

# Γέφυρα Ρίου-Αντιρίου: Ποιοτικός Έλεγχος και Στατιστική Ανάλυση των Αποτελεσμάτων

Σ.Λυκούδης

*Υπεύθυνος Εργαστηρίου Σκυροδέματος στην Κοινοπραξία γέφυρα*

Λ. Χαρικιοπούλου – Cordona

*Συντελεστής Μελέτης Σκυροδέματος και Γεωτεχνικών Εργασιών στην Κοινοπραξία Γέφυρα*

Π. Παπανικόλας

*Τεχνικός Διευθυντής στην Κοινοπραξία Γέφυρα*

*Λέξεις κλειδιά:* παραγωγή σκυροδέματος, ποιοτικός έλεγχος, σκυρόδεμα υψηλής επιτελεσματικότητας, δοκιμές συστατικών σκυροδέματος, αντοχή, τυπική απόκλιση.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Για το σκυρόδεμα της Γέφυρας Ρίου – Αντιρίου αναπτύχθηκαν πάνω από 15 συνθέσεις ανάλογα με την αντοχή, την ανθεκτικότητα και τις απαιτήσεις των μεθόδων κατασκευής. Το εργαστήριο Σκυροδέματος είναι υπεύθυνο για την διασφάλιση της ομοιόμορφης παραγωγής του σκυροδέματος συγκεκριμένης σύνθεσης και την στατιστική αποτίμηση των αποτελεσμάτων. Για τον σκοπό αυτό απαιτούνται μια σειρά από ελέγχους στα επιμέρους συστατικά του σκυροδέματος, στο παρασκευαστήριο, και στο παραγόμενο νωπό και ώριμο σκυρόδεμα. Στο άρθρο παρουσιάζονται οι ποιοτικοί έλεγχοι διασφάλισης ομοιόμορφης παραγωγής σκυροδέματος καθώς και η στατιστική αποτίμηση των αποτελεσμάτων της μεγάλης δειγματοληψίας δοκιμών θραύσης σκυροδέματος.

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Όπως είδαμε στο άρθρο "Μελέτη συνθέσεων σκυροδέματος στη Γέφυρα Ρίου-Αντιρίου" ανάλογα με τις απαιτήσεις της μελέτης και του τρόπου κατασκευής σχεδιάστηκαν οι διάφορες συνθέσεις σκυροδέματος και επιλέχθηκαν οι αναλογίες των υλικών.

Κατά την διάρκεια της παραγωγής και σε καθημερινή βάση ο ποιοτικός έλεγχος διασφαλίζει την συμφωνία της παραγωγής κάθε φόρμουλας με τα χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης σύνθεσης. Ο στόχος είναι να μειωθεί η μεταβλητότητα στα συστατικά του σκυροδέματος (τσιμέντο-αδρανή-νερό-πρόσμικτα), στη διαδικασία ανάμειξης (hardware του παρασκευαστηρίου, ζυγοί, mixer κτλ.), στη θερμοκρασία του σκυροδέματος (χρήση ζεστού νερού κατά τους χειμερινούς μήνες-χρήση κρύου νερού κατά τους θερινούς μήνες) και στη μέτρηση των χαρακτηριστικών του σκυροδέματος (νωπό – στερεά μορφή).

Για πρώτη φορά πραγματοποιήθηκε παραγωγή σκυροδέματος με απαιτήσεις τις υψηλές αντοχές, τον μεγάλο όγκο παρασκευής, την εκτεταμένη διάρκεια εργασιμότητας και την χρήση τσιμέντου CEMIII σε μαζική παραγωγή.

## 2 ΈΛΕΓΧΟΣ ΥΛΙΚΩΝ ΠΑΡΑΣΚΕΥΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η σταθερότητα των συστατικών υλικών του σκυροδέματος, όσον αφορά τα ποιοτικά χαρακτηριστικά τους, είναι βασική προϋπόθεση για την δημιουργία σταθερής και ομοιόμορφης παραγωγής.

### 2.1 Τσιμέντο

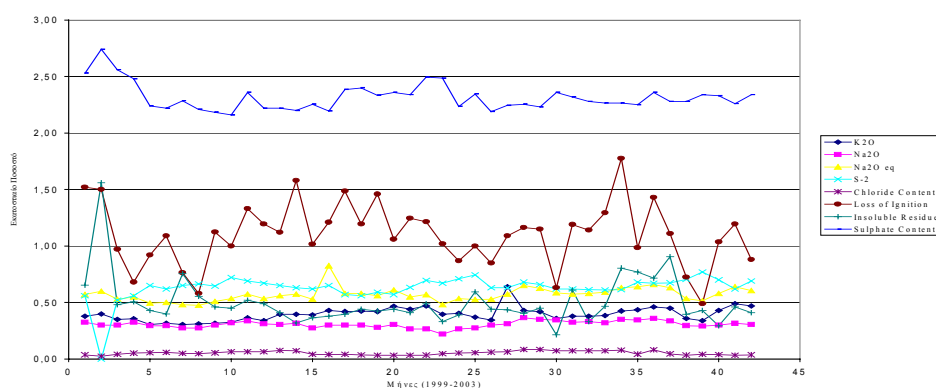
Το τσιμέντο CEMIII/A 42.5-NW/NA (σκωριοτσιμέντο), με ποσότητα σκωρίας μεγαλύτερης του 60% (slag>60%) κατά EN 196-1, είναι το υλικό εκείνο που επιλέχθηκε για τις περισσότερες συνθέσεις σκυροδέματος της Κυρίως Γέφυρας.

Το τσιμέντο CEMIII παρασκευάζεται σε δόσεις των 1200-1500 τόνων από το Εργοστάσιο Τσιμέντων TITAN στο Δρέπανο Αχαΐας αποκλειστικά για την Κ/Ξ Γέφυρα.

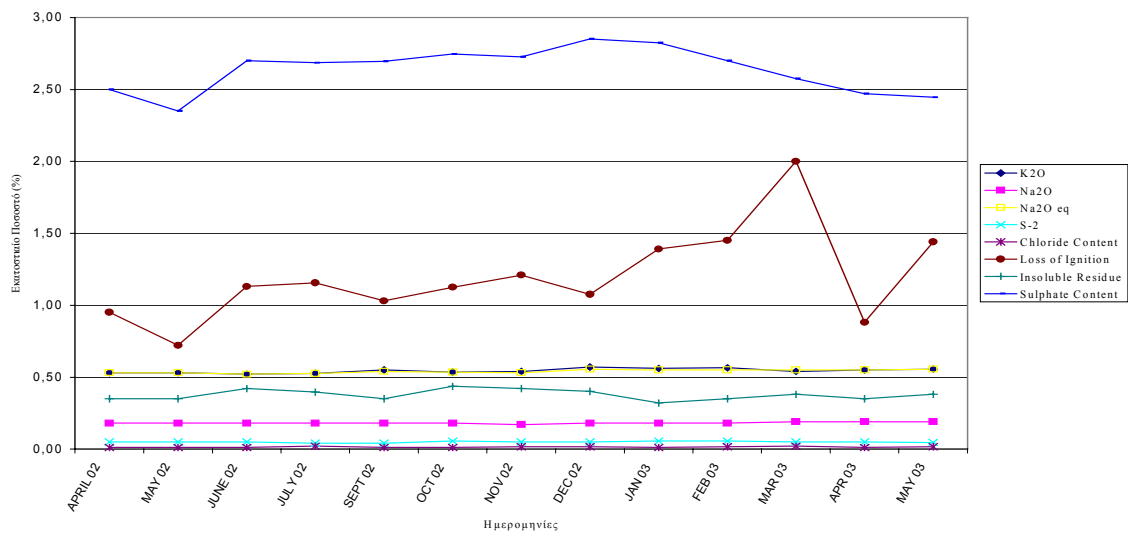
Σε περίπτωση που λόγω του εντατικού κύκλου εργασιών (π.χ. σκυροδέτηση πλάκας καταστρώματος) απαιτούνταν υψηλότερες αντοχές σε μικρές ηλικίες, έγινε χρήση του τσιμέντου CEMI 52.5-NA κατά EN 196-1. Τέτοια στοιχεία ήταν τα προενταμένα δοκάρια στην γέφυρα πρόσβασης του Αντιρίου (φόρμουλα 416/418), και οι βραχίονες (φόρμουλα 620-C60/75). Το τσιμέντο αυτό παρασκευάζεται σε δόσεις των 175-200tn από το Εργοστάσιο Τσιμέντων TITAN στο Καμάρι Βοιωτίας αποκλειστικά για την Κ/Ξ Γέφυρα.

Σύμφωνα με συμβατική υποχρέωση της εταιρείας TITAN κάθε δόση παραγωγής (batch) συνοδεύεται από αποτελέσματα δοκιμών στα βασικά χαρακτηριστικά του τσιμέντου, τα οποία πρέπει να βρίσκονται εντός συγκεκριμένων ορίων (συμβόλαιο με TITAN). Στα Σχήματα 1 και 3 φαίνονται τα αποτελέσματα της χημικής ανάλυσης των τσιμέντων CEMIII και CEMI αντίστοιχα. Στα Σχήματα 2 και 4 φαίνονται τα ιστογράμματα συχνοτήτων με τις αντοχές από τα τσιμέντα CEMIII και CEMI αντίστοιχα. Ταυτόχρονα σε διμηνιαία βάση ή όποτε κρινόταν σκόπιμο στέλνονταν δείγμα σε εξωτερικό συνεργαζόμενο εργαστήριο "LERM" προκειμένου να επιβεβαιώνονται από την κατασκευάστρια Κοινοπραξία ή την επίβλεψη τα αποτελέσματα όλων των χαρακτηριστικών των τσιμέντων.

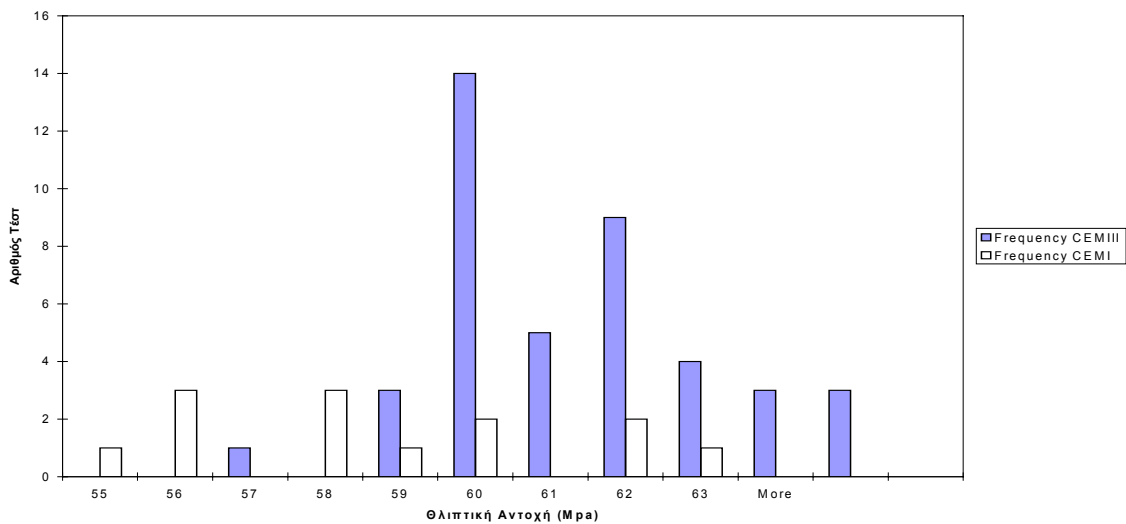
Σε κάθε παραλαβή λάμβανε χώρα διπλή δειγματοληψία: ένα δείγμα για την Κ/Ξ Γέφυρα και ένα δείγμα πίσω στον TITAN.



Σχήμα 1. Περιεκτικότητα Χημικών Συστατικών-CEMIII-Αποτελέσματα Εργαστηρίου TITAN



Σχήμα 2. Περιεκτικότητα Χημικών Συστατικών-CEMI-Αποτελέσματα Εργαστηρίου TITAN



Σχήμα 3. Ιστόγραμμα Αντοχών 28 ημερών CEMIII-CEMI-Αποτελέσματα Εργαστηρίου TITAN

## 2.2 Αδρανή Υλικά

Τα αδρανή υλικά, τα οποία επιλέχθηκαν, είναι θραυστά ασβεστολιθικά αδρανή προελεύσεως λατομείου Lafarge Αράξου. Ανάλογα με την κοκκομετρική διαβάθμιση τους κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Σκύρα 10/20
- Γαρμπίλι 4/10
- Άμμος 0/4

Η χρήση του ασβεστόλιθου εξαφανίζει τον κίνδυνο της αλκαλοπυριτικής αντίδρασης. Σύμφωνα με συμβατική υποχρέωση της εταιρείας Lafarge η εταιρεία προσκομίζει σε κάθε ημερήσια παραλαβή αποτελέσματα δοκιμών επί του φορτίου παράδοσης:

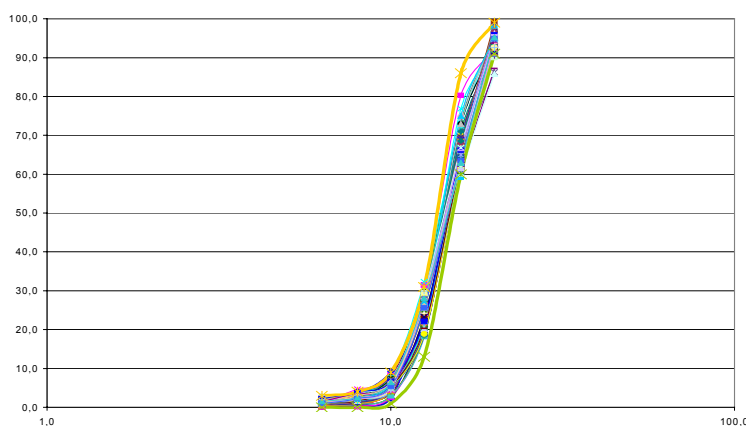
- Καθαρότητα για το 10/20
- Καθαρότητα για το 4/10
- Fines για την άμμο

Σε εβδομαδιαία βάση επίσης η εταιρεία Lafarge αποστέλλει στο εργαστήριο της Κοινοπραξίας τα αποτελέσματα των δοκιμών που πραγματοποιούνται κατά την διάρκεια της παραγωγής των αδρανών και αφορούν τις δοκιμές: κοκκομέτρηση, απορροφητικότητα, δείκτης πλακοειδούς, επιβλαβή υλικά, φαινόμενο βάρος, ειδικό βάρος, καθαρότητα, περιεχόμενη υγρασία για τα χονδρόκκοκα. Για την άμμο κοκκομέτρηση, απορροφητικότητα, ισοδύναμο άμμου, επιβλαβή υλικά, φαινόμενο βάρος, ειδικό βάρος, μπλε του μεθυλενίου, περιεχόμενη υγρασία.

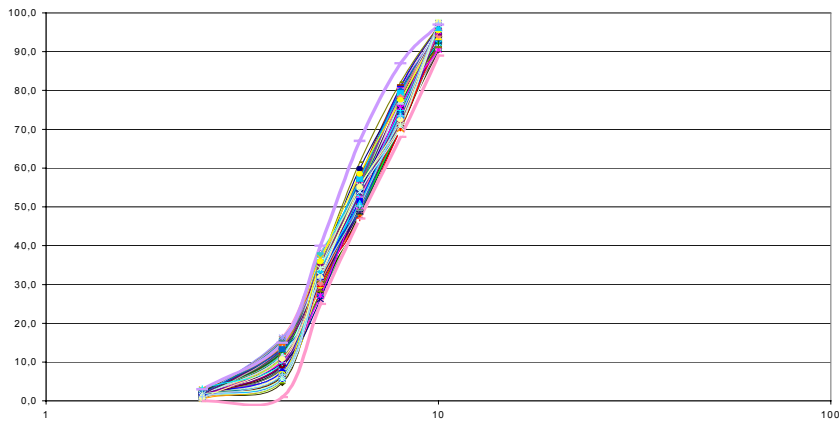
Σε ημερήσια βάση στο Εργαστήριο της Κοινοπραξίας πραγματοποιούνται δοκιμές κοκκομέτρησης σε κάθε κλάσμα, δοκιμές καθαρότητας στα χονδρά κλάσματα και σε εβδομαδιαία βάση ισοδύναμο άμμου και μπλε του μεθυλενίου.

Σε μηνιαία βάση δείγματα στέλνονται στο εξωτερικό εργαστήριο της ΕΚΕΤ (Ελληνικό Κέντρο Ερευνών Τσιμέντου) και πραγματοποιούνται όλες οι δοκιμές προσδιορισμού χαρακτηριστικών των αδρανών.

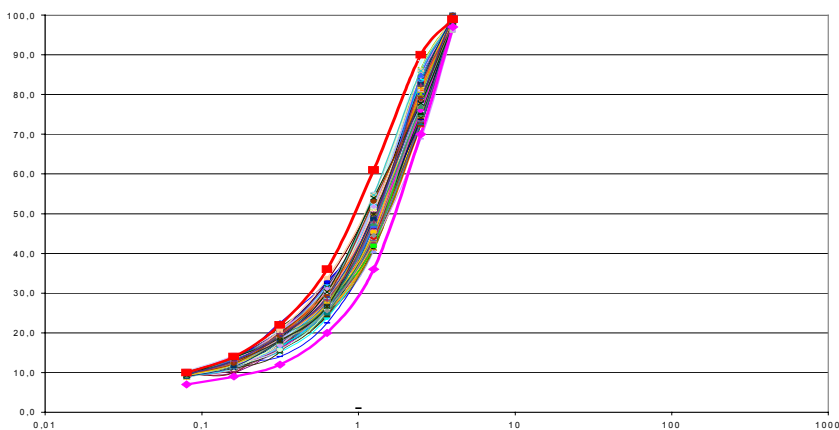
Στα ακόλουθα σχήματα φαίνονται τα αποτελέσματα κοκκομετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στο Εργαστήριο της Κοινοπραξίας.



Σχήμα 4. Αποτελέσματα Κοκκομετρήσεων έτους 2002 στο κλάσμα 10/20



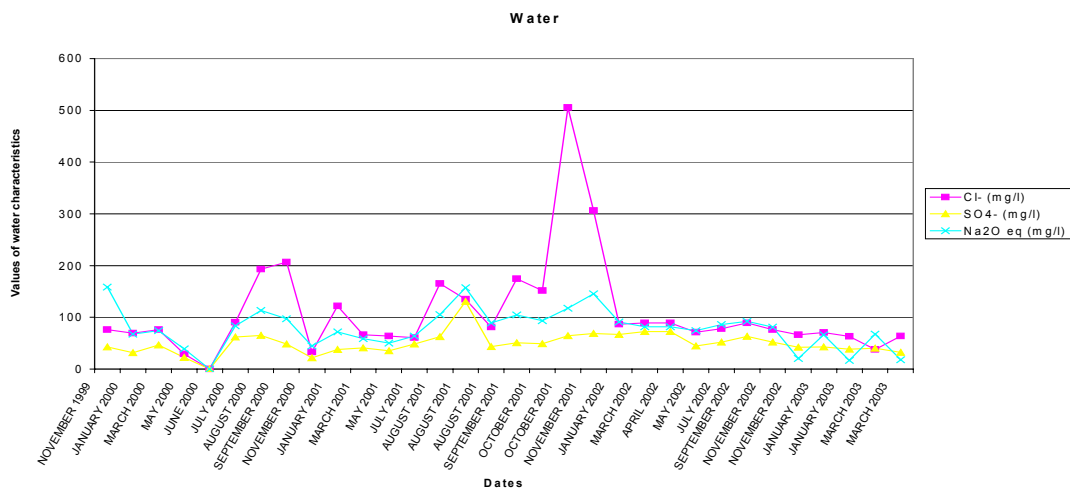
Σχήμα 5. Αποτελέσματα Κοκκομετρήσεων έτους 2002 στο κλάσμα 4/10



Σχήμα 6. Αποτελέσματα Κοκκομετρήσεων έτους 2002 στο κλάσμα 0/4

### 2.3 Νερό

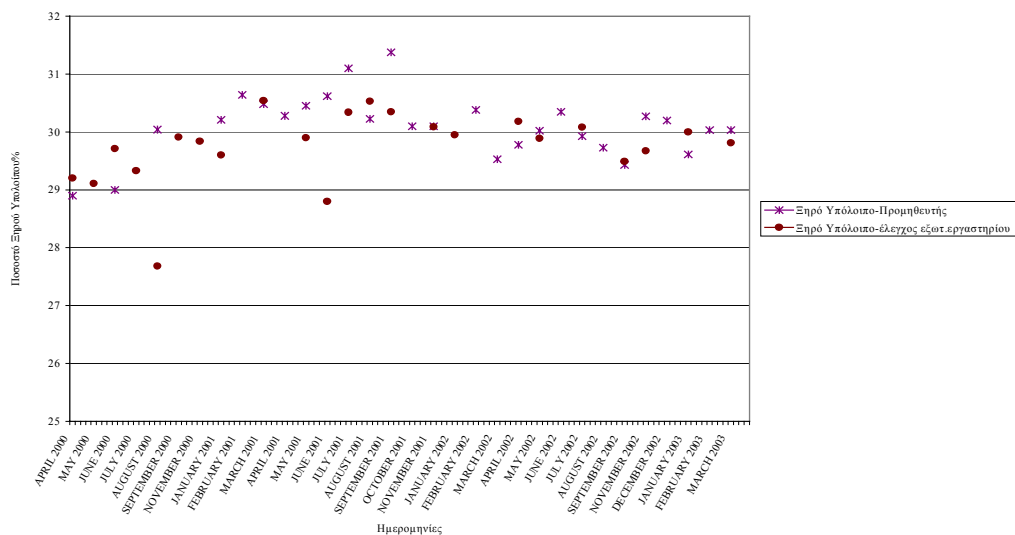
Τόσο στο Αντίριο όσο και στο Ρίο το νερό προέρχεται από γεώτρηση. Σε εβδομαδιαία βάση πραγματοποιείται έλεγχος στο εργαστήριο (προκαταρκτική εξέταση κατά EN 1008) και σε διμηνιαία βάση αποστέλλεται δείγμα στο εξωτερικό εργαστήριο της ΕΚΕΤ για να ελεγχθεί. Πραγματοποιούνται δοκιμές σύμφωνα με EN1008 και προσδιορισμός χλωριόντων, θεικών, αλκαλικών (και εκφρασμένα σε  $\text{Na}_2\text{O eq}$ ).



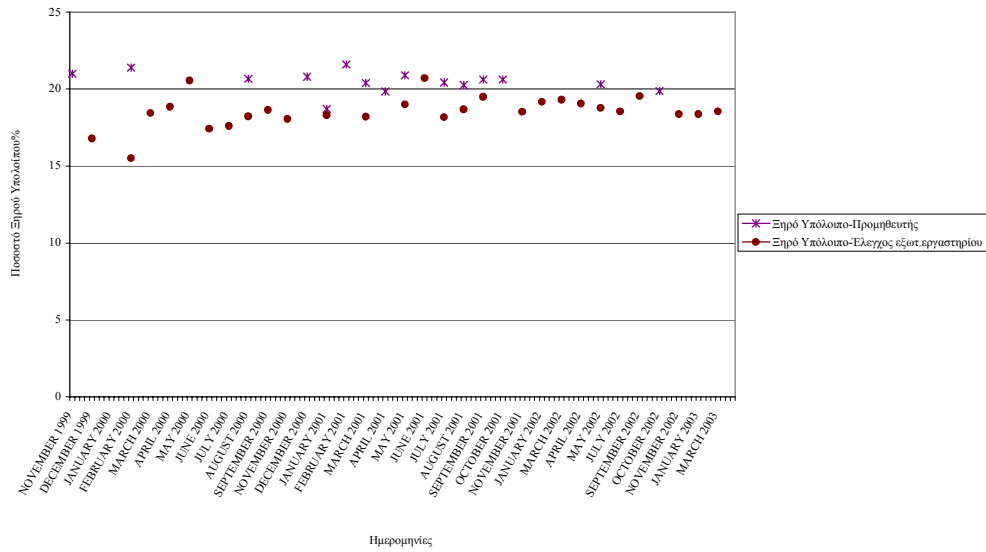
Σχήμα 7. Χημικά Συστατικά Νερού.

## 2.4 Πρόσμικτα

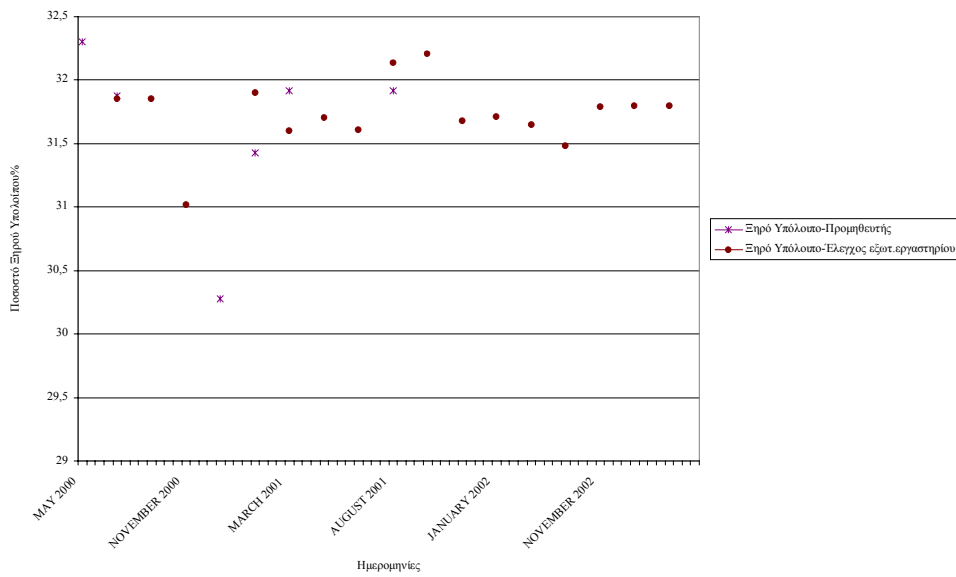
Τα βασικά πρόσμικτα που επιλέχθηκαν μετά από εκτεταμένο έλεγχο είναι τα: Optima 100 της Chryso, Glenium 27 και Rheobuilt T3 της MBT. Στην παραλαβή κάθε δόση αποστέλλονται αποτελέσματα από τον προμηθευτή που αφορούν την πυκνότητα, pH, ξηρό υπόλοιπο και IR Analysis. Σε διμηνιαία βάση ελέγχονται δείγματα από το εξωτερικό εργαστήριο της ΕΚΕΤ.



Σχήμα 8. Πυκνότητα & Ξηρό Υπόλοιπο Optima 100



Σχήμα 9. Πυκνότητα & Ξηρό Υπόλοιπο Glenium 27



Σχήμα 10. Πυκνότητα & Ξηρό Υπόλοιπο Rheobuild T3

### 3 ΠΑΡΑΣΚΕΥΑΣΤΗΡΙΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Το Παρασκευαστήριο Σκυροδέματος είναι υπεύθυνο για την παραγωγή σκυροδέματος, την επάρκεια και την τροφοδοσία των υλικών, την αποθήκευσή τους στον χώρο του εργοταξίου την εβδομαδιαία-ημερήσια οργάνωση της παραγωγής.

Το παρασκευαστήριο σκυροδέματος είναι στην ουσία δύο ανεξάρτητα όμοια παρασκευαστήρια τα οποία πληρούν τις προϋποθέσεις κατά EN 206, ClassIII με μέσο όρο παραγωγής 4m<sup>3</sup>/h το καθένα (και μέγιστη το m<sup>3</sup>/h). Αποτελείται το καθένα από:

- Κατακόρυφο mixer (τύπου Dual Shaft-pan mixer) χωρητικότητας 2m<sup>3</sup>
- Πέντε silo αδρανών με διπλή πόρτα ακριβούς δοσολογίας
- Skip τροφοδοσίας αδρανών
- Αυτόματη μεταφορική ταινία αδρανών
- Τέσσερα Silo τσιμέντου και ένα Silica Fume
- Σύστημα πλήρως ελεγχόμενο από υπολογιστή, το οποίο επιτρέπει αυτόματη, ημιαυτόματη και χειροκίνητη παραγωγή σκυροδέματος.
- Σύστημα Wattmeter με εκτυπούμενη καταγραφή
- Συνεχείς εκτυπώσεις των Batch Report & Delivery Note
- Παρακολούθηση κατανάλωσης
- Ειδοποίηση (alarm) σε περίπτωση υπέρβασης των ορίων ακρίβειας
- Σύστημα υγρασιομέτρων (τύπου microwave) για παρατήρηση πιθανής μεταβολής της υγρασίας (στα silo γαρμπιλιου και άμμου).

Έλεγχος των ζυγιστικών συστημάτων πραγματοποιείται κάθε τρίμηνο από το Εργαστήριο με διακριβωμένα βάρη.

#### 4 ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ - ΈΛΕΓΧΟΙ ΚΑΤΑ ΤΗΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ

Σε ημερήσια βάση πριν αρχίσει η παραγωγή σκυροδέματος ελέγχεται η περιεχόμενη υγρασία των αδρανών. Ελέγχεται στην πρώτη δόση η κάθιση (slump), η εξάπλωση (flow) και η θερμοκρασία του σκυροδέματος. Αν οι τιμές εργασιμότητας συμφωνούν με τις τιμές της σύνθεσης συμμόρφωσης (conformity trial) και η θερμοκρασία του σκυροδέματος είναι ικανοποιητική ανάλογα με την εποχή, προχωρά η διαδικασία της παραγωγής σκυροδέματος. Αν οι τιμές δεν συμφωνούν γίνονται οι διορθωτικές ρυθμίσεις ( ±5kg νερό, ±0.5kg πρόσμεικτο) και ρυθμίζεται η αναλογία ζεστού/κρύου νερού προκειμένου να επιτευχθεί η ικανοποιητική θερμοκρασία.

Οι τιμές κάθισης/εξάπλωσης ελέγχονται σε κάθε βαρέλα. Το ομοιόμορφο της παραγωγής ελέγχεται μέσω του βατόμετρου(wattmeter) από τον χειριστή στο παρασκευαστήριο σκυροδέματος.

Επί του έργου ελέγχεται επίσης η εργασιμότητα του σκυροδέματος (κάθιση/εξάπλωση) και η θερμοκρασία του από τον μηχανικό ποιότητας QC του έργου.

Κάθε 100m<sup>3</sup> ή σε κάθε ημερήσια σκυροδέτηση (αν η ποσότητα είναι μικρότερη) ανά κομμάτι κατασκευής γίνεται δειγματοληψία κύβων. Επίσης, ανάλογα με τις απαιτήσεις της κατασκευής (ξεκαλούπωμα, 1<sup>η</sup>, 2<sup>η</sup> φάση προέντασης κ.τ.λ.) λαμβάνονται κύβοι για θραύση σε πρώιμη ηλικία.

Σε εβδομαδιαία βάση ελέγχεται η πυκνότητα και η εξίδρωση του φρέσκου σκυροδέματος ανά κατηγορία.

Όλα τα αποτελέσματα αρχειοθετούνται ηλεκτρονικά και σε μηνιαία βάση τα αποτελέσματα προωθούνται στον Επιβλέποντα Μηχανικό.

#### 5 ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΑΠΟΤΙΜΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Σύμφωνα με το ACI 214-77 (Recommended Practice for Evaluation of Strength Test Results of Concrete) μπορούμε να ξεχωρίσουμε την μεταβλητότητα σε:



- Μεταβλητότητα στη δοκιμή (within-test-variation)
- Μεταβλητότητα από παρτίδα σε παρτίδα παραγωγής (batch-to-batch)

Η μεταβλητότητα στη δοκιμή οφείλεται κυρίως σε διαφορές στη δειγματοληψία, χειρισμού και συντήρησης των δοκιμίων, ποιότητα των μητρών, συνθήκες θερμοκρασίας και υγρασίας συντήρησης, διαδικασία θραύσης και τρόπου «καπελώματος» των κυλίνδρων.

Η μείωση αυτής της μεταβλητότητας επιτεύχθηκε με διαρκή εκπαίδευση του προσωπικού, την ύπαρξη απλοποιημένων μεθόδων κάθε δοκιμής με συνεχή έλεγχο και αντικατάσταση του εξοπλισμού του εργαστηρίου με παρακολούθηση των συνθηκών στο θάλαμο συντήρησης και τη χρήση καπελώματος με τη μέθοδο “Sand Box”.

Για την εύρεση της αντοχής σε ηλικία 7 και 28 ημερών δειγματοληψία 3 δοκιμίων πραγματοποιείται και αποτέλεσμα της τιμής είναι ο μέσος όρος των τριών επιμέρους τιμών.

Η μεταβλητότητα από παρτίδα σε παρτίδα (batch-to-batch variation) οφείλεται κυρίως σε μεταβολή από παρτίδα σε παρτίδα στην ποσότητα του νερού (συνήθως λόγω υγρασιών των αδρανών) μεταβλητότητα των ποιοτικών χαρακτηριστικών των συστατικών υλικών, ποσοστό αέρα, διαδικασία μείξης, αξιοπιστία των ζυγιστικών συστημάτων.

Στις προηγούμενες παραγράφους αναπτύχθηκε πως παρακολουθούνται τα ποιοτικά χαρακτηριστικά των υλικών. Τα αδρανή υλικά απόθηκεύονται σε σκεπασμένους χώρους υποδοχής (προκειμένου να προστατεύονται από τις υγρασιακές - θερμοκρασιακές μεταβολές). Πριν την έναρξη της παραγωγής ή όποτε κρίνεται σκόπιμο πραγματοποιείται έλεγχος υγρασίας και στα τρία κλάσματα των αδρανών. Υπάρχει η δυνατότητα της χρήσης  $\pm 5\text{kg/m}^3$  νερού ή  $\pm 0.5\text{kg/m}^3$  προσμείκτου κατά την κρίση του χειριστή του εργαστηρίου (François de Larrard. Modern Approach of Stability of Concrete in an Industrial Process). Τα ζυγιστικά στο παρασκευαστήριο ελέγχονται με πρότυπα βάρη και συγκεκριμένη διαδικασία κάθε τρεις μήνες.

Τα όρια απόρριψης κάποιου "ελαττωματικού" batch όσον αφορά τις ποσότητες των υλικών είναι συγκεκριμένα, ενώ σε ειδοποίηση του προγράμματος, ο χειριστής είναι υποχρεωμένος να προβεί σε χειροκίνητη διόρθωση.

Η τυπική απόκλιση μιάς φόρμουλας σκυροδέματος στην παραγωγή δίνεται, σύμφωνα με το ACI 214-77 (Reapproved 1997), από την εξίσωση 1:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (1)$$

όπου  $\sigma$  = η συνολική τυπική απόκλιση,  $\sigma_1$  = τυπική απόκλιση στη δοκιμή (within the test variation) και  $\sigma_2$  = τυπική απόκλιση από παρτίδα σε παρτίδα (batch to batch variation)

Στον Πίνακα 1 που ακολουθεί φαίνεται κατά κατηγορία σκυροδέματος τα στατιστικά χαρακτηριστικά κάθε φόρμουλας σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκε στηνκυρίως γέφυρα:

Πίνακας 1. Μέση Τιμή Αντοχής και Τυπικής Απόκλισης ανά Κατηγορία Σκυροδέματος

Κατηγορία Σκυροδέματος	Όνομα Φόρμουλας	Ποσότητα Τσιμέντου	Μέση Αντοχή (Μpa)	Τυπική Απόκλιση (Μpa)	Min	Max	Range	Count
C40/50	416/418	450	74,4	3,7	59,7	83,3	23,6	168
	406	400	76,6	4,8	60,1	87,2	27,1	107
C45/55	425/426/428/429	420	68,6	4,8	55,9	87,2	31,3	952
	420	400	69,9	4,9	60,5	84,8	24,3	322
C50/60	520	420	75	3,2	67,2	81,8	14,6	125
	446	450	75	4,2	62,7	85,9	23,2	182
C60/75 <sup>1</sup>	610	490	82	5	72,3	96,1	23,8	47
	612	490	79,8	2,6	76,1	85,1	9	24
	620	490	80,6	2,8	74,5	93,2	18,7	247
	670	490	80,5	2	77,6	83,7	6,1	13

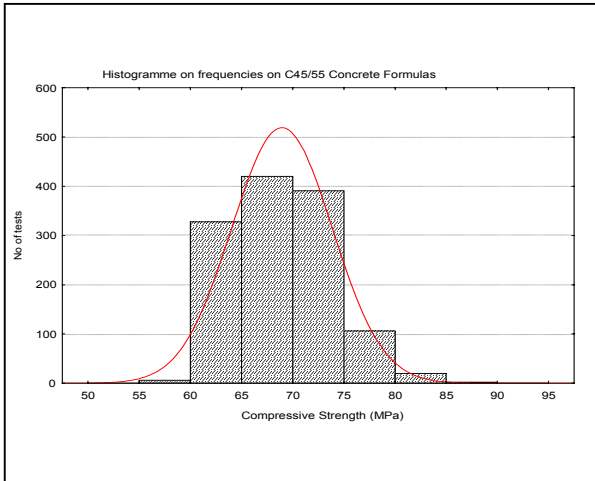
Αξίζει να σημειωθεί ότι ο σχεδιασμός κάθε φόρμουλας (εκλογή w/c και ποσότητα τσιμέντου) δεν είχε αποκλειστικό στόχο και μόνο την επίτευξη της απόλυτης αντοχής για την συγκεκριμένη κατηγορία. Άλλα στοιχεία όπως η ανθεκτικότητα, οι αντοχές σε νεαρές ηλικίες, αντλησιμότητα, ευκολία διάστρωσης, δημιουργία τελικής επιφάνειας ήταν εκείνα που συνέβαλλαν στην εκλογή αυτή.

Τα βασικά στατιστικά στοιχεία ανά κατηγορία σκυροδέματος που υπολογίστηκαν είναι:

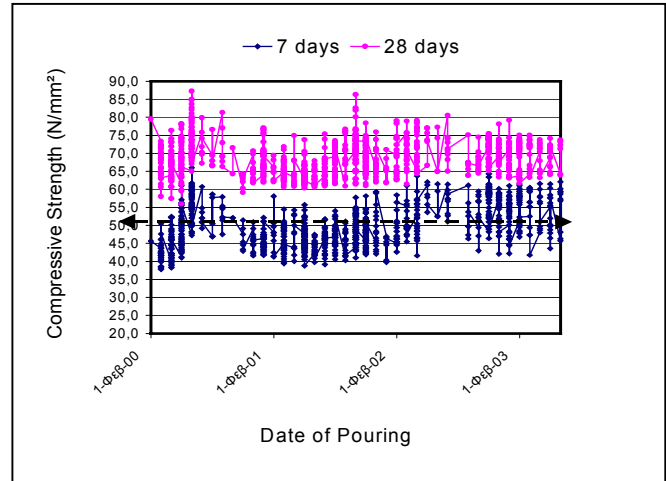
- ελάχιστη τιμή
- μέγιστη τιμή
- μέσος όρος
- τυπική απόκλιση
- έκταση
- πλήθος

<sup>1</sup> Αποτελέσματα θραύσεων σε κυλίνδρους με χρήση Sand Box

Τα ιστογράμματα συχνοτήτων για κάθε φόρμουλα εξομοιώνονται με την κανονική κατανομή (κατανομή κατά Gauss). Για παράδειγμα στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται το ιστόγραμμα συχνοτήτων στην κατηγορία σκυροδέματος C45/55 και η συσχέτισή του με την κανονική κατανομή. Στο Σχήμα 10β δίνονται τα αποτελέσματα των θραύσεων σε ηλικίες 7 και 28 ημερών από το 1999 έως το 2003.



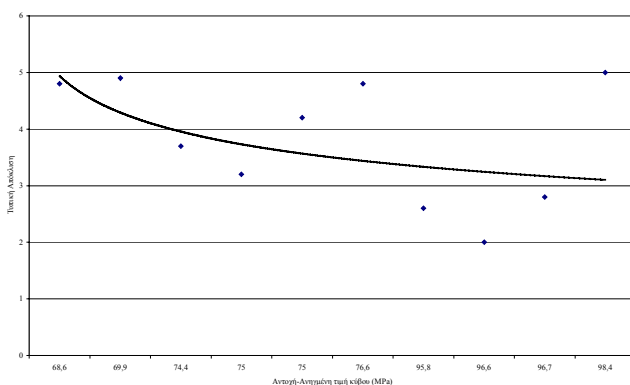
Σχήμα 11α. Παράδειγμα ιστογράμματος Συχνοτήτων



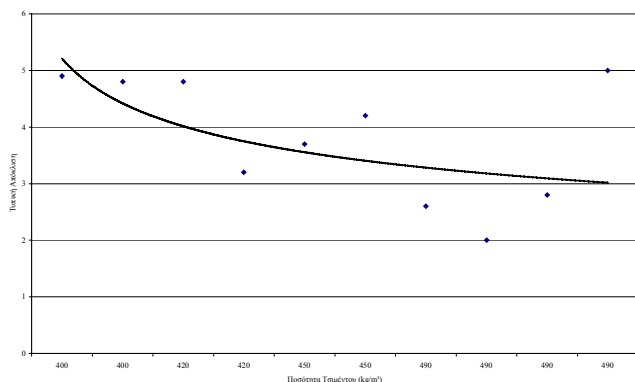
Σχήμα 11β. Παράδειγμα Αποτελέσματα θραύσεων 7 και 28 ημερών.

### 5.1 Τυπική Απόκλιση και Κατηγορία Σκυροδέματος

Στο σχήμα 13 φαίνεται η σχέση τυπικής απόκλισης και μέσης αντοχής. (Προτιμήθηκε η μέση αντοχή στον άξονα των x από την κατηγορία σκυροδέματος για καλύτερη απόδοση της σχέσης σκυροδέματος υψηλής επιτελεστικότητας και τυπικής απόκλισης)



Σχήμα 12. Διάγραμμα Τυπικής Απόκλισης-Μέσης Αντοχής



Σχήμα 13. Διάγραμμα Τυπικής Απόκλισης-Ποσότητας Τσιμέντου

Στο ACI 318-95 αναφέρεται ότι είναι πιθανό να υπάρχει μία αύξηση στην τυπική απόκλιση όταν η μέση αντοχή αυξάνεται σε βασικό βαθμό. Επίσης η αύξηση της τυπικής απόκλισης όταν η μέση αντοχή αυξάνεται σε σημαντικό βαθμό είναι κάτι λιγότερο από άμεση αναλογική αύξηση.

Στο ACI 363R-92 (High Strength Concrete) αναφέρεται ότι η τυπική απόκλιση είναι το εργαλείο εκείνο με το οποίο μπορεί να ελεγχθεί η παρακολούθηση της παραγωγής του Σκυροδέματος Υψηλής Αντοχής. Αποδεκτές τιμές απόκλισης 3.5÷4.8 Mpa (τιμή σε κύλινδρο). Ενώ σε Σκυροδέμα χαρακτηριστικής αντοχής έως 35Mpa η τιμή εκείνη η οποία χαρακτηρίζει ένα καλό εργαστήριο είναι 3.5÷4.2 Mpa (τιμή σε κύβο-βλέπε Πιν. 2)

Πίνακας 2. Πρότυπα Ελέγχου σε Σχέση με την Τυπική Απόκλιση για σκυροδέμα έως 35MPa

Τυπική Απόκλιση	Τυπική Απόκλιση				
	Εξαιρετικό	Πολύ καλό	Καλό	Μέτριο	Φτωχό
	<2.81	2.81-3.52	3.52-4.22	4.22-4.92	>4.92
Συντελεστής Απόκλισης	<3.0%	<3 ÷ 4%	4 ÷ 5%	5 ÷ 6%	>6%

## 5.2 Σχέση κυλίνδρου και κύβου

Σύμφωνα με το BS 1881:Part 120 (1983) η αντοχή του κυλίνδρου είναι ίση με το 0.8 της αντοχής του κύβου αλλά στην πραγματικότητα δεν υπάρχει τόσο απλή συσχέτιση. Ο λόγος των αντοχών κυλίνδρου/κύβου αυξάνεται σημαντικά με την αύξηση της αντοχής και είναι περίπου ίσος με το ένα (1) για αντοχές περίπου ίσες με 100Mpa (Neville.1998. Properties of Concrete).

Αυτό παρατηρήθηκε και στο εργαστήριο της Κ/Ξ και αποφασίστηκε για την κατηγορία σκυροδέματος C60/75 να πραγματοποιείται θραύση κυλίνδρων διαστάσεων 16\*32(cm) αντί για κύβους διαστάσεων 15x15x15cm.

Ταυτόχρονα επιλέγη η μέθοδος καπελώματος (Capping) με τη συσκευή Sand Box (NFP 18-415) σαν ο πλέον αξιόπιστος τρόπος μιά και η μέθοδος με το κονίαμα θείου απεδείχθη ανεπαρκής λόγω της αντοχής του κονιάματος (αντοχή κονιάματος  $\approx 50\text{MPa}$ ).

Όπως είναι εμφανές (Πιν. 1) η μέθοδος θραύσης με αυτή τη μέθοδο οδηγεί σε αποτελέσματα με χαμηλή τυπική απόκλιση.

### 5.3 Ελληνικός Κανονισμός Τεχνολογίας Σκυροδέματος και Παραγωγή

Σύμφωνα με το κριτήριο  $\Delta$  (Εργοταξιακό Σκυροδέμα μεγάλων Έργων) ο  $7^{\text{ος}}$  και ο  $8^{\text{ος}}$  κανόνας αποδοχής έπρεπε να τηρούταν για όλες τις κατηγορίες σκυροδέματος.

$$\bar{x}_{36} \geq f_{ck} + 1.70 * s \quad (7^{\text{ος}}) \quad (2)$$

$$\bar{x}_3 \geq f_{ck} + 1.83 * s \quad (8^{\text{ος}}) \quad (3)$$

όπου  $\bar{x}_{36} =$  ο μέσος όρος 36 συνεχόμενων θραύσεων,  $\bar{x}_3 =$  ο μέσος όρος 3 συνεχόμενων θραύσεων και  $s =$  η τυπική απόκλιση της τελευταίας ομάδας 60 δοκιμίων

Όπως είναι προφανές από τα γραφήματα τα Σχήματα 13 και 14 οι κανόνες αυτοί πληρούνται.

### 5.4 Αντοχή μικρής ηλικίας – Ωριμότητα (Maturity)

Προκειμένου να επιταχυνθούν οι εργασίες τάνυσης των καλωδίων στο κατάστρωμα της Κυρίως Γέφυρας, θα πρέπει να γνωρίζουμε με καλή ακρίβεια την επί τόπου αντοχή του σκυροδέματος σε νεαρή ηλικία, με μη καταστροφικούς ελέγχους. Αυτό επιτυγχάνεται με την η δοκιμή Ωριμότητας του Σκυροδέματος (ASTM Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity).

Αρχή της μεθόδου είναι να υπολογίσει την Ωριμότητα στο Πεδίο βασισμένη στην θερμοκρασιακή "ιστορία" του σκυροδετούμενου στοιχείου. Η Ωριμότητα του Σκυροδέματος εκφράζεται σε Ισοδύναμη Ηλικία (Equivalent Age) που υπολογίζεται με βάση τον νόμο του Arrhenius.

Η ταχύτητα ανάπτυξης της αντοχής μιας φόρμουλας σκυροδέματος είναι μέγεθος ανάλογο με την έκλυση θερμότητας κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου και εξαρτάται κυρίως από: την ποσότητα και τον τύπο του τσιμέντου, το λόγο νερού προς τσιμέντο, τον τύπο των αδρανών, τον τύπο του προσμείκτου που χρησιμοποιείται στην αρχική θερμοκρασία του σκυροδέματος και την θερμοκρασία περιβάλλοντος.

Η μέτρηση της "Ενέργειας Ενεργοποίησης" (Activation Energy) πραγματοποιείται στο Εργαστήριο με συντήρηση δοκιμίων σε 3 τουλάχιστον διαφορετικά περιβάλλοντα συντήρησης ( $20^{\circ}\text{C}$ , θερμομονωμένο κελί και συνθήκες περιβάλλοντος). Η ταχύτητα ανάπτυξης της αντοχής ενός σκυροδετούμενου στοιχείου στο πεδίο εξαρτάται κυρίως από την αρχική θερμοκρασία του σκυροδέματος, το σκυροδετούμενο όγκο, τις θερμομονωτικές ιδιότητες του καλουπιού, τις συνθήκες περιβάλλοντος (θερμοκρασία, υγρασία), θερμοκρασία υποστρώματος.

Τα στοιχεία αυτά αξιοποιούνται στο πεδίο με τη μέτρηση της αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας στο στοιχείο και με τον τύπο του Arrhenius υπολογίζεται η ισοδύναμη ηλικία (την ηλικία που θα είχαν τα δοκίμια αν είχαν συντηρηθεί στους  $20^{\circ}\text{C}$ ). Η εξίσωση του Arrhenius με την οποία υπολογίζεται η ισοδύναμη ηλικία είναι η παρακάτω

$$t_e = \sum_{t=0}^{age} e^{\left[ -\frac{\phi}{R} \left( \frac{1}{T+273} - \frac{1}{T_r+273} \right) \right]} * \Delta t \quad (6)$$

όπου  $t_e$  = ισοδύναμη ηλικία δοκιμίου σκληρυνμένου,  $\theta$  = θερμοκρασία σκυροδέματος,  $\phi$  = ενέργεια ενεργοποίησης (Activation Energy, joule/mol),  $R$  = παγκόσμια σταθερά ιδανικών αερίων (universal gas constant 8,3144 (J/mol)/° C),  $T$  = θερμοκρασία στοιχείου,  $T_r$  = θερμοκρασία αναφοράς, (Reference Temperature 20°C). Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιήθηκε με επιτυχία στις πλάκες καταστρώματος.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑ: Η ομοιόμορφη παραγωγή σκυροδέματος επιτυγχάνεται με συχνούς καταστρεπτικούς και μη – καταστρεπτικούς εργαστηριακούς ελέγχους του σκυροδέματος, με ελέγχους των συστατικών υλικών (τσιμέντο – αδρανή – νερό – πρόσμικτα) και της διαδικασίας ανάμιξης στο παρασκευαστήριο.

## 7 Βιβλιογραφία - Αναφορές

- ACI - Manual of Concrete Practice (All Volumes) 2000  
 ASTM - Concrete Standards  
 BS 1881 British Standards for Concrete and Aggregates  
 Day Ken. 1998. Concrete Mix Design, Quality Control and Specification  
 ENV 206 (96)-Concrete Performance, Production and Conformity EN 206 -96  
 Εσωτερικά Έγγραφα: Laboratory Procedures/Concrete Production/Sub Contract Agreements  
 F. de Larrard. 1999. Concrete Mixture Proportioning A Scientific Approach  
 Κιόχος Α. Πέτρος. 1993. Στατιστική  
 Neville A.M.. 1998. Properties of Concrete  
 Royer Till. 1998. Statistical Methods for the Earth Scientist  
 The Sand Box .1996. A new Capping System for Testing HPC Cylinders by Claude Bouley and François de Larrard  
 2000/2001/2002/2003 Annual statistical analysis (Interval Laboratory Report)  
 Jan Byfors. 1980. Plain Concrete at Early Ages  
 ΗΕΤΕΚ. 1997. Control for Early Age Cracking in Concrete Guidelines  
 J.B.Kennedy and A.M.Neville. 1986. Basic Statistical Methods for Engineers and Scientists



Φωτογραφία 1. Χώρος αποθήκευσης αδρανών



Φωτογραφία 2. Γενική άποψη του Παρασκευαστηρίου



Φωτογραφία 3. Δοκιμή Flow στο Παρασκευαστήριο



Φωτογραφία 4. Χειριστήριο Παρασκευαστηρίου Σκυροδέματος





Φωτογραφία 5. Μέτρηση θερμοκρασίας στο Παρασκευαστήριο



Φωτογραφία 6. Δοκιμή Slump στο Παρασκευαστήριο