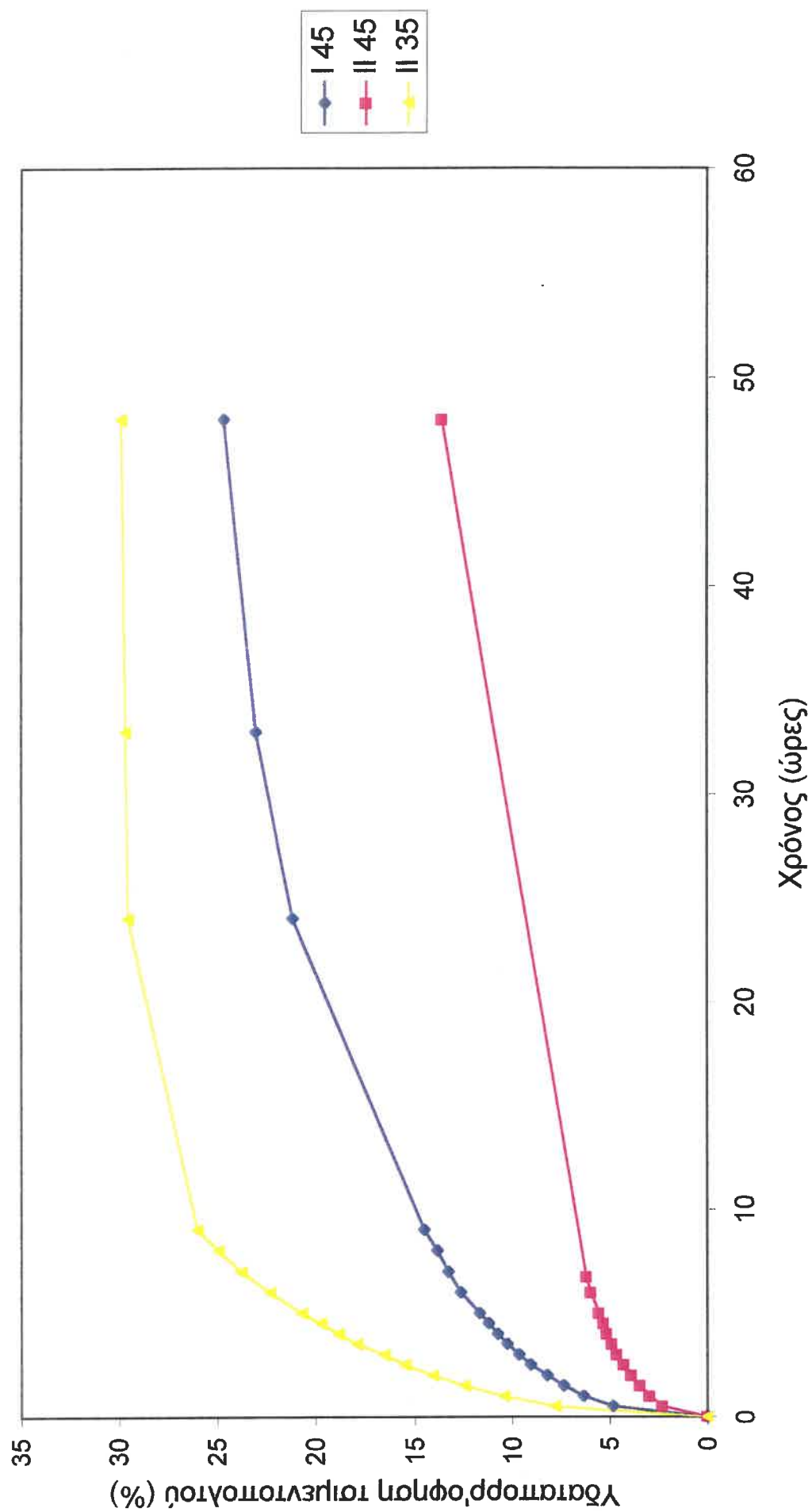
Σχ. 4.30 Υδατορρόφηση τιμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Λόγος $N/T=0,55$ - Εργαστήριο



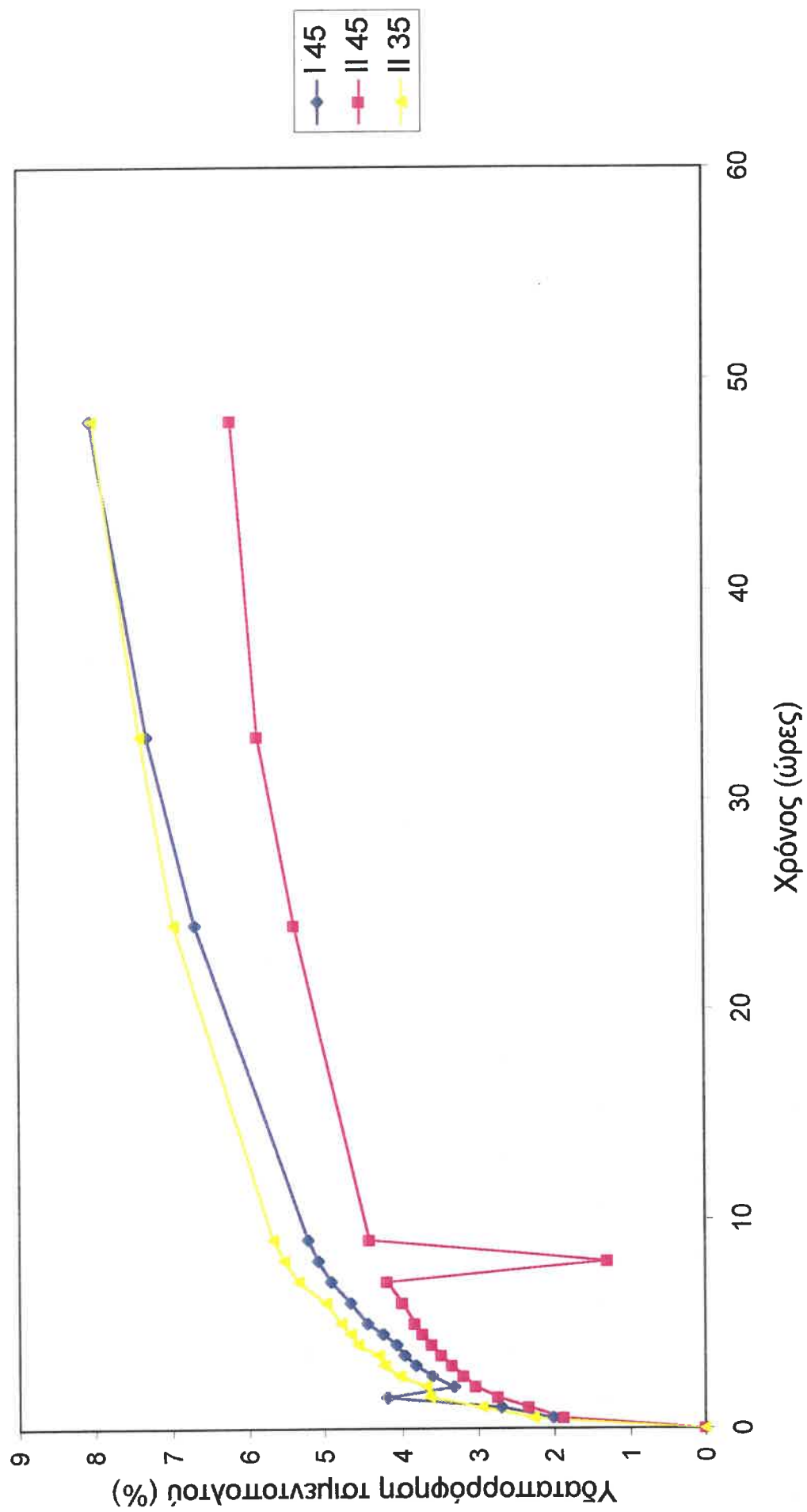
Σχ. 4.31 Υδατορρόφηση τσιμεντοπλάνου συναρτήσει του χρόνου

Λόγος $N/T=0,65$ - Εργαστήριο



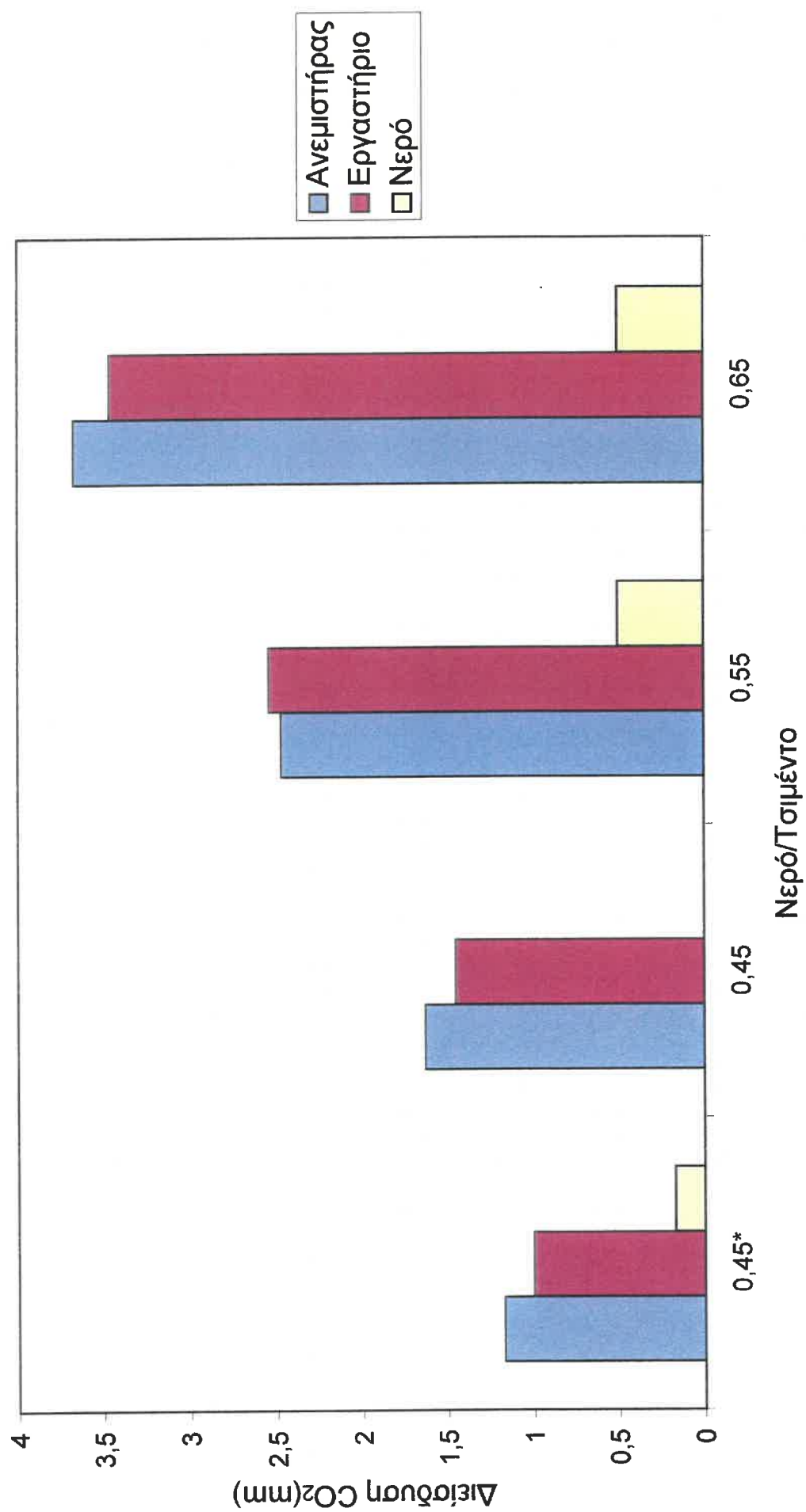
Σχ. 4.32 Υδατορρόφηση τιμεντοπολτού συναρτήσει του χρόνου

Λόγος $N/T=0,45^*$ - Εργαστήριο



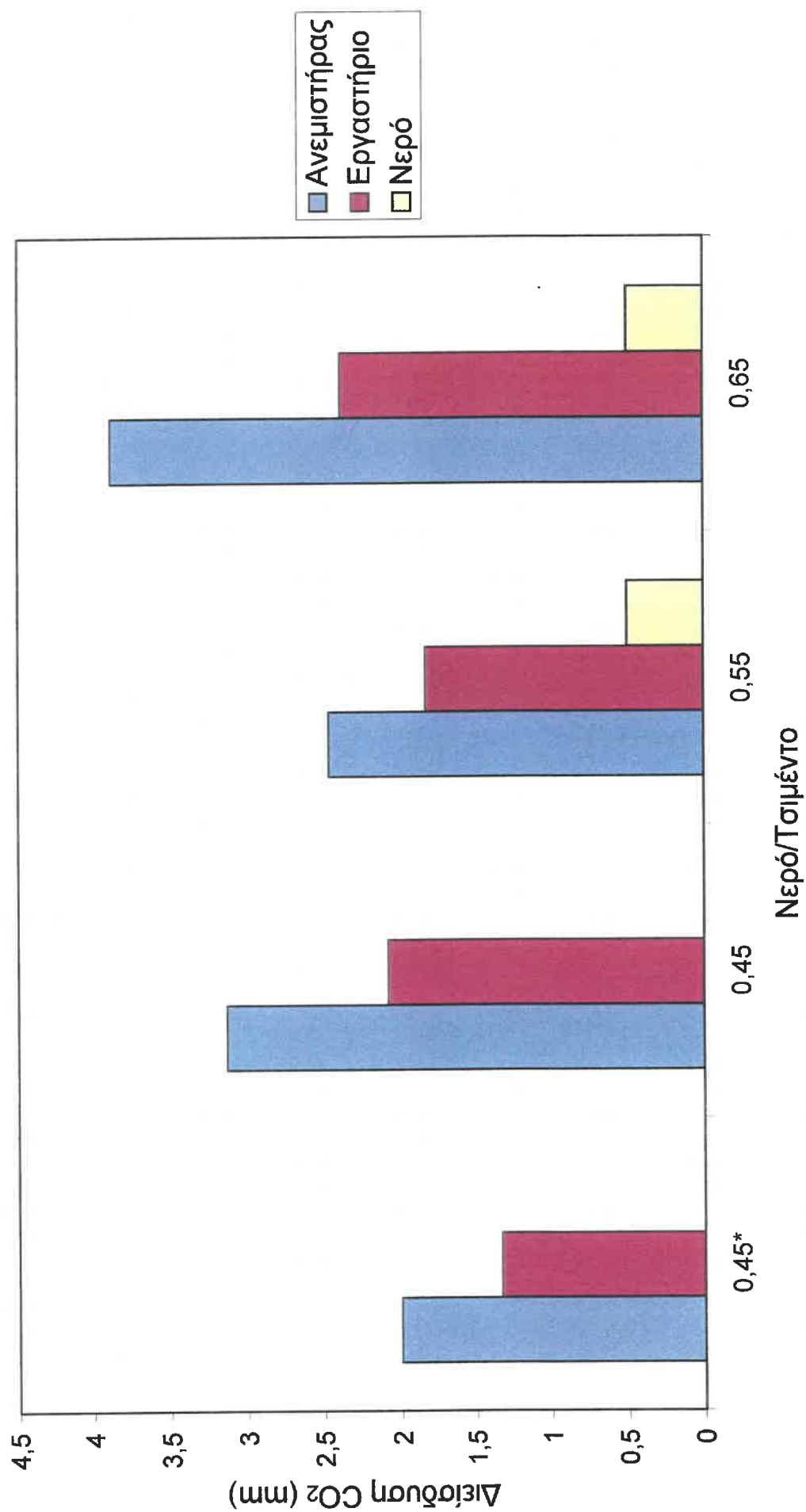
ΣΧ. 4.33 Υδατορρόφηση τιμεντοπολιού συναρτήσει του χρόνου

Τσιμέντο Ι 45



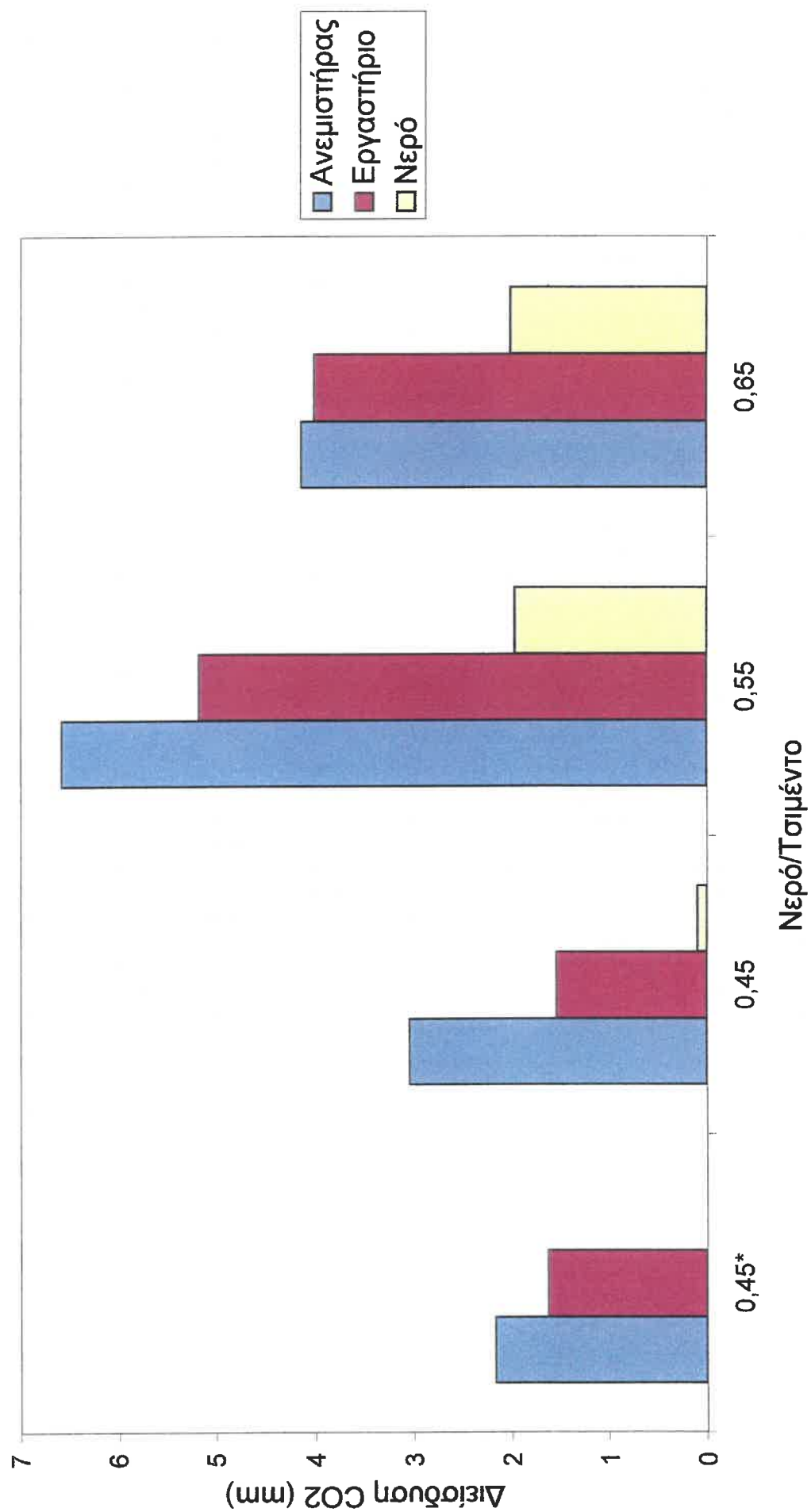
Σχ. 4.34 Διείσδυση CO₂ συναρτήσει του λόγου Ν/Τ

Τσιμέντο II 45



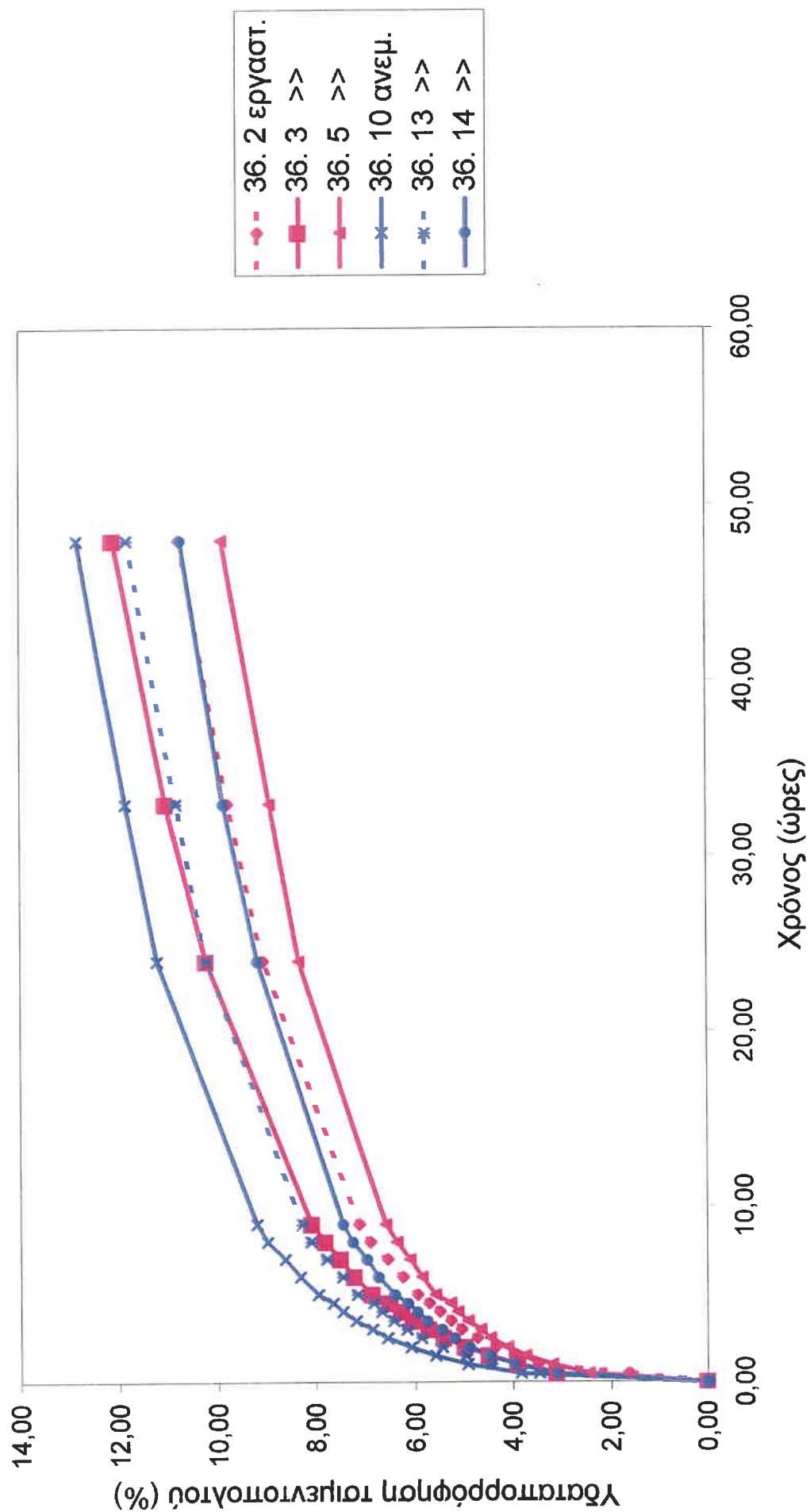
Σχ. 4.35 Διείσδυση CO₂ συναρτήσει του λόγου N/T

Τσιμέντο ΙΙ 35



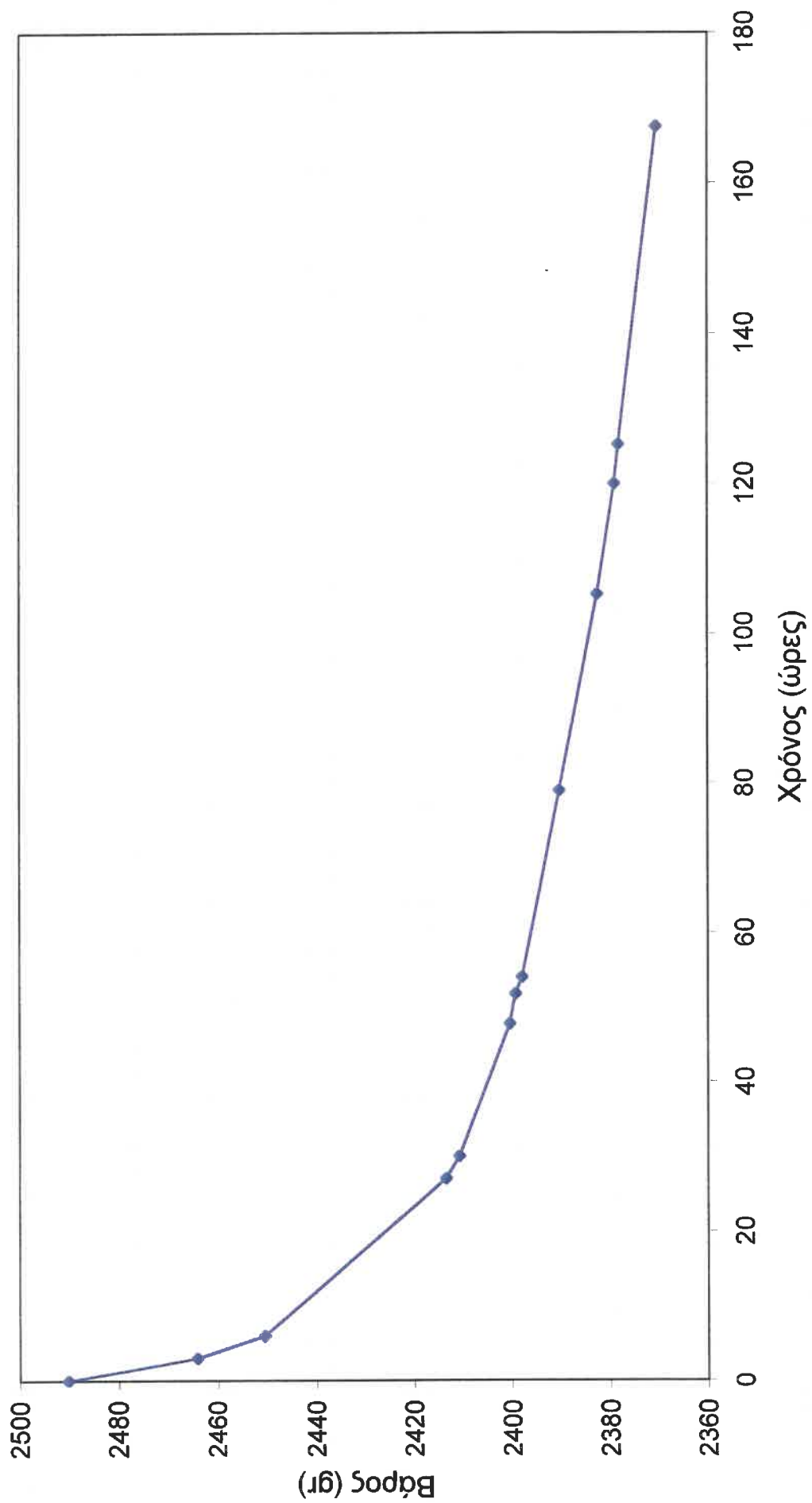
Σχ. 4.36 Διείσδυση CO₂ συναρτήσει του λόγου Ν/Τ

Ανάμειγμα 36 - Ανεμιστήρας, Εργαστήριο



Σχ. 4.37 Μεταβολή υδατορρόφησης τιμεντοπολτού για τα δοκίμια του εργαστηρίου και του ανεμιστήρα

Δοκιμαστικά δοκίμια

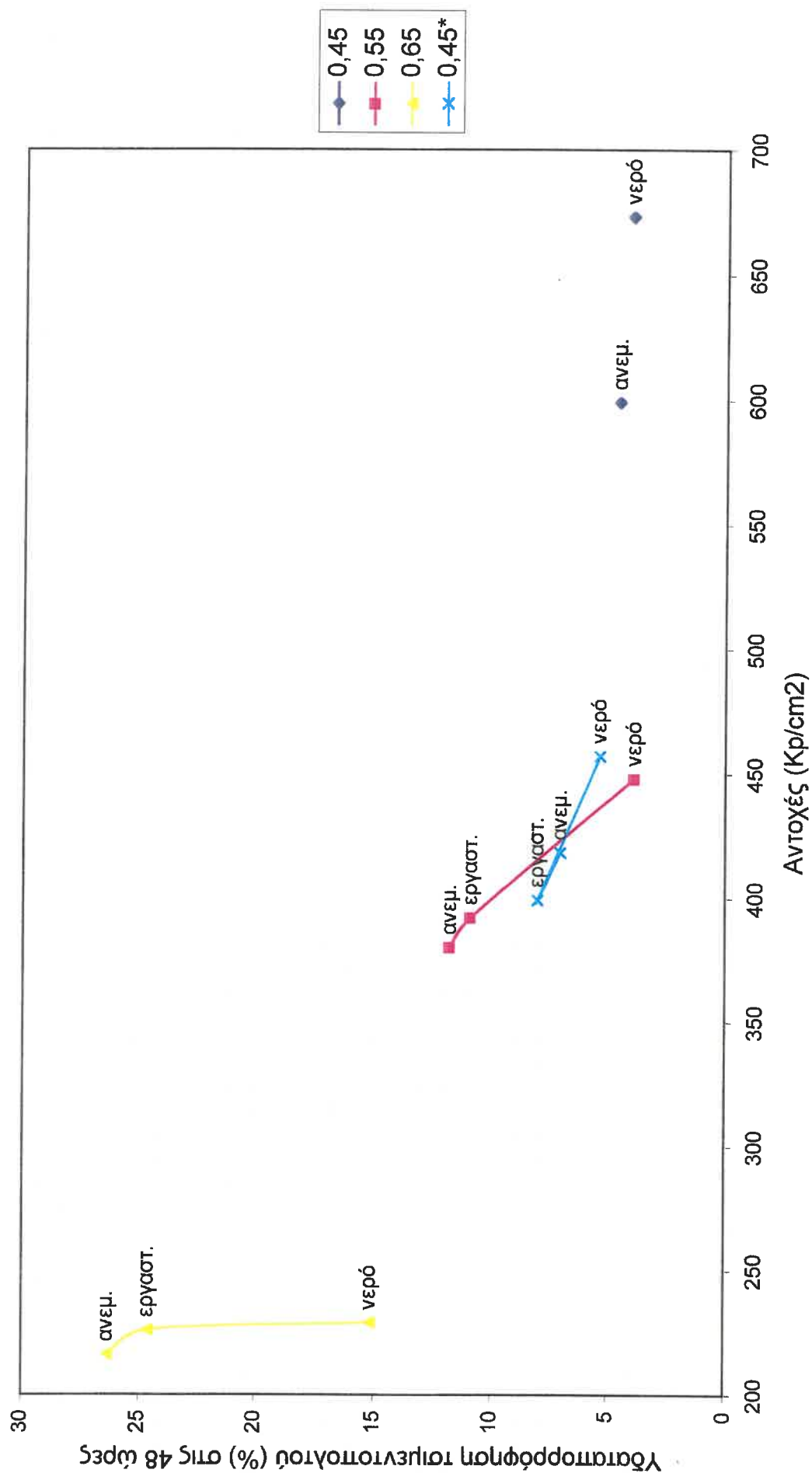


Σχ. 4.38 Μεταβολή βάρους λόγω ξήρανσης στο φούρνο (60°C)

ΠΙΝΑΚΑΣ 4.1 : ΑΝΤΟΧΕΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ ΣΕ 7, 28, 55, 71 ΗΜΕΡΕΣ

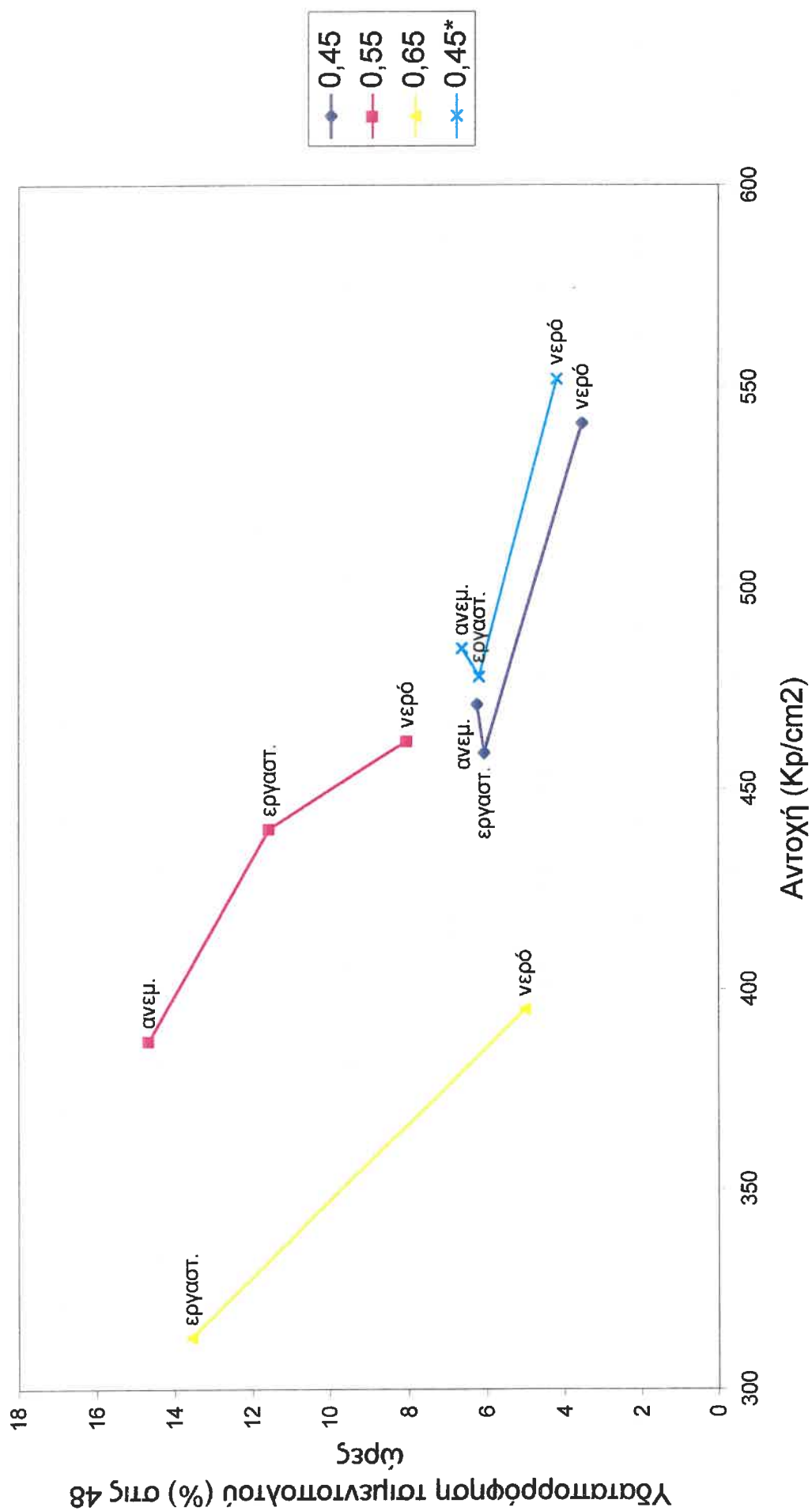
ΚΩΔΙΚΟΣ ΕΚΕΤ	ΤΥΠΟΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ	ΤΣΙΜΕΝΤΟ KG	N/T	7 ημερών (Kp/cm2)		28 ημερών(Kp/cm2)		55 ημερών(Kp/cm2)		71 ημερών(Kp/cm2)	
				εργ.	νερό ανεμ.	εργ.	νερό ανεμ.	εργ.	νερό ανεμ.	εργ.	νερό ανεμ.
34	I 45	330	0,45	518	508	560	443	579	667	614	673
36	I 45	330	0,55	328	365	445	472	408	461	392	448
38	I 45	330	0,65	243	256	268	326	296	316	226	229
49	I 45	422	0,45*	446	409	561	490	559	649	399	457
54	II 45	330	0,45	460	467	591	657	563	520	459	541
40	II 45	330	0,55	357	327	445	505	413	562	440	462
43	II 45	330	0,65	275	278	365	394	331	461	313	395
57	II 45	422	0,45*	457	439	548	591	620	65	478	552
61	II 35	330	0,45	333	337	446	523	464	551	411	601
45	II 35	330	0,55	208	270	283	403		490	239	439
47	II 35	330	0,65	154	144	199	238	242	280	196	288
63	II 35	422	0,45*	336	320	463	488	430	584	430	574

Τσιμέντο Ι45



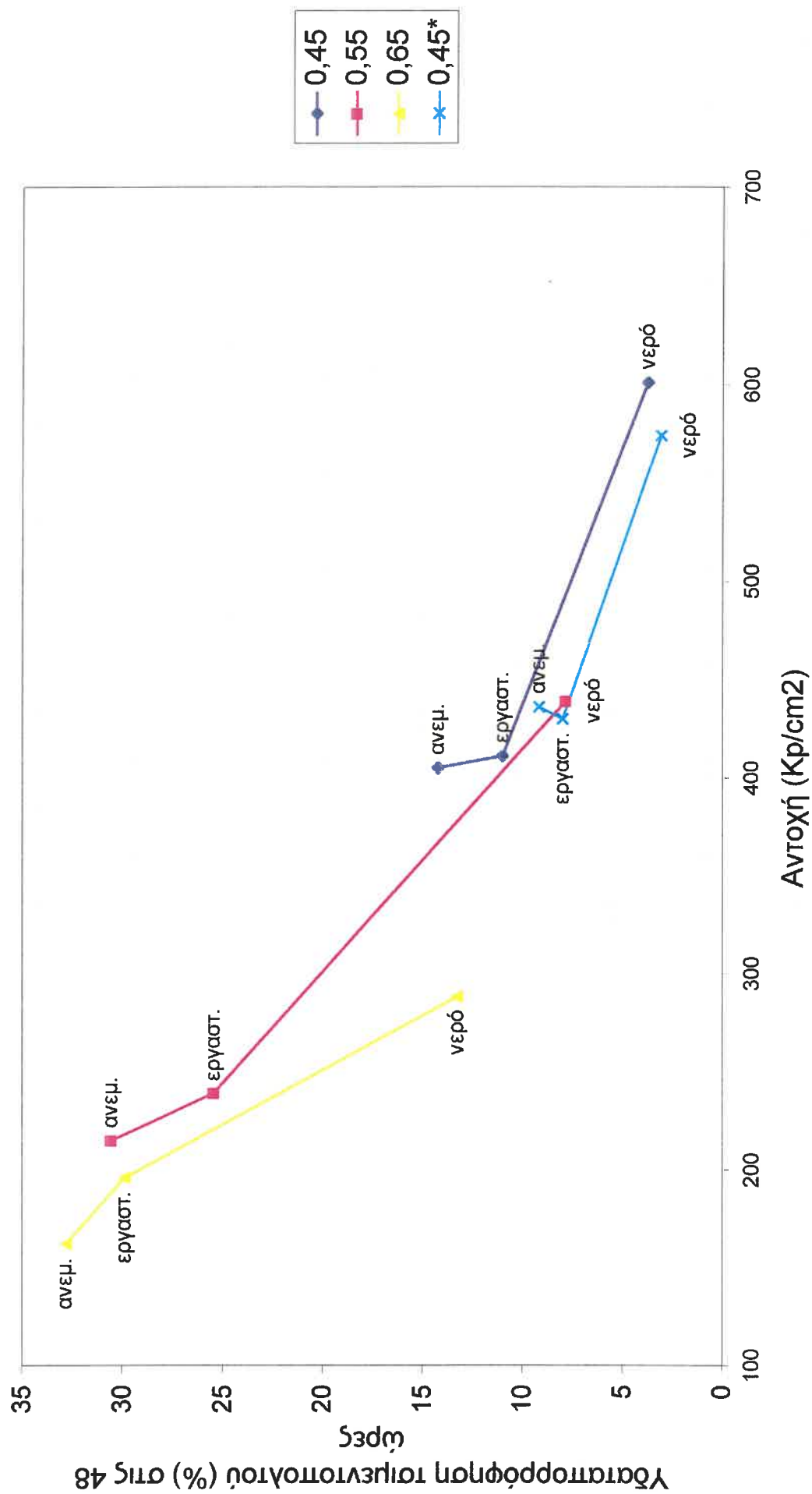
ΣΧ. 4.39 Σχέση υδαταπορρόφησης τσιμεντοπολτού 48 ωρών με την αντοχή 71 ημερών.

Τσιμέντο ΙΙ45



Σχ. 4.40 Σχέση υδατορρόφησης τσιμεντοπολτού στις 48 ώρες με την αντοχή 71 ημερών

Τσιμέντο ΙΙ35



Σχ. 4.41 Σχέση υδαταπορρόφησης τσιμεντοπολτού 48 ωρών με την αντοχή 71 ημερών.

4.2. Σχολιασμός αποτελεσμάτων

4.2.1. Κριτική πειραματικών διαδικασιών

Λόγω της διαφορετικής ποσότητας νερού που περιείχαν τα δοκίμια της κάθε συντήρησης πριν τις πειραματικές μετρήσεις, θα ήταν ακριβέστερη η σύγκριση των αποτελεσμάτων αν όλα τα δοκίμια είχαν ξηρανθεί μέχρι σταθερού βάρους. Για να επιτύχουμε αυτές της συνθήκες ξήρανσης, θεωρήτικά, θα έπρεπε να ξηράνουμε τα δοκίμια σε φούρνο στους 100-105C. Επειδή όμως θέλαμε να προσομοιάσουμε τα πειραματά μας στις πραγματικές συνθήκες που επικρατούν στο περιβάλλον αλλά και επειδή σε αυτή τη θερμοκρασία υφίσταται αλλοιώσεις ο ιστός του σκυροδέματος λόγω διαστολών, επιλέξαμε ως συνθήκες ξήρανσης τους 70C για τέσσερις ημέρες. Η επιλογή της χρονικής διάρκειας της ξήρανσης έγινε βάσει του Σχ. 4.38 το οποίο παρουσιάζει τη μεταβολή του βάρους με το χρόνο λόγω ξήρανσης σε φούρνο στους 70C σε δοκιμαστικά δοκίμια, όπου παρατηρήσαμε ότι μετά τις τέσσερις ημέρες (96 ώρες) η μείωση του βάρους των δοκιμίων δεν είναι σημαντική και συνεπώς μπορούμε να υποθέσουμε ότι το νερό που απομένει δεν θα επηρεάσει σημαντικά τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

• Υδαταπορρόφηση

Ένα γενικό συμπέρασμα που προκύπτει κοιτάζοντας τη μορφή όλων των διαγραμμάτων είναι ότι η κλίση για όλες τις καμπύλες αρχικά είναι μεγάλη, στη συνέχεια όμως, και αφού έχουν πληρωθεί οι μεγάλοι πόροι με νερό, μικραίνει με το χρόνο. Σε ορισμένα όμως διαγράμματα (Σχ. 4.27 - 4.28) η κλίση της καμπύλης γίνεται μηδενική. Αυτό δηλώνει τον κορεσμό των δοκιμίων, όπου πλέον υπάρχει ισοζύγιο μεταξύ του νερού που απορροφάται και του νερού που εξατμίζεται. Τέλος, γενικά παρατηρείται ότι η κλίση της καμπύλης της υδαταπορρόφησης για μικρούς λόγους N/T είναι μικρότερη από τη κλίση για μεγάλους λόγους.

Ακρίβεια αποτελεσμάτων : Στο Σχ. 4.37 παρουσιάζεται μια δυσμενής περίπτωση στην οποία έχουμε επικάλυψη των διαγραμμάτων υδαταπορρόφησης για την συντήρηση σε ανεμιστήρα και σε περιβάλλον εργαστηρίου, όταν απεικονίζεται η

υδαταπορρόφηση και για τα τρία δοκίμια από την κάθε συντήρηση. Βέβαια, είναι γνωστό ότι οι μετρήσεις διαπερατότητας εμφανίζουν διασπορά, παρόλα αυτά στους μέσους όρους η απόκλιση αυτή δεν είναι ορατή. Εκφράζουμε, λοιπόν, μια επιφύλαξη για τα αποτελέσματά μας αφού για ασφαλέστερα συμπεράσματα θα χρειαζόντουσαν περισσότερα δοκίμια. Πρακτικά όμως αυτό είναι δύσκολο επειδή οι δοκιμές είναι χρονοβόρες, εξάλλου, αυτό που μας ενδιαφέρει είναι η ποιοτική και όχι η ποσοτική έρευνα.

- **Ενανθράκωση**

Στη δοκιμή της ενανθράκωσης για ασφαλέστερα αποτελέσματα θα πρέπει να ελέγχεται η πίεση του CO₂ με μανόμετρο, μέσα στους πλαστικούς σάκους, πράγμα το οποίο δεν ήταν εφικτό κατά τη διαδικασία των πειραμάτων μας. Είναι λοιπόν πιθανόν στα πειράματα να μην υπήρχε η ίδια πίεση CO₂ σε όλους τους σάκους κάτι στο οποίο θα πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση σε επόμενα πειράματα.

4.2.2. Επίδραση της συντήρησης στην υδαταπορρόφηση

Εξετάζοντας τα διαγράμματα των αποτελεσμάτων των πειραμάτων από Σχ. 4.1 έως Σχ. 4.12 είναι εμφανές ότι για την υγρή συντήρηση το ποσοστό του νερού που απορροφά ο τσιμεντοπολτός του κάθε αναμείγματος είναι σημαντικά μικρότερος από το ποσοστό που απορροφάται από τον τσιμεντοπολτό για τις υπόλοιπες δύο συντηρήσεις δηλαδή για τη συντήρηση σε περιβάλλον εργαστηρίου και για συντήρηση σε συνθήκες απότομης ξήρανσης (ανεμιστήρας). Αυτό αποδίδεται στο γεγονός ότι η υγρή συντήρηση δημιουργεί μικρότερο πορωδες, άρα υπάρχουν λιγότεροι και μικρότεροι πόροι στον τσιμεντοπολτό και συνεπώς μικρότερη υδαταπορρόφηση.

Συγκρίνοντας τις δύο άλλες συντηρήσεις προκύπτει, από τα ίδια διαγράμματα, ότι η συντήρηση σε περιβάλλον εργαστηρίου παρουσιάζει καλύτερα αποτελέσματα ως προς την υδαταπορρόφηση του τσιμεντοπολτού (μικρότερο ποσοστό) σε σχέση με την συντήρηση σε συνθήκες απότομης ξήρανσης. Αυτό δίνει τη σημασία της επιρροής της συντήρησης στην απορρόφηση άρα και στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος και αποδίδεται στην ελλιπή ενυδάτωση του φλοιού του δοκιμίου

λόγω εντατικής ξήρανσης που οδηγεί σε μεγαλύτερο πορώδες και πιθανόν στη δημιουργία μικρορωγμών.

Τα παραπάνω επαληθεύονται από το σύνολο των διαγραμμάτων (Σχ. 4.1 - 4.12) με εξαίρεση το Σχ. 4.8 στο οποίο φαίνεται η συντήρηση σε συνθήκες απότομης ξήρανσης να δίνει καλύτερα αποτελέσματα από τη συντήρηση σε περιβάλλον εργαστηρίου, αποτέλεσμα που πιθανώς να οφείλεται στο ότι η συγκεκριμένη σειρά δεν ακολούθησε την ίδια πορεία πείραματικών μετρήσεων με τις προηγούμενες εξαιτίας διακοπής ρεύματος (βλέπε § 4.2.3).

4.2.3. Επίδραση του λόγου N/T στην υδαταπορρόφηση

Μελετώντας τα Σχ. 4.13 - 4.21 που παρουσιάζουν την επιρροή του λόγου N/T στο σκυρόδεμα για κάθε τύπο τσιμέντου στην κάθε συντήρηση, ένα γενικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι ο λόγος $N/T=0,65$ παρουσιάζει την μεγαλύτερη υδαταπορρόφηση στον τσιμεντοπολτό και ακολουθεί ο λόγος $N/T=0,55$. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όσο μεγαλύτερος είναι ο λόγος N/T τόσο μεγαλύτερο είναι και το πορώδες που σχηματίζεται άρα και η υδαταπορρόφηση που παρουσιάζει το σκυρόδεμα.

Εξαίρεση αποτελούν τα Σχ. 4.16 - 4.18 για τα οποία παρατηρείται ότι ο λόγος $N/T=0,55$ παρουσιάζει μεγαλύτερη υδαταπορρόφηση περίπου για τις 30 πρώτες ώρες. Αυτό πιθανόν να εξηγείται από το γεγονός ότι για τη σειρά των δοκιμών που παρασκευάστηκε με τσιμέντο II45 και $N/T=0,65$ δεν πρόλαβαν να ολοκληρωθούν οι μετρήσεις της υδαταπορρόφησης λόγω διακοπής ρεύματος έτσι αποφασίστηκε τα δοκίμια να τοποθετηθούν ξανά στο φούρνο στους 60°C για 12 ώρες και να επαναληφθούν οι μετρήσεις την επόμενη μέρα. Επειδή η διαδικασία της υδαταπορρόφησης δεν είναι πλήρως αντιστρέψιμη, η ξήρανση μπορεί να μην απομάκρυνε όλο το νερό που απορροφήθηκε από τα δοκίμια το χρονικό διάστημα πριν τη διακοπή ρεύματος, με συνέπεια η υδαταπορρόφηση του τσιμεντοπολτού στη δεύτερη μέτρηση να είναι μικρότερη από την αναμενόμενη.

Για τους άλλους δύο λόγους $N/T=0,45$ ($T=330$ kg και $N=148,5$ kg) και $N/T=0,45^*$ ($T=422,2$ kg και $N=190$ kg) από τα Σχ. 4.13 - 4.15 προκύπτει ότι για τύπο

τσιμέντου Ι45 και σε όλες τις συντηρήσεις ο δεύτερος λόγος δίνει μεγαλύτερη υδαταπορρόφηση τσιμεντοπολτού. Για τα Σχ. 4.16 - 4.18 οι δύο λόγοι μας δίνουν περίπου την ίδια υδαταπορρόφηση τσιμεντοπολτού για τσιμέντο ΙΙ45. Τέλος, από τα Σχ. 4.19 - 4.21 φαίνεται η υδαταπορρόφηση του τσιμεντοπολτού για τσιμέντο ΙΙ35 και $N/T=0,45$ να είναι μεγαλύτερη από αυτή που προκύπτει για τον ίδιο τύπο τσιμέντου και λόγο $N/T=0,45^*$. Η τελευταία περίπτωση μπορεί να εξηγηθεί από το γεγονός ότι τα δοκίμια που είναι κατασκευασμένα με λόγο $N/T=0,45^*$ μπορεί να έχουν ήδη κάποιους πόρους πληρωμένους με νερό λόγω της ιδιαιτερότητας αυτού του λόγου που περιέχει μεγάλη ποσότητα τσιμέντου και ανάλογα μεγάλη ποσότητα νερού. Για τις άλλες δύο περιπτώσεις δεν μπορούμε να βγάλουμε συμπέρασμα και θεωρείται ότι χρειάζεται περαιτέρω έρευνα για να εξηγηθούν τα αποτελέσματα αυτά διότι πιθανόν ο τύπος του τσιμέντου (I ή II) και η κατηγορία αντοχής του (λεπτότητα άλεσης) μπορεί να επηρεάζουν το φαινόμενο της αυτοξηρανσης (self desiccation).

4.2.4. Επίδραση του τύπου τσιμέντου στην υδαταπορρόφηση

Παρατηρώντας τα Σχ. 4.22 - 4.33 και συγκρίνοντας τους τρεις τύπους τσιμέντων μεταξύ τους ένα γενικό συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι για τύπο τσιμέντου ΙΙ35 έχουμε το μεγαλύτερο ποσοστό υδαταπορρόφησης του τσιμεντοπολτού πράγμα το οποίο είναι αναμενόμενο αφού τα τσιμέντα Ι45 και ΙΙ45 έχουν μεγαλύτερη αντοχή άρα και μικρότερο πορώδες.

Επίσης, για τα ίδια διαγράμματα και συγκρίνοντας τους τύπους τσιμέντου Ι45 και ΙΙ45 θα περιμέναμε ο τύπος ΙΙ45 ως ποζολανικό τσιμέντο να παρουσιάζει μικρότερη υδαταπορρόφηση, σε σχέση με τον τύπο Ι45 (αμιγές τσιμέντο), αφού θεωρείται ότι η ποζολάνη κλείνει τους πόρους και εμποδίζει την διείσδυση του νερού. Αυτό όμως δεν επαληθεύεται από το σύνολο των διαγραμμάτων και συνεπώς χρειάζεται περαιτέρω έρευνα για να προκύψουν ασφαλή συμπεράσματα για την υδαταπορρόφηση αυτών των δύο τύπων τσιμέντου.

Τέλος, μια ειδική αναφορά πρέπει να γίνει για το τσιμέντο τύπου ΙΙ45, για το οποίο αν και αναφέρεται σε πολλά βιβλία (Neville) ότι είναι επιρρεπές στην κακή συντήρηση, αυτό δεν επιβεβαιώθηκε από τα Σχ. 4.22 - 4.33, αντίθετα, σε κάποια

από αυτά, παρουσίασε πολύ καλή συμπεριφορά (Σχ. 4.28 - 4.29) πράγμα το οποίο μας κάνει να πιστεύουμε, ότι χρειάζεται τα αποτελέσματα των πειραμάτων μας να επαληθευτούν και από άλλα, ώστε να μπορεί να προκύψει κάποιο σίγουρο συμπέρασμα για τη συμπεριφορά του τσιμέντου ΙΙ45 στην κακή συντήρηση.

4.2.5. Επίδραση του λόγου N/T και της συντήρησης στο βάθος ενανθράκωσης

- Λόγος N/T

Από τα Σχ. 4.34 - 4.36 παρατηρούμε ότι η διείσδυση του CO₂ αυξάνει με τον λόγο N/T. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, αύξηση του λόγου N/T έχει ως συνέπεια την αύξηση του πορώδους πράγμα το οποίο ευνοεί τη διείσδυση του CO₂ στο σκυρόδεμα.

Στο Σχ. 4.34 και για τύπο τσιμέντου Ι45 παρατηρούμε μία ομαλή αύξηση του βάθους ενανθράκωσης με την αύξηση του λόγου N/T, πράγμα το οποίο μας κάνει να πιστεύουμε ότι τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι αξιόπιστα αφού επαληθεύουν τα αντίστοιχα αποτελέσματα της υδαταπορρόφησης. Δηλαδή γίνεται φανερό ότι όσο μικρότερος είναι ο λόγος N/T τόσο μικρότερη είναι και η διαπερατότητα και ως υδατοπερατότητα και ως αεροπερατότητα (CO₂).

Στο Σχ. 4.35 για τον τύπο τσιμέντου ΙΙ45 εμφανίζεται η ίδια ομαλή αύξηση της διείσδυσης CO₂ με το λόγο N/T με αυτή στο Σχ. 4.34 εκτός από τη διείσδυση για λόγο N/T=0,45 όπου παρατηρείται μεγαλύτερο βάθος ενανθράκωσης από το λόγο N/T=0,55, η οποία δεν μπορεί να εξηγηθεί και πιθανόν να οφείλεται στις διαφορετικές συνθήκες των πειραμάτων (σταθερή πίεση CO₂ βλέπε § 4.2.1).

Στο Σχ. 4.36 παρατηρείται, για τσιμέντο τύπου ΙΙ35, ότι και στα προηγούμενα σχήματα, με εξαίρεση το λόγο N/T=0,55 ο οποίος παρουσιάζει πολύ μεγάλη διείσδυση CO₂ σε σχέση με το λόγο 0,65, κάτι που πιθανόν να οφείλεται στις ίδιες αιτίες που ισχύουν και για το Σχ. 4.35.

- Συντήρηση

Όσον αφορά την επίδραση της συντήρησης στο βάθος ενανθράκωσης ένα γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από τα Σχ. 4.34 - 4.36 είναι το ότι τα δοκίμια που συντηρήθηκαν στο νερό παρουσιάζουν σαφώς καλύτερη συμπεριφορά (μικρότερο βάθος διείσδυσης CO₂), από τα αντίστοιχα δοκίμια των άλλων συντηρήσεων. Η αμέσως καλύτερη συντήρηση είναι αυτή σε περιβάλλον εργαστηρίου και τελευταία έρχεται η συντήρηση σε ανεμιστήρα. Η εξήγηση για τα παραπάνω αποτελέσματα συνεπικουρεί τα αποτελέσματα της υδαταπορρόφησης καθώς και την ερμηνεία που τους δώσαμε. Όμως, για τον τύπο τσιμέντου ΙΙ45 στο Σχ. 4.35, δεν επιβεβαιώνεται η καλή συμπεριφορά του στην κακή συντήρηση, συμπέρασμα που προέκυψε από τις δοκιμές της υδαταπορρόφησης, αφού στα πειράματα της ενανθράκωσης έδειξε επιρρεπές σε αυτή, συνεπώς χρειάζεται περαιτέρω έρευνα για να αποφανθούμε για τη συμπεριφορά του τσιμέντου ΙΙ45 ως προς τη συντήρηση.

4.2.6. Σύνδεση αποτελεσμάτων αντοχών με διαπερατότητα

Από τον Πίνακα 4.1 που μας δίνει τα αποτελέσματα των αντοχών των δοκιμών των 12 αναμειγμάτων στις 7, 28, 55 και 71 ημέρες επιβεβαιώνονται τα αποτελέσματα της διαπερατότητας και για τις δύο μορφές της (υδαταπορρόφηση και ενανθράκωση). Δηλαδή μικρός λόγος N/T έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία μικρού πορώδους και σαν συνέπεια αυτού την αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος.

Επίσης στα Σχ. 4.39 - 4.41 φαίνεται ότι, για όλους τους τύπους τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκαν, μειώνεται η υδαταπορρόφηση όσο αυξάνεται η αντοχή πράγμα το οποίο συμβαίνει και κατά τη μετάβαση από συντήρηση σε συνθήκες απότομης ξήρανσης σε συντήρηση σε περιβάλλον εργαστηρίου και τέλος, σε υγρή συντήρηση για τον κάθε λόγο N/T.

Συγκρίνοντας τους τρεις τύπους τσιμέντου είναι εμφανές ότι οι τύποι τσιμέντου Ι45 και ΙΙ45 μας δίνουν καλύτερα αποτελέσματα αντοχών σε όλες τις ηλικίες και για όλες τις συντηρήσεις που εξετάσαμε από τα αντίστοιχα αποτελέσματα του τύπου

II35. Μεταξύ των τσιμέντων I45 και II45 το πρώτο δίνει καλύτερες αντοχές σε σχέση με το δεύτερο, αυτό μας επιτρέπει να θεωρήσουμε ότι τα αμιγή τσιμέντα Portland (I) προσδίδουν μεγαλύτερη αντοχή στο σκυρόδεμα από τα τσιμέντα τύπου Portland με ποζολάνη (II).

Ενώ λοιπόν, με κριτήριο την αντοχή του σκυροδέματος, μπορούμε να θεωρήσουμε το τσιμέντο τύπου I45 καλύτερο από το II45, με κριτήριο την ανθεκτικότητα και πιο συγκεκριμένα τη διαπερατότητα του σκυροδέματος, δεν μπορούμε να ισχυριστούμε το ίδιο αφού τα αποτελέσματα των πειραμάτων δεν μας έδωσαν σαφή ένδειξη για το ποιός τύπος τσιμέντου είναι καλύτερος. Επιβεβαιώνεται δηλαδή, αυτό που αναφέρει και ο Neville [7] ότι η αντοχή και η ανθεκτικότητα είναι δύο διαφορετικές ιδιότητες του σκυροδέματος και δεν πρέπει να συγχέονται.

Ακρίβεια αποτελεσμάτων : Επειδή οι τιμές των αντοχών στηρίζονται σε μία μόνο μέτρηση, εκφράζουμε επιφυλάξεις για τα αποτελέσματα και συνεπώς μόνο πρωταρχικής φύσεως συμπεράσματα μπορούν να προκύψουν.

4.3. Γενικά συμπεράσματα

Εξετάζοντας συνολικά τα αποτελέσματα των πειραμάτων και συνοψίζοντας τα παραπάνω σχόλια, αποδεικνύεται:

- ♦ Η μεγάλη σημασία της συντήρησης στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, αφού όπως φάνηκε και από τα πειράματα της υδαταπορρόφησης αλλά και από αυτά της ενανθράκωσης η κακή συντήρηση (απότομη ξήρανση – ανεμιστήρας) έχει ως αποτέλεσμα μεγάλη υδαταπορρόφηση και αντίστοιχα μεγάλο βάθος ενανθράκωσης.
- ♦ Η επίδραση του λόγου N/T στη διαπερατότητα του σκυροδέματος αφού όπως προέκυψε από τις πειραματικές διαδικασίες για μικρό λόγο N/T έχουμε ικανοποιητικά αποτελέσματα υδαταπορρόφησης και ενανθράκωσης (μικρό ποσοστό απορρόφησης νερού στο τσιμεντοπολτό, μικρή διείσδυση CO_2) ως συνέπεια του μικρού πορώδους.
- ♦ Ότι το τσιμέντο τύπου ΙΙ35 δίνει τα χειρότερα αποτελέσματα ως προς την υδαταπορρόφηση αλλά και την ενανθράκωση. Αντίθετα για τους άλλους δύο τύπους τσιμέντου (Ι45, Ι45) δεν προκύπτει ασφαλές συμπέρασμα από την μεταξύ τους σύγκριση αφού δεν υπάρχει σημαντική διαφορά στα αποτελεσματά τους.

4.4. Συστάσεις για περαιτέρω έρευνα

Για την ενανθράκωση, προτείνεται στα πειράματα που θα ακολουθήσουν των δικών μας να διατηρείται σταθερή η πίεση του CO_2 στο δοχείο που περιέχει τα δοκίμια, καθόλη τη διάρκεια των πειραμάτων. Αυτό μπορεί να επιτευχθεί με την χρησιμοποίηση στεγανών δοχείων (Plexi-glass) όπου θα προσαρμόζεται μανόμετρο για τον έλεγχο της πίεσης.

Τέλος, προτείνεται επανάληψη των πειραμάτων για τύπο τσιμέντου II45 με περισσότερες συνθήκες συντήρησης ώστε τα αποτελέσματα που θα προκύψουν να μας δίνουν μια σαφή ένδειξη για την επίδραση της συντήρησης σε αυτόν τον τύπο τσιμέντου.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

ΠΙΝΑΚΑΣ 1

ΝΟΥΜΕΡΟ : 34
ΗΜΕΡ/ΝΙΑ : 13/1/98
ΩΡΑ : 13:15

ΑΝΑΜΕΙΓΜΑ	1 45 – 0,45
ΤΣΙΜΕΝΤΟ	9.505 gr
ΝΕΡΟ	4.275 gr
ΑΜΜΟΣ	28.110 gr
ΓΑΡΜΠΙΛΙ	28.110 gr
ΡΕΥΣΤ/ΤΗΣ R 561	171 gr

ΚΑΘΗΣΗ	4 cm
Φ.Ε.Β.	2,31 gr/cm ³
AIR CONTENT	2,1
ΔΟΝΗΣΗ	5" + 5"
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	22,5 °C
ΥΓΡΑΣΙΑ	57 %

ΕΝΤΥΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΥΨΟΥΣ ΚΑΙ ΒΑΡΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

A/A	ΒΑΡΟΣ (gr)	ΥΨΟΣ (cm)	ΤΡΟΠΟΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ
1	2.455,3	10,22	νερό
2	2.524,2	10,41	>>
3	2.549,2	10,55	>>
4	2.476,0	10,26	>>
5	2.456,4	10,21	>>
6	2.461,4	10,24	εργαστήριο
7	2.508,9	10,28	>>
8	2.514,3	10,38	>>
9	2.483,9	10,28	ανεμιστήρας
10	2.455,0	10,21	>>
11	2.480,0	10,27	νερό
12	2.480,3	10,27	>>
13	2.453,0	10,21	>>
14	2.521,6	10,39	εργαστήριο
15	2.436,2	10,11	>>
16	2.484,8	10,28	>>
17	2.494,5	10,31	>>
18	2.467,6	10,25	>>
19	2.520,5	10,38	>>
20	2.448,4	10,17	ανεμιστήρας
21	2.411,7	10,06	>>
22	2.465,0	10,24	>>
23	2.472,5	10,35	>>
24	2.448,9	10,17	>>
25	2.452,5	10,21	>>
26	2.516,7	10,36	νερό
27	-	-	-

ΠΙΝΑΚΑΣ 2

ΝΟΥΜΕΡΟ : 36
ΗΜΕΡ/ΝΙΑ : 15/1/98
ΩΡΑ : 11:45

ΑΝΑΜΕΙΓΜΑ	1 45 – 0,55
ΤΣΙΜΕΝΤΟ	9.725 gr
ΝΕΡΟ	5.350 gr
ΑΜΜΟΣ	27.465 gr
ΓΑΡΜΠΙΛΙ	27.465 gr
ΡΕΥΣΤ/ΤΗΣ R 561	45 gr

ΚΑΘΗΣΗ	10 cm
Φ.Ε.Β.	2,35 gr/cm ³
AIR CONTENT	3,5
ΔΟΝΗΣΗ	3" + 3"
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	23 °C
ΥΓΡΑΣΙΑ	55 %

ΕΝΤΥΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΥΨΟΥΣ ΚΑΙ ΒΑΡΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

A/A	ΒΑΡΟΣ (gr)	ΥΨΟΣ (cm)	ΤΡΟΠΟΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ
1	2.396,6	9,95	εργαστήριο
2	2.405,1	10,04	>>
3	2.457,5	10,23	>>
4	2.467,5	10,28	>>
5	2.455,0	10,22	>>
6	2.404,1	10,26	>>
7	2.491,0	10,48	>>
8	2.431,0	10,12	>>
9	2.427,1	10,09	>>
10	2.397,8	9,98	ανεμιστήρας
11	2.400,9	10,01	>>
12	2.402,4	10,02	>>
13	2.418,0	10,07	>>
14	2.411,7	10,05	>>
15	2.409,4	10,05	>>
16	2.416,4	10,06	>>
17	2.455,5	10,22	>>
18	2.418,6	10,07	>>
19	2.443,8	10,17	νερό
20	2.398,3	9,97	>>
21	2.455,5	10,21	>>
22	2.430,5	10,12	>>
23	2.441,7	10,17	>>
24	2.430,3	10,11	>>
25	2.417,4	10,06	>>
26	2.421,0	10,09	>>
27	2.175,4	9,32	>>

ΠΙΝΑΚΑΣ 3

ΝΟΥΜΕΡΟ : 38
ΗΜΕΡ/ΝΙΑ : 19/1/98
ΩΡΑ : 11:15

ΑΝΑΜΕΙΓΜΑ	1 45 – 0,65
ΤΣΙΜΕΝΤΟ	10.665 gr
ΝΕΡΟ	6.935 gr
ΑΜΜΟΣ	28.700 gr
ΓΑΡΜΠΙΛΙ	28.700 gr
ΡΕΥΣΤ/ΤΗΣ R 561	-

ΚΑΘΗΣΗ	17 cm
Φ.Ε.Β.	2,34 gr/cm ³
AIR CONTENT	2,6
ΔΟΗΣΗ	3" + 3"
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	22 °C
ΥΓΡΑΣΙΑ	59 %

ΕΝΤΥΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΥΨΟΥΣ ΚΑΙ ΒΑΡΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

A/A	ΒΑΡΟΣ (gr)	ΥΨΟΣ (cm)	ΤΡΟΠΟΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ
1	2.367,7	10,05	ανεμιστήρας
2	2.399,6	10,22	>>
3	2.395,8	10,18	>>
4	2.411,8	10,26	>>
5	2.386,5	10,12	>>
6	2.377,4	10,10	>>
7	2.384,4	10,11	>>
8	2.389,4	10,12	>>
9	2.396,8	10,18	εργαστήριο
10	2.387,8	10,12	>>
11	2.391,3	10,12	>>
12	2.402,1	10,21	>>
13	2.393,2	10,16	>>
14	2.379,0	10,11	>>
15	2.376,1	10,11	>>
16	2.397,0	10,19	νερό
17	2.387,0	10,12	>>
18	2.380,6	10,08	>>
19	2.355,2	10,02	>>
20	2.377,5	10,06	>>
21	2.388,2	10,13	>>
22	2.396,8	10,18	>>
23	2.410,1	10,25	>>
24	2.364,5	10,03	>>
25	2.398,3	10,21	εργαστήριο
26	2.399,0	10,20	>>
27	2.464,2	10,47	ανεμιστήρας

ΠΙΝΑΚΑΣ 4

ΝΟΥΜΕΡΟ : 40
ΗΜΕΡ/ΝΙΑ : 20/1/98
ΩΡΑ : 12:00

ΑΝΑΜΕΙΓΜΑ	II 45 – 0,55
ΤΣΙΜΕΝΤΟ	10.450 gr
ΝΕΡΟ	5.750 gr
ΑΜΜΟΣ	29.400 gr
ΓΑΡΜΠΙΛΙ	29.400 gr
ΡΕΥΣΤ/ΤΗΣ R 561	59 gr

ΚΑΘΗΣΗ	10 cm
Φ.Ε.Β.	2,36 gr/cm ³
AIR CONTENT	3,0
ΔΟΝΗΣΗ	3" + 3"
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	21,5 °C
ΥΓΡΑΣΙΑ	60 %

ΕΝΤΥΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΥΨΟΥΣ ΚΑΙ ΒΑΡΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

A/A	ΒΑΡΟΣ (gr)	ΥΨΟΣ (cm)	ΤΡΟΠΟΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ
1	2.397,4	10,12	ανεμιστήρας
2	2.456,8	10,37	>>
3	2.422,3	10,17	>>
4	2.375,7	10,08	>>
5	2.457,0	10,49	>>
6	2.435,2	10,20	>>
7	2.450,0	10,39	>>
8	2.458,5	10,42	>>
9	2.414,5	10,56	εργαστήριο
10	2.420,0	10,15	>>
11	2.454,4	10,41	>>
12	2.417,5	10,11	>>
13	2.440,0	10,25	>>
14	2.424,4	10,19	>>
15	2.403,4	10,17	>>
16	2.440,0	10,31	νερό
17	2.413,1	10,20	>>
18	2.386,8	10,05	>>
19	2.422,2	10,25	>>
20	2.500,3	10,44	>>
21	2.450,0	10,37	>>
22	2.477,8	10,47	>>
23	2.473,5	10,41	>>
24	2.480,3	10,19	>>
25	2.490,8	10,52	εργαστήριο
26	2.466,1	10,39	>>
27	2.442,1	10,28	ανεμιστήρας

ΠΙΝΑΚΑΣ 5

ΝΟΥΜΕΡΟ : 43
ΗΜΕΡ/ΝΙΑ : 22/1/98
ΩΡΑ : 13:00

ΑΝΑΜΕΙΓΜΑ	II 45 – 0,65
ΤΣΙΜΕΝΤΟ	10.700 gr
ΝΕΡΟ	6.955 gr
ΑΜΜΟΣ	28.670 gr
ΓΑΡΜΠΙΛΙ	28.670 gr
ΡΕΥΣΤ/ΤΗΣ R 561	-

ΚΑΘΗΣΗ	17 cm
Φ.Ε.Β.	2,3 gr/cm ³
AIR CONTENT	2,2
ΔΟΝΗΣΗ	3" + 3"
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	23 °C
ΥΓΡΑΣΙΑ	61 %

ΕΝΤΥΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΥΨΟΥΣ ΚΑΙ ΒΑΡΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Α/Α	ΒΑΡΟΣ (gr)	ΥΨΟΣ (cm)	ΤΡΟΠΟΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ
1	2.404,8	10,25	ανεμιστήρας
2	2.406,2	10,21	>>
3	2.359,3	10,12	>>
4	2.422,1	10,31	>>
5	2.408,8	10,27	>>
6	2.367,2	10,17	>>
7	2.399,5	10,22	>>
8	2.420,5	10,29	>>
9	2.423,2	10,27	>>
10	2.404,9	10,19	εργαστήριο
11	2.416,3	10,35	>>
12	2.378,5	10,16	>>
13	2.381,4	10,06	>>
14	2.371,4	10,23	>>
15	2.408,5	10,24	>>
16	2.368,1	10,14	>>
17	2.384,7	10,11	>>
18	2.397,7	10,27	>>
19	2.402,6	10,30	νερό
20	2.421,3	10,32	>>
21	2.360,0	10,08	>>
22	2.369,7	10,02	>>
23	2.340,5	9,87	>>
24	2.413,4	10,27	>>
25	2.388,1	10,15	>>
26	2.449,1	10,42	>>
27	2.365,6	10,08	>>

ΠΙΝΑΚΑΣ 6

ΝΟΥΜΕΡΟ : 45
 ΗΜΕΡ/ΝΙΑ : 26/1/98
 ΩΡΑ : 10:30

ΑΝΑΜΕΙΓΜΑ	II 35 – 0,55
ΤΣΙΜΕΝΤΟ	10.495 gr
ΝΕΡΟ	5.775 gr
ΑΜΜΟΣ	29.365 gr
ΓΑΡΜΠΙΔΙ	29.365 gr
ΡΕΥΣΤ/ΤΗΣ R 561	108,5 gr

ΚΑΘΗΣΗ	11 cm
Φ.Ε.Β.	2,33 gr/cm ³
AIR CONTENT	2,4
ΔΟΝΗΣΗ	3" + 3"
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	21 °C
ΥΓΡΑΣΙΑ	55 %

ΕΝΤΥΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΥΨΟΥΣ ΚΑΙ ΒΑΡΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Α/Α	ΒΑΡΟΣ (gr)	ΥΨΟΣ (cm)	ΤΡΟΠΟΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ
1	2.420,5	10,21	ανεμιστήρας
2	2.432,7	10,25	>>
3	2.388,8	9,99	>>
4	2.449,3	10,44	>>
5	2.425,6	10,20	>>
6	2.433,7	10,20	>>
7	2.445,9	10,40	>>
8	2.400,4	10,05	>>
9	2.471,5	10,40	εργαστήριο
10	2.429,5	10,24	>>
11	2.391,9	10,05	>>
12	2.484,8	10,74	>>
13	2.450,8	10,38	>>
14	2.462,4	10,35	>>
15	2.407,8	10,16	>>
16	2.405,5	10,18	>>
17	2.444,0	10,37	νερό
18	2.445,7	10,33	>>
19	2.465,0	10,35	>>
20	2.403,8	10,08	>>
21	2.449,7	10,35	>>
22	2.436,0	10,27	>>
23	2.450,3	10,35	>>
24	2.433,7	10,28	εργαστήριο
25	2.408,4	10,19	ανεμιστήρας
26	2.441,8	10,36	νερό
27	2.400,8	10,11	>>

ΠΙΝΑΚΑΣ 7

ΝΟΥΜΕΡΟ : 47
 ΗΜΕΡ/ΝΙΑ : 27/1/98
 ΩΡΑ : 12:00

ΑΝΑΜΕΙΓΜΑ	II 35 – 0,65
ΤΣΙΜΕΝΤΟ	10.745 gr
ΝΕΡΟ	6.985 gr
ΑΜΜΟΣ	28.635 gr
ΓΑΡΜΠΙΛΙ	28.635 gr
ΡΕΥΣΤ/ΤΗΣ R 561	-

ΚΑΘΗΣΗ	15 cm
Φ.Ε.Β.	2,34 gr/cm ³
AIR CONTENT	1,6
ΔΟΝΗΣΗ	3" + 3"
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	20 °C
ΥΓΡΑΣΙΑ	55 %

ΕΝΤΥΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΥΨΟΥΣ ΚΑΙ ΒΑΡΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Α/Α	ΒΑΡΟΣ (gr)	ΥΨΟΣ (cm)	ΤΡΟΠΟΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ
1	2.384,5	10,19	ανεμιστήρας
2	2.387,0	10,20	>>
3	2.370,8	10,15	>>
4	2.387,8	10,20	>>
5	2.404,5	10,26	>>
6	2.413,6	10,29	>>
7	2.442,8	10,39	>>
8	2.406,9	10,28	εργαστήριο
9	2.386,6	10,14	>>
10	2.385,0	10,15	>>
11	2.396,5	10,22	>>
12	2.418,5	10,30	>>
13	2.390,4	10,18	>>
14	2.416,2	10,29	>>
15	2.411,3	10,22	νερό
16	2.392,8	10,17	>>
17	2.385,0	10,14	>>
18	2.388,6	10,13	>>
19	2.389,6	10,17	>>
20	2.404,1	10,21	>>
21	2.375,6	10,06	>>
22	2.328,1	9,89	>>
23	2.362,4	10,04	>>
24	2.352,6	10,02	εργαστήριο
25	2.392,3	10,20	>>
26	2.403,5	10,30	ανεμιστήρας
27	2.445,2	10,42	>>

ΠΙΝΑΚΑΣ 8

ΝΟΥΜΕΡΟ : 49
ΗΜΕΡ/ΝΙΑ : 28/1/98
ΩΡΑ : 13:00

ΑΝΑΜΕΙΓΜΑ	1 45 – 0,45
ΤΣΙΜΕΝΤΟ	13.335 gr
ΝΕΡΟ	6.000 gr
ΑΜΜΟΣ	27.830 gr
ΓΑΡΜΠΙΛΙ	27.830 gr
ΡΕΥΣΤ/ΤΗΣ R 561	-

ΚΑΘΗΣΗ	8 cm
Φ.Ε.Β.	2,45 gr/cm ³
AIR CONTENT	2,1
ΔΟΝΗΣΗ	5" + 5"
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	22 °C
ΥΓΡΑΣΙΑ	58 %

ΕΝΤΥΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΥΨΟΥΣ ΚΑΙ ΒΑΡΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Α/Α	ΒΑΡΟΣ (gr)	ΥΨΟΣ (cm)	ΤΡΟΠΟΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ
1	2.452,6	10,34	ανεμιστήρας
2	2.422,6	10,19	>>
3	2.392,6	10,12	>>
4	2.411,0	10,11	>>
5	2.430,3	10,17	>>
6	2.456,2	10,31	>>
7	2.471,9	10,35	>>
8	2.447,5	10,31	εργαστήριο
9	2.422,6	10,14	>>
10	2.407,7	10,09	>>
11	2.389,7	10,07	>>
12	2.483,3	10,44	>>
13	2.410,3	10,10	>>
14	2.458,6	10,39	>>
15	2.399,8	10,06	νερό
16	2.383,3	10,09	>>
17	2.433,2	10,23	>>
18	2.376,3	10,07	>>
19	2.476,4	10,39	>>
20	2.411,2	10,12	>>
21	2.393,7	10,08	>>
22	2.425,5	10,21	>>
23	2.418,1	10,13	>>
24	2.372,8	10,06	εργαστήριο
25	2.383,3	10,07	>>
26	2.404,9	10,12	ανεμιστήρας
27	2.433,3	10,28	>>

ΠΙΝΑΚΑΣ 9

ΝΟΥΜΕΡΟ : 54
 ΗΜΕΡ/ΝΙΑ : 2/2/98
 ΩΡΑ : 11:15

ΑΝΑΜΕΙΓΜΑ	II 45 – 0,45
ΤΣΙΜΕΝΤΟ	10.215 gr
ΝΕΡΟ	4.595 gr
ΑΜΜΟΣ	30.095 gr
ΓΑΡΜΠΙΛΙ	30.095 gr
ΡΕΥΣΤ/ΤΗΣ R 561	184 gr

ΚΑΘΗΣΗ	5 cm
Φ.Ε.Β.	2,45 gr/cm ³
AIR CONTENT	2,8
ΔΟΝΗΣΗ	5" + 5"
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	22 °C
ΥΓΡΑΣΙΑ	58 %

ΕΝΤΥΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΥΨΟΥΣ ΚΑΙ ΒΑΡΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Α/Α	ΒΑΡΟΣ (gr)	ΥΨΟΣ (cm)	ΤΡΟΠΟΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ
1	2.483,0	10,34	εργαστήριο
2	2.516,0	10,46	>>
3	2.429,0	10,22	>>
4	2.446,7	10,29	>>
5	2.493,1	10,43	>>
6	2.494,8	10,41	>>
7	2.499,1	10,35	>>
8	2.506,4	10,44	>>
9	2.454,1	10,20	>>
10	2.495,0	10,37	ανεμιστήρας
11	2.459,0	10,25	>>
12	2.465,4	10,28	>>
13	2.427,6	10,21	>>
14	2.470,4	10,37	>>
15	2.515,2	10,49	>>
16	2.454,3	10,16	>>
17	2.449,0	10,25	>>
18	2.483,2	10,36	>>
19	2.513,0	10,41	νερό
20	2.456,6	10,25	>>
21	2.458,2	10,25	>>
22	2.451,9	10,21	>>
23	2.399,0	9,96	>>
24	2.412,7	10,08	>>
25	2.479,0	10,35	>>
26	2.480,8	10,33	>>
27	2.460,4	10,25	>>

ΠΙΝΑΚΑΣ 10

ΝΟΥΜΕΡΟ : 57
 ΗΜΕΡ/ΝΙΑ : 4/2/98
 ΩΡΑ : 13:30

ΑΝΑΜΕΙΓΜΑ	II 45 – 0,45
ΤΣΙΜΕΝΤΟ	13.385 gr
ΝΕΡΟ	6.025 gr
ΑΜΜΟΣ	27.790 gr
ΓΑΡΜΠΙΛΙ	27.790 gr
ΡΕΥΣΤ/ΤΗΣ R 561	-

ΚΑΘΗΣΗ	9,5 cm
Φ.Ε.Β.	2,36 gr/cm ³
AIR CONTENT	2,8
ΔΟΝΗΣΗ	5" + 5"
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	22 °C
ΥΓΡΑΣΙΑ	57 %

ΕΝΤΥΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΥΨΟΥΣ ΚΑΙ ΒΑΡΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

A/A	ΒΑΡΟΣ (gr)	ΥΨΟΣ (cm)	ΤΡΟΠΟΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ
1	2375,2	9,97	ανεμιστήρας
2	2492,1	10,65	>>
3	2442,7	10,30	>>
4	2408,7	10,08	>>
5	2463,2	10,38	>>
6	2430,6	10,29	>>
7	2489,1	10,52	>>
8	2393,3	10,04	>>
9	2437,0	10,27	>>
10	2493,8	10,62	εργαστήριο
11	2438,3	10,26	>>
12	2454,0	10,31	>>
13	2470,7	10,35	>>
14	2417,1	10,22	>>
15	2406,8	10,03	>>
16	2397,8	10,15	>>
17	2459,8	10,46	>>
18	2346,1	9,82	>>
19	2407,0	10,19	νερό
20	2407,8	10,12	>>
21	2405,9	10,15	>>
22	2329,4	9,81	>>
23	2385,0	10,03	>>
24	2393,0	10,11	>>
25	2385,7	10,02	>>
26	2455,4	10,38	>>
27	2375,9	10,02	>>

ΠΙΝΑΚΑΣ 11

ΝΟΥΜΕΡΟ : 61
 ΗΜΕΡ/ΝΙΑ : 9/2/98
 ΩΡΑ : 11:15

ΑΝΑΜΕΙΓΜΑ	II 35 – 0,45
ΤΣΙΜΕΝΤΟ	10.255 gr
ΝΕΡΟ	4.615 gr
ΑΜΜΟΣ	30.065 gr
ΓΑΡΜΠΙΛΙ	30.065 gr
ΡΕΥΣΤ/ΤΗΣ R 561	184,6 gr

ΚΑΘΗΣΗ	2,5 cm
Φ.Ε.Β.	2,4 gr/cm ³
AIR CONTENT	1,5
ΔΟΝΗΣΗ	5" + 5"
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	18,5 °C
ΥΓΡΑΣΙΑ	53 %

ΕΝΤΥΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΥΨΟΥΣ ΚΑΙ ΒΑΡΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Α/Α	ΒΑΡΟΣ (gr)	ΥΨΟΣ (cm)	ΤΡΟΠΟΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ
1	2.490,2	10,39	ανεμιστήρας
2	2.493,6	10,39	>>
3	2.432,1	10,09	>>
4	2.455,3	10,27	>>
5	2.447,2	10,22	>>
6	2.478,0	10,33	>>
7	2.503,4	10,42	>>
8	2.471,5	10,28	>>
9	2.466,7	10,26	>>
10	2.503,3	10,45	εργαστήριο
11	2.449,0	10,18	>>
12	2.475,1	10,32	>>
13	2.504,7	10,38	>>
14	2.446,0	10,17	>>
15	2.534,8	10,58	>>
16	2.501,0	10,42	>>
17	2.445,7	10,17	>>
18	2.500,6	10,41	>>
19	2.505,6	10,48	νερό
20	2.474,2	10,31	>>
21	2.540,9	10,52	>>
22	2.468,6	10,25	>>
23	2.402,5	9,98	>>
24	2.457,4	10,21	>>
25	2.485,0	10,32	>>
26	2.488,7	10,29	>>
27	2.468,7	10,24	>>

ΠΙΝΑΚΑΣ 12

ΝΟΥΜΕΡΟ : 63
ΗΜΕΡ/ΝΙΑ : 11/2/98
ΩΡΑ : 12:15

ΑΝΑΜΕΙΓΜΑ	II 35 – 0,45*
ΤΣΙΜΕΝΤΟ	13.460 gr
ΝΕΡΟ	6.055 gr
ΑΜΜΟΣ	27.745 gr
ΓΑΡΜΠΙΛΙ	27.745 gr
ΡΕΥΣΤ/ΤΗΣ R 561	124 gr

ΚΑΘΗΣΗ	11 cm
Φ.Ε.Β.	2,36 gr/cm ³
AIR CONTENT	2,3
ΔΟΝΗΣΗ	5" + 5"
ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ	19,5 °C
ΥΓΡΑΣΙΑ	51 %

ΕΝΤΥΠΟ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΥΨΟΥΣ ΚΑΙ ΒΑΡΟΥΣ ΔΟΚΙΜΙΩΝ

Α/Α	ΒΑΡΟΣ (gr)	ΥΨΟΣ (cm)	ΤΡΟΠΟΣ ΣΥΝΤΗΡΗΣΗΣ
1	2.428,1	10,19	ανεμιστήρας
2	2.372,1	10,05	>>
3	2.406,7	10,11	>>
4	2.401,8	10,10	>>
5	2.381,3	10,02	>>
6	2.378,7	10,02	>>
7	2.400,6	10,13	>>
8	2.393,1	10,11	>>
9	2.442,6	10,24	>>
10	2.442,7	10,25	εργαστήριο
11	2.359,0	10,03	>>
12	2.461,8	10,37	>>
13	2.403,1	10,07	>>
14	2.317,9	10,03	>>
15	2.473,7	10,41	>>
16	2.407,6	10,12	>>
17	2.368,1	9,97	>>
18	2.484,2	10,43	>>
19	2.443,7	10,22	νερό
20	2.386,3	10,09	>>
21	2.436,8	10,24	>>
22	2.406,4	10,12	>>
23	2.409,2	10,13	>>
24	2.433,7	10,22	>>
25	2.476,9	10,39	>>
26	2.417,8	10,14	>>
27	2.437,4	10,24	>>

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Σημειώσεις Χημείας Πανεπιστήμιο Πατρών (1993)
- [2] 5ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Λευκωσία 7-9 Μαΐου 1981
- [3] Τεχνολογία Σκυροδέματος, Χρίστου Οικονόμου, 2η έκδοση
- [4] Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος (Φ.Ε.Κ.:266/Β/9-5-1985)
- [5] Θέματα Τεχνολογίας Σκυροδέματος: Διαλέξεις, Παν. Κουφόπουλος, Αθήνα 1988
- [6] Υπενθύμιση βασικών αρχών τεχνολογίας σκυροδέματος, Σημειώσεις Σ. Κόλιας, Αθήνα 1996
- [7] Properties of Concrete, A.M.Neville, Longman Group LTD, 4th edition 1995
- [8] Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation by V. Papadakis, C. Vayenas, M. Fardis, ACI Materials Journal, July-August 1991
- [9] Πρότυπο Rilem CPC18: Measurement of hardened concrete carbonation depth, 1988
- [10] Ανθεκτικότητα του Ωπλισμένου Σκυροδέματος, Θ.Π.Τάσιος-Κ.Αλιγιζάκη, Αθήνα 1993
- [11] Πρότυπο RILEM, No 11.2 Absorption of water by capillarity