



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΔΥΤΙΚΗΣ ΑΤΤΙΚΗΣ**  
**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**  
**ΤΜΗΜΑ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

# **Διπλωματική Εργασία**

**Διερεύνηση σκυροδεμάτων τριών κατηγοριών C20/25,  
C25/30, C35/45 κατά τους ελέγχους μηχανικών ιδιοτήτων**

**της**

**Σεΐζη Αθανασίας Μαρίας, 44369090226**

**Επιβλέπουσα: Δενεζάκη Σταυρούλα**

**Αθήνα .../.../20...**

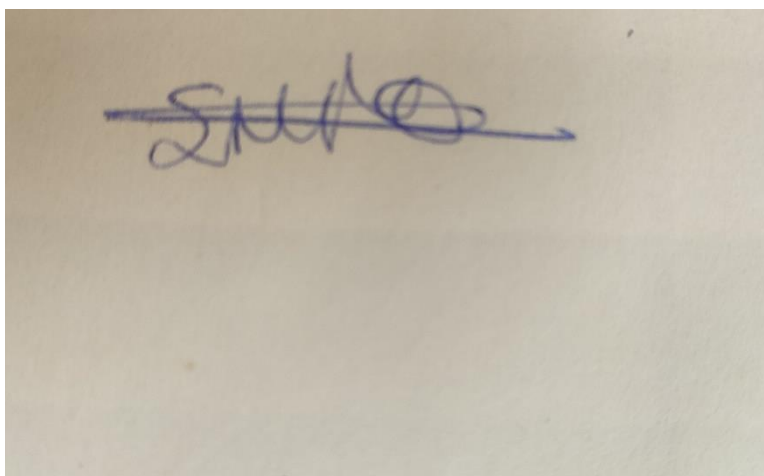
## ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

Η κάτωθι υπογεγραμμένη Σείζη Αθανασία Μαρία του Χρήστου , με αριθμό μητρώου 44369090226 φοιτήτρια του Προγράμματος Διπλωματικών Σπουδών Δομοστατικών Έργων του Τμήματος Πολιτικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, δηλώνω ότι:

«Είμαι συγγραφέας αυτής της διπλωματικής εργασίας και ότι κάθε βοήθεια την οποία είχα για την προετοιμασία της, είναι πλήρως αναγνωρισμένη και αναφέρεται στην εργασία. Επίσης, οι όποιες πηγές από τις οποίες έκανα χρήση δεδομένων, ιδεών ή λέξεων, είτε ακριβώς είτε παραφρασμένες, αναφέρονται στο σύνολό τους, με πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Επίσης, βεβαιώνω ότι αυτή η εργασία έχει συγγραφεί από μένα αποκλειστικά και αποτελεί προϊόν πνευματικής ιδιοκτησίας τόσο δικής μου, όσο και του Ιδρύματος.

Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου».

Η Δηλούσα

A photograph of a handwritten signature in blue ink on a light-colored, slightly textured paper. The signature is stylized and appears to be the name 'Σείζη' followed by a surname, though the latter is less legible due to the cursive style. The signature is centered horizontally on the page.

Η Διπλωματική Εργασία Εξετάστηκε Επιτυχώς από την κάτωθι  
Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή

**Σταυρούλα Δενεζάκη**  
Λέκτορα – Εφαρμογών

**Τριαντάφυλλος – Φίλης Κόκκινος**  
Αναπληρωτής Καθηγητής



**Μαρία Αλογομιά**  
Λέκτορα - Εφαρμογών

## Περιεχόμενα

ΔΗΛΩΣΗ ΣΥΓΓΡΑΦΕΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ .....	2
1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ .....	13
1.1 Λόγοι της ευρύτερης χρήσης του σκυροδέματος.....	13
1.2 Η δομή του σκυροδέματος .....	13
1.2.1 Αδρανή.....	13
1.2.2 Τσιμεντοπολτός .....	14
1.2.3 Τύποι τσιμέντου .....	16
1.2.4 Μεταβατική ζώνη .....	17
1.2.5 Πρόσμικτα υλικά .....	18
1.2.6 Άλλα είδη σκυροδέματος.....	23
1.3 Ιδιότητες του σκυροδέματος .....	43
1.3.1 Ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος .....	43
1.3.2 Ιδιότητες του στερεού σκυροδέματος.....	45
2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΟΙΕΣ ΕΙΝΑΙ.....	51
2.1 Κατηγορίες αντοχής (strength classes) .....	51
2.2 Κατηγορίες κάθισης (workabilityclasses).....	52
2.3 Κατηγορίες ανθεκτικότητας (durabilityclasses).....	52
3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΤΟΥ ΜΕΛΛΟΝΤΟΣ.....	54
3.1 Ζήτηση του σκυροδέματος στο μέλλον .....	54
3.2 Πλεονεκτήματα της χρήσης σκυροδέματος συγκριτικά με τον χάλυβα .....	55
3.3 Περιβαλλοντική θεώρηση .....	55
3.4 Βιωσιμότητα και ανθεκτικότητα σκυροδέματος.....	56

1 ΠΕΙΡΑΜΑ 1ο: ΔΟΚΙΜΗ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ ΚΑΙ ΩΡΙΜΑΝΣΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ .....	59
1.1 Σκοπός.....	59
1.2 Εξοπλισμός .....	59
1.3 Διαδικασία πειράματος.....	60
1.4 Εκτέλεση Πειράματος.....	61
1.5 Εικόνες.....	68
1.6 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τους τρεις τύπους σκυροδέματος .....	70
2 ΠΕΙΡΑΜΑ 2ο: ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ .....	72
2.1 Σκοπός.....	72
2.2 Εξοπλισμός .....	72
2.3 Διαδικασία πειράματος.....	72
2.4 Εκτέλεση πειράματος.....	77
2.5 Εικόνες.....	84
2.6 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τους τρεις τύπους σκυροδέματος .....	84
3 ΠΕΙΡΑΜΑ 3: ΔΟΚΙΜΗ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΑΝΤΟΧΩΝ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ .....	86
3.1 Σκοπός.....	86
3.2 Εξοπλισμός .....	86
3.3 Διαδικασία πειράματος.....	86
3.4 Εκτέλεση πειράματος.....	87
3.4 Εικόνες.....	98
3.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τους τρεις τύπους σκυροδέματος.....	98
4 ΠΕΙΡΑΜΑ 4: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΡΙΑΚΗΣ ΡΟΠΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΔΟΚΟΥ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ .....	100
4.1 Σκοπός.....	100

4.2	Εξοπλισμός.....	100
4.3	Διαδικασία πειράματος .....	100
4.4	Εκτέλεση πειράματος.....	100
4.5	Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τους τρεις τύπους σκυροδέματος.....	114

## ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η εν λόγω εργασία πραγματοποιήθηκε από την Σεΐζη Αθανασία Μαρία, κατά τη διάρκεια των σπουδών της στο Τμήμα Πολιτικών Μηχανικών της Σχολής Μηχανικών του Πανεπιστημίου Δυτικής Αττικής, υπό την επίβλεψη και τη βοήθεια της καθηγήτριας κ. Δενεζάκη Σταυρούλας.

Η εργασία εμβαθύνει στην εκτεταμένη έρευνα και τον πειραματικό έλεγχο τριών κατηγοριών σκυροδέματος C20/25, C25/30 και C35/45 για την διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων τους. Οι τρεις αυτές κατηγορίες σκυροδέματος εξετάστηκαν στη δοκιμή προσδιορισμού καθίζησης και ωρίμανσης σκυροδέματος, στη δοκιμή άμεσου προσδιορισμού αντοχής σκυροδέματος, στη δοκιμή προσδιορισμού αντοχών ινοπλισμένου σκυροδέματος και, τέλος, στον υπολογισμό της οριακής ροπής δοκού οπλισμένου σκυροδέματος.

Συγκεκριμένα, το ενδιαφέρον μου για την διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος διαπιστώθηκε κατά τη διδασκαλία και τη συμμετοχή μου στο μάθημα των Εργαστηριακών Ελέγχου Οπλισμένου Σκυροδέματος. Στην πάροδο αυτού του εξαμήνου διαπίστωσα πως οι πειραματικοί έλεγχοι του σκυροδέματος έχουν τεράστιο φάσμα και μου κίνησαν την περιέργεια να ασχοληθώ πάνω στο αντικείμενο και μελλοντικά σε επαγγελματικά μου βήματα, εφόσον μου δοθεί η ανάλογη ευκαιρία.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την κυρία Δενεζάκη Σταυρούλα για τη δυνατότητα που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα θέμα που με ενδιαφέρει άμεσα, καθώς και για τις επισημάνσεις και συμβουλές της πάνω στην εργασία.

## ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Με σκοπό τη διερεύνηση των μηχανικών ιδιοτήτων του οπλισμένου σκυροδέματος, που είναι και ο τίτλος της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας, επιλέχθηκαν τρεις κατηγορίες σκυροδέματος και συγκεκριμένα οι C20/25, C25/30 και C35/45, οι οποίες αφού εξετάστηκαν σε τέσσερα πειράματα στο εργαστήριο έδωσαν ορισμένα αποτελέσματα διευκρινίζοντας τις διαφορές που υπάρχουν στις μηχανικές ιδιότητες κάθε κατηγορίας.

Σε θεωρητικό επίπεδο, έγινε εμβάθυνση σε πολλές λεπτομέρειες που αφορούν την τεράστια επιστήμη του σκυροδέματος, χωρίς να μπορούν να καλυφθούν όλες οι δυνατότητες που περιλαμβάνει και δίνει το συγκεκριμένο υλικό, πράγματα τα οποία ήταν αδύνατον να περιγραφούν σε μία μόνο εργασία. Συγκεκριμένα, έγινε έρευνα για το σκυρόδεμα σαν γενική έννοια, για τις κατηγορίες σκυροδέματος, τις δυνατότητες που παρέχει η κάθε μία, τη χρήση τους, έγινε μια θεωρητική αναφορά στις μηχανικές ιδιότητες τους. Τέλος, αναφέρθηκε συνοπτικά πως είναι δυνατόν η σωστή χρήση και ανακύκλωση σκυροδέματος να λειτουργήσει ευεργετικά για το περιβάλλον μειώνοντας τη ρύπανση του.

Στο πειραματικό στάδιο, εφαρμόστηκαν τέσσερις πειραματικές μέθοδοι για τον προσδιορισμό των μηχανικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος σε πρακτικό επίπεδο, μέσω της δοκιμής προσδιορισμού καθίζησης και ωρίμανσης σκυροδέματος, της δοκιμής άμεσου προσδιορισμού αντοχής σκυροδέματος, της δοκιμής προσδιορισμού αντοχών ινοπλισμένου σκυροδέματος και, τέλος, του υπολογισμού της οριακής ροπής δοκού οπλισμένου σκυροδέματος, οι οποίες μέθοδοι αναλύονται στη συνέχεια λεπτομερώς.



## **EXECUTIVE SUMMARY**

Aiming the investigation of the mechanical purposes of reinforced concrete, which is also the title of this particular thesis, three categories of reinforced concrete were chosen, C20/25, C25/30 and C35/45, all of which were tested in four different lab experiments and gave back some results, clarifying the differences that exist in the mechanical purposes of each category.

On a theoretical level, it went into a lot of detail about the enormous science of concrete, thought without being able to cover all of capabilities that this specific material includes and gives, things that it is impossible to describe in a thesis. Specifically, concrete as a general concept was researched, as well as the categories of concrete, the capabilities of each one of them, their use, and a theoretical reference on their mechanical properties. In conclusion, it was briefly mentioned, how the correct use of the recycling of concrete can be beneficial for the environment by reducing its pollution.

On the experimental stage, four experimental methods were applied for the determination of the mechanical properties of concrete on a practical level, by using the concrete settling and maturing test, the direct determination of concrete strength, the determination of fiber-reinforced concrete strength, and finally, the calculation of the limiting moment of the reinforced concrete beam, all of which are analyzed in detail next.

## **ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Η εκπόνηση της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας έχει ως σκοπό να διερευνήσει τις μηχανικές ιδιότητες τριών κατηγοριών σκυροδέματος C20/25, C25/30 και C35/45.

Με τον όρο σκυρόδεμα εννοείται η ανάμιξη διάφορων αδρανών, νερού και συνθετικών υλικών που το τελικό προϊόν χρησιμοποιείται για την κατασκευή έργων (κτιρίων, γεφυρών κλπ). Οπλισμένο σκυρόδεμα, χαρακτηρίζεται το σκυρόδεμα εκείνο που ενισχύεται με οπλισμό, κύριο υλικό του οποίου είναι ο χάλυβας.

Η εργασία αυτή δίνει έμφαση σε τρεις κατηγορίες οπλισμένου σκυροδέματος και μία πειραματική δοκιμή στο ινοπλισμένο σκυρόδεμα προσδιορίζοντας τις μηχανικές ιδιότητες κάθε κατηγορίας χωριστά και συγκρίνοντας τα τελικά αποτελέσματα.

Η ακολουθία της εργασίας έχει ως εξής:

Χωρίζεται σε δύο μέρη, ένα θεωρητικό και ένα πειραματικό. Στο θεωρητικό μέρος λαμβάνουν χώρα τα παρακάτω:

Στο πρώτο κεφάλαιο αναλύεται τι είναι το σκυρόδεμα. Συγκεκριμένα, οι λόγοι της ευρύτερης χρήσης του σκυροδέματος, η δομή του, η οποία αποτελείται από τα αδρανή και τον τσιμεντολτό. Γίνεται αναφορά στους τύπους του τσιμέντου, στη μεταβατική ζώνη που βρίσκεται ανάμεσα στα αδρανή και τον τσιμεντοπολτό και στα πρόσμικτα υλικά που περιλαμβάνονται στο μίγμα. Στη συνέχεια, περιγράφονται με λεπτομέρεια κάποια άλλα είδη σκυροδέματος. Έπειτα, συνεχίζει στην ανάλυση των ιδιοτήτων του σκυροδέματος, τόσο για το νωπό σκυρόδεμα όσο και για το στερεό.

Στο δεύτερο κεφάλαιο, εξετάζονται οι κατηγορίες του σκυροδέματος ανάλογα με την αντοχή, την καθίζηση και την ανθεκτικότητά τους.

Στο τρίτο κεφάλαιο, γίνεται εμβάθυνση στην πορεία του σκυροδέματος στο μέλλον. Ποια θα είναι η ζήτηση του με την πάροδο του χρόνου, τα πλεονεκτήματα

του σκυροδέματος συγκριτικά με τον χάλυβα, την περιβαλλοντική του θεώρηση και, τέλος, την βιωσιμότητα και ανθεκτικότητα του.

Το πειραματικό μέρος διαχωρίζεται ως εξής:

Το πρώτο πείραμα είναι η δοκιμή προσδιορισμού καθίζησης και ωρίμανσης σκυροδέματος κατά το οποίο συλλέγονται οι απαραίτητες ποσότητες άμμου, γαρμπιλίου, χαλικιού, τσιμέντου και νερού και κατασκευάζονται δύο κόλουροι κώνοι, δύο κυβικά και δύο κυλινδρικά δοκίμια και υπολογίζονται οι απαιτούμενες ποσότητες ρευστοποιητή ώστε να μειωθεί η κατηγορία καθίζησης καθώς και σε πόσο χρονικό διάστημα πρέπει να γίνει το ξεκαλούπωμα ανάλογα με την απαίτηση που λήφθηκε ως δεδομένη για κάθε κατηγορία σκυροδέματος που επιλέχθηκε χωριστά.

Κατά το δεύτερο πείραμα, το οποίο είναι η δοκιμή άμεσου προσδιορισμού αντοχής σκυροδέματος κατασκευάστηκαν έξι κυλινδρικά δοκίμια από συγκεκριμένο όγκο σκυροδέματος, τα οποία αφού τοποθετήθηκαν τη μηχανή θραύσης μετά από 28 ημέρες έδωσαν ορισμένα αποτελέσματα και βάσει αυτών εξετάστηκαν τα κατάλληλα κριτήρια για να διαπιστωθεί αν υπάρχει αμφισβήτηση της συγκεκριμένης παρτίδας σκυροδέματος. Το πείραμα εκτελέστηκε και για τις τρεις επιλεγόμενες κατηγορίες.

Το τρίτο πείραμα περιλαμβάνει τον προσδιορισμό των αντοχών ινοπλισμένου σκυροδέματος για κάθε μία κατηγορία. Τρεις δοκοί ινοπλισμένου σκυροδέματος, κατασκευασμένες από διαφορετικό τύπο σκυροδέματος η κάθε μία, υποβάλλονται σε κάμψη τεσσάρων σημείων και με βάση τα αποτελέσματα υπολογίζονται η αντοχή, η ροπή και η αύξηση της αντοχής.

Στο τελευταίο πείραμα, υπολογίζονται η οριακή ροπή και το μέγιστο φορτίων τριών δοκών οπλισμένου σκυροδέματος.

## **ΜΕΡΟΣ Α: ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

# 1 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Ως σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται ένα κονίαμα, ένα μείγμα, δηλαδή, αδρανών, νερού, συνδετικών και άλλων προσθέτων, το οποίο χρησιμοποιείται για την κατασκευή διαφόρων έργων όπως κατοικίες, φράγματα κλπ.

## 1.1 Λόγοι της ευρύτερης χρήσης του σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα χρησιμοποιείται ευρέως τόσο στην Ελλάδα, όσο και παγκοσμίως. Αυτό οφείλεται στο συνδυασμό του κόστους και των ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Ειδικότερα:

A) Στην καλή συμπεριφορά του υλικού στο νερό και γενικότερα σε καιρικές και περιβαλλοντικές συνθήκες (ακόμη σώζονται έργα της αρχαιότητας κατασκευασμένα από σκυρόδεμα),

B) Στην δυνατότητα κατασκευής των έργων σε διάφορα σχήματα και μεγέθη,

Γ) Στο χαμηλό κόστος και στη μεγάλη διαθεσιμότητα του υλικού καθώς και στην εύκολη παρασκευή του.

## 1.2 Η δομή του σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα είναι ένα σύνθετο υλικό αποτελούμενο από αδρανή (σκύρα, χαλίκια, άμμο) και τσιμεντοπολτό (ανάμιξη τσιμέντου και νερού).

Αν παρατηρήσει κανείς μικροσκοπικά, σε κάποιο εργαστήριο, τη δομή του σκυροδέματος θα διαπιστώσει πως υπάρχει και μία μεταβατική ζώνη, μια διεπιφάνεια, δηλαδή, μεταξύ των μεγάλων σε μέγεθος αδρανών και του τσιμεντοπολτού. Είναι, βέβαια, ασθενέστερη από ότι τα αδρανή και ο τσιμεντοπολτός, ωστόσο επηρεάζει τη μηχανική συμπεριφορά του τελικού αποτελέσματος.

### 1.2.1 Αδρανή

Αδρανή ονομάζονται τα κοκκώδη υλικά τα οποία χρησιμοποιούνται με κάποιο συνδετικό υλικό για την παρασκευή του σκυροδέματος και επηρεάζουν το βάρος, το μέτρο ελαστικότητας και την μεταβολή του όγκου του. Τα αδρανή επηρεάζουν

έμμεσα την αντοχή το σκυροδέματος μέσω του σχήματος και του μεγέθους τους, διότι έχουν μεγαλύτερη αντοχή από τις υπόλοιπες φάσεις του.

Ανάλογα με το μέγεθος τους διακρίνονται σε:

- A. Χονδρόκοκκα αδρανή, όπως τα χαλίκια, με κόκκους μεγαλύτερους από 4,75mm, διερχόμενοι, δηλαδή, από το κόσκινο Νο 4 και
- B. Λεπτόκοκκα αδρανή, όπως η αμμος, με μέγεθος κόκκου που κυμαίνεται από 75 μm, διερχόμενοι του κοσκίνου Νο 200, έως 4,75 mm, διερχόμενοι του κοσκίνου Νο 4.

Ανάλογα με την προέλευση τους διακρίνονται σε:

- A. Συλλεκτά ή φυσικά αδρανή, όπως η άμμος και τα χαλίκια. Προέρχονται απευθείας από τη φύση, χωρίς κάποια άλλη ενέργεια και το σχήμα τους είναι στρογγυλλόμορφο. Συλλέγονται, συνήθως, από περιοχές γύρω από ποτάμια και η επιφάνεια τους είναι λεία.
- B. Θραυστά αδρανή, όπως θραυστά πετρώματα και θραυστή σκωρία υψικαμίνων. Προέρχονται από την θραύση πετρωμάτων και το σχήμα τους είναι κυβόμορφο, με γωνίες ή πλακωειδές. Συλλέγονται από λατομεία και η επιφάνεια τους είναι τραχειά.
- C. Ανακυκλωμένα και τεχνητά αδρανή. Προέρχονται από κατεδαφίσεις κατασκευών ή από απορρίμματα παλαιών εργασιών σε λατομεία.

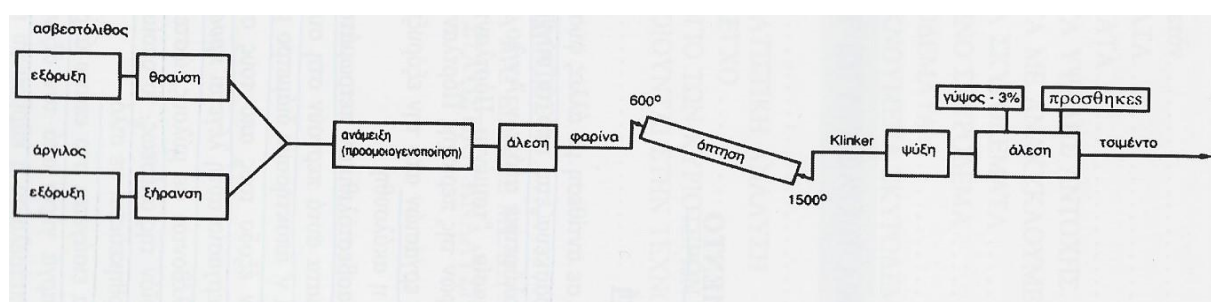
### 1.2.2 Τσιμεντοπολτός

Ο τσιμεντοπολτός είναι το αποτέλεσμα της ανάμιξης του τσιμέντου με το νερό. Χρησιμοποιείται ως συνδετικό κονίαμα για την παραγωγή του σκυροδέματος. Στην χώρα μας, ως κύριο τσιμέντο, χρησιμοποιείται το τσιμέντο Portland που παρασκευάζεται από το άλεσμα κλίνκερ, δηλαδή ψησίματος ασβεστόλιθου και αργίλου.

Η διαδικασία παρασκευής του τσιμέντου έχει ως εξής: Αρχικά γίνεται η εξόρυξη ασβεστολιθικών και αργιλικών πετρωμάτων και εδαφών, τα οποία μετά τις κατάλληλες ενέργειες με σπαστήρες τεμαχίζονται σε μικρής διαμέτρου κόκκους (κάποια εκατοστά). Στη συνέχεια πραγματοποιείται η προομογενοποίηση, δηλαδή η ανάμιξη αυτών των κόκκων και το άλεσμα τους με αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός λεπτόκοκκου υλικού (φαρίνα), των οποίων η διάμετρος δεν ξεπερνά τα λίγα χιλιοστά.

Η αποθήκευση αυτού του υλικού γίνεται σε σιλό. Έπειτα το μίγμα εισάγεται σε μια κεκλιμένη κυλινδρική κάμινο που περιστρέφεται. Η λειτουργία της καμίνου πραγματοποιείται με κάρβουνο σε θερμοκρασία 600°C ή με καυστήρα πετρελαίου που η θερμοκρασία φτάνει έως και τους 1500°C. Αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι το κλίνκερ, κόκκοι μαυροπράσινου χρώματος και 5-25 mm διαμέτρου. Τέλος, γίνεται άλεσμα του κλίνκερ, το οποίο αφού ψυχθεί αναμιγνύεται με γύψο (2-3% περίπου) για να ρυθμιστεί ο χρόνος πήξης και τελικά προκύπτει το τσιμέντο Portland με διάμετρο κόκκων 75 μm.

Η διαδικασία παρασκευής φαίνεται σχηματικά την παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 1. Σχηματικό διάγραμμα παρασκευής τσιμέντου (Βιβλίο: Τεχνολογία του Σκυροδέματος – ΧΡΙΣΤΟΥ Μ. ΟΙΚΟΝΟΜΟΥ – Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ – 4Μ΄ΉΠΕ – ΤεΚΔΟΤΙΚΗ)

Το τσιμέντο Portland ανήκει στην κατηγορία των υδραυλικών τσιμέντων, δηλαδή όλα τα προϊόντα της ενυδάτωσης του σταθεροποιούνται σε υγρό περιβάλλον.

Στην διαδικασία παραγωγής του σκυροδέματος συμβάλλουν και κάποια πρόσμικτα υλικά που προστίθενται στο μίγμα πριν ή κατά την διάρκεια της ανάμειξης. Η χρήση τους παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα, όπως τα χημικά πρόσμικτα, τα οποία αλλάζουν την πήξη και σκλήρυνση του σκυροδέματος παίζοντας ρόλο στην ενυδάτωση του τσιμέντου. Πρόσμικτα που χρησιμοποιούνται για την μείωση του νερού ρευστοποιούν τα νωπά μίγματα και ελαττώνουν την τάση του νερού στην επιφάνεια του σκυροδέματος. Τα αερακτικά πρόσμικτα βελτιώνουν την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος που είναι εκτεθειμένο στο κρύο και τα ορυκτά πρόσμικτα, παράδειγμα των οποίων αποτελεί η ποζολάνη, μειώνουν τη ρηγμάτωση που προκαλείται από τη θερμότητα για μεγάλης μάζας σκυροδέματος λόγω του πυριτίου που περιέχει.

### 1.2.3 Τύποι τσιμέντου

Οι κύριοι τύποι τσιμέντων, σύμφωνα με τον Ελληνικό Κανονισμό Τσιμέντων (ΕΛΟΤ EN 197-1) είναι:

- CEM I Τσιμέντο Πόρτλαντ, το οποίο δίνει τη δυνατότητα προσθήκης ενός δευτέρου συστατικού έως 5%.
- CEM II Σύνθετο Τσιμέντο Πόρτλαντ, που παράγεται με προσθήκες:
  1. Σκωρία υψικαμίνων (S)
  2. Πυριτική παιπάλη (D)
  3. Ποζολάνη φυσική ή ψημένη (Ρή Q)
  4. Ιπτάμενη τέφρα πυριτική ή ασβεστούχα (Vή W)
  5. Ασβεστόλιθο (L ή LL)
  6. Και συνδυασμό όλων των προαναφερθέντων προσθηκών

Για την κάθε προσθήκη υπάρχουν δύο τύποι, ανάλογα με το ποσοστό. Διακρίνονται σε Α, αν η προσθήκη είναι στο 6-20%, και Β, αν η προσθήκη φτάνει το 21-35%.

- CEM III Σκωριοτσιμέντο, το οποίο χαρακτηρίζεται ανάλογα με το ποσοστό της σκωρίας σε Α για 36-65%, σε Β για 66-80% και σε C για 81-95%.
- CEM IV Ποζολανικό Τσιμέντο, που παράγεται από πυριτική παιπάλη, ποζολάνη, ιπτάμενη τέφρα ή συνδυασμό.
- CEM V Σύνθετο Τσιμέντο. Αποτελείται από σκωρία υψικαμίνων και συνδυασμό ποζολάνης και πυριτικής ιπτάμενης τέφρας.

Οι κατηγορίες των τσιμέντων, όσον αφορά την αντοχή τους, είναι οι εξής:

- 32,5 N
- 32,5 R
- 42,5 N
- 42,5 R
- 52,5 N
- 52,5 R

Οι αριθμοί αντιπροσωπεύουν την αντοχή της κάθε κατηγορίας τσιμέντου σε ΜΡα, ενώ οι συμβολισμοί Ν και R αν πρόκειται για κανονική ανάπτυξη της αντοχής ή αν διαθέτουμε τσιμέντα με υψηλή πρώιμη αντοχή, αντίστοιχα.



Στην Ελλάδα, οι κύριοι τύποι τσιμεντών που χρησιμοποιούνται είναι ο τύπος CEMII 32,5 ή CEMIV 32,5 ή αλλιώς κοινό και οι τύποι CEMI 32,5 και CEMI 42,5 ή καθαρό.

Κατηγορία Αντοχής	Αντοχή στη θλίψη MPa			Αρχικός χρόνος πήξης	Διόγκωση (Διαστολή)
	Αρχική αντοχή		Τυπική αντοχή		
	2 ημέρες	7 ημέρες	28 ημέρες		
32,5 N	-	≥ 16.0	≥ 32,5 ≤ 52,5	≥ 75	≤ 10
32,5 R	≥ 10.0	-			
42,5 N	≥ 10.0	-	≥ 42,5 ≤ 62,5	≥ 60	
42,5 R	≥ 20.0	-			
52,5 N	≥ 20.0	-	≥ 52,5 -	≥ 45	
52,5 R	≥ 30.0	-			

Εικόνα 2. Απαιτήσεις μηχανικές και φυσικές οριζόμενες ως χαρακτηριστικές τιμές (Πηγή: <http://www.hcia.gr/el/cement-concrete/cement/codes-standards/>)

#### 1.2.4 Μεταβατική ζώνη

Η μεταβατική ζώνη είναι η επιφάνεια μεταξύ των αδρανών και του τσιμεντοπολτού. Συμβάλλει σημαντικά στη συμπεριφορά του σκυροδέματος, διότι, παρ'όλο που αποτελείται από τα ίδια συστατικά με τον τσιμεντοπολτό, έχει διαφορετικές ιδιότητες και αναγνωρίζεται σαν μια τρίτη φάση του σκυροδέματος.

Η μεταβατική ζώνη έχει ιδιαίτερη σημασία σε πληθώρα χαρακτηριστικών του σκυροδέματος. Χάρη στη μεταβατική, το σκυρόδεμα εμφανίζει ψαθυρή συμπεριφορά στον εφελκυσμό, ενώ στη θλίψη είναι σκληρό. Ταυτόχρονα, όταν κάθε ένα από τα συστατικά του σκυροδέματος υποβάλλεται σε μονοαξονική θλίψη, εμφανίζει ελαστική συμπεριφορά, όμως το σκυρόδεμα, σαν σύνολο, είναι μη ελαστικό υλικό. Στη μεταβατική ζώνη οφείλεται, επίσης, ότι η θλιπτική αντοχή του είναι μια τάξη μεγαλύτερου μεγέθους σε σχέση με την εφελκυστική. Ο τσιμεντοπολτός, σαν ενυδατωμένο υλικό, εμφανίζει μεγαλύτερη αντοχή από ότι το σκληρυμένο σκυρόδεμα και συγχρόνως η αντοχή του μειώνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό των χονδρόκοκκων αδρανών. Επίσης, το σκυρόδεμα έχει μεγαλύτερη διαπερατότητα σε σχέση με τον τσιμεντοπολτό, ακόμη κι αν τα αδρανή είναι μικρής διαπερατότητας. Τέλος, σε περίπτωση πυρκαγιάς, το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος μειώνεται γρηγορότερα από τη θλιπτική αντοχή.

Όσον αφορά την αντοχή της μεταβατικής ζώνης, η συνάφεια των αδρανών με τη μεταβατική ζώνη οφείλεται στις ελκτικές δυνάμεις van der Waals, άρα αντοχή εξαρτάται από τον όγκο και το μέγεθος των κενών. Με την πάροδο του χρόνου κάποια από αυτά τα κενά γεμίζουν με κρυστάλλους, οι οποίοι είναι αποτέλεσμα των αντιδράσεων των αδρανών και του τσιμεντοπολτού. Αυτοί οι κρύσταλλοι διαθέτουν μικρή συνάφεια κι έτσι αυξάνουν την αντοχή της μεταβατικής ζώνης.

### 1.2.5 Πρόσμικτα υλικά

Πρόσμικτα ή πρόσθετα υλικά ή βελτιωτικά χαρακτηρίζονται τα υλικά που τοποθετούνται στο σκυρόδεμα κατά την διαδικασία της παρασκευής του και διαφοροποιούν κάποιες από τις ιδιότητές του.

Τα πρόσμικτα υλικά χωρίζονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με τη δράση τους:

- **Πρόσθετα υλικά:** είναι τα υλικά που δρουν με χημικό τρόπο στο σκυρόδεμα και βρίσκονται σε τόσο μικρή ποσότητα που δεν επιδρούν την σύνθεση του σκυροδέματος.
- **Προσθήκες:** αντίθετα με τα πρόσθετα, οι προσθήκες βρίσκονται σε μεγάλες ποσότητες και δρουν επίσης με χημικό τρόπο με τη διαφορά ότι σε αυτή την περίπτωση λαμβάνεται υπόψη η αλλαγή στη σύνθεση του σκυροδέματος.

Ωστόσο, πρέπει να τονιστεί ότι στα πρόσθετα υλικά δεν συμπεριλαμβάνονται τα υλικά που προστίθενται στο τσιμέντο στη φάση της παρασκευής του στο εργοστάσιο, ούτε οι επιστρώσεις που πραγματοποιούνται στην επιφάνεια του σκυροδέματος αφού διαστρωθεί ή πήξει.

Τα πρόσθετα υλικά κατατάσσονται στις παρακάτω κύριες κατηγορίες:

- **Ρευστοποιητικά:** είναι τα υλικά στα οποία οφείλεται η αύξηση της ρευστότητας. Έτσι, το νερό ελαττώνεται όσο το εργάσιμο παραμένει σταθερό προκαλώντας με αυτόν τον τρόπο αύξηση της αντοχής ή ακόμη και το εργάσιμο χωρίς να παρατηρηθεί μείωση στην τελική αντοχή. Τα ρευστοποιητικά καθυστερούν την πήξη και αυξάνουν την συστολή του σκυροδέματος με την πάροδο του χρόνου. Μέσα σε αυτή την κατηγορία σκόπιμο είναι να αναφερθούν και τα υπερρευστοποιητικά, τα νέα πρόσθετα που δημιουργήθηκαν με την εξέλιξη της τεχνολογίας και τα οποία άνοιξαν τον

δρόμο στο σκυρόδεμα να αποκτήσει νέες δυνατότητες στην παρασκευή, στη μεταφορά και στη διάστρωση του καθώς επίσης και να δημιουργηθούν πιο υψηλές αντοχές.

- Αερακτικά: εξαιτίας αυτών των υλικών δημιουργούνται μικρές φυσαλίδες μέσα στο σκυρόδεμα. Για περιπτώσεις που είναι επιθυμητό να παρασκευαστεί ελαφρύ σκυρόδεμα οι φυσαλίδες αναπτύσσονται σε μεγαλύτερο ποσοστό. Σκοπός των φυσαλίδων είναι να αυξηθεί το εργάσιμο και η αντοχή του σκυροδέματος στον παγετό, χωρίς να μειωθεί η θλιπτική αντοχή. Σε γενικές γραμμές, τα αερακτικά είναι παρόμοιου τύπου με τα ρευστοποιητικά και το μέγεθος τους κυμαίνεται από 0,02 έως 0,2 mm, ενώ το ποσοστό του αέρα μέσα στο σκυρόδεμα είναι της τάξης του 4 - 8 % κατ' όγκο. Οι φυσαλίδες αυτές μειώνουν την εσωτερική αντοχή του υλικού και αναπτύσσουν μια ελαστική συμπεριφορά μεταξύ των κόκκων.
- Επιβραδυντικά: είναι τα υλικά που επιβραδύνουν τον ρυθμό που προχωράει η ενυδάτωση. Χρησιμοποιούνται κυρίως όταν έχει εκτιμηθεί ότι η διάστρωση του σκυροδέματος θα διαρκέσει περισσότερο από τον συνηθισμένο χρόνο (όπως σε τσιμεντενέσεις ή πασσάλους), όταν γίνεται προσπάθεια αποφυγής των αρμών εργασίας, σε περιπτώσεις έτοιμου σκυροδέματος και όταν πρέπει να γίνει πιο απαλή η θερμοκρασία που δημιουργείται από την θερμότητα ενυδάτωσης. Η λειτουργία αυτών των υλικών επιτυγχάνεται με την απομόνωση όλων των αργλικών αλάτων και ιδιαίτερα του αργλικού τριασβεστίου του τσιμέντου καθυστερώντας, έτσι, την επαφή τους με το νερό. Αυτός ο τρόπος δράσης είναι συνδεδεμένος με την θερμοκρασία, τα συστατικά του νερού και, σαφώς, την περιεκτικότητα του τσιμέντου σε αργλικό τριασβέστιο. Τα επιβραδυντικά δεν επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό την συστολή, λειτουργούν ωστόσο ως ρευστοποιητικά διότι αυξάνουν τον αέρα που περιέχεται στο σκυρόδεμα. Παρατηρείται αύξηση της αντοχής τις πρώτες μέρες, γεγονός που οφείλεται στη μείωση του νερού αναμείξεως, αφού τα επιβραδυντικά λειτουργούν και ως ρευστοποιητικά και στην παύση της ενυδάτωσης των αργλικών ενώσεων χαμηλής αντοχής του τσιμέντου, πράγμα που ενισχύει τα πυριτικά.
- Επιταχυντικά: χαρακτηρίζονται τα υλικά που αυξάνουν την ταχύτητα της ενυδάτωσης του τσιμέντου. Η επιτάχυνση αυτή γίνεται είτε ελάττωση του

χρόνου μέχρι την έναρξη της πήξης (επιταχυντικά της πήξεως) είτε με το να πραγματοποιηθεί πιο γρήγορα η σκλήρυνση και να αναπτυχθεί η αντοχή (επιταχυντικά της σκληρύνσεως). Χρησιμοποιούνται, κυρίως, όταν πρόκειται να αφαιρεθούν σε σύντομο χρονικό διάστημα οι ξυλότυποι (προκατασκευασμένα στοιχεία), όταν κρίνεται απαραίτητο να ολοκληρωθεί το έργο πολύ σύντομα ή όταν το στοιχείο που κατασκευάζεται προορίζεται να καταπονηθεί άμεσα σε εξωτερικά φορτία. Επίσης, χρησιμοποιούνται συνδυαζόμενα με άλλα υλικά, όπως τα αερακτικά, για να παρασκευαστούν αντιπαγετικά πρόσθετα, δηλαδή υλικά που να αποτρέπουν άσχημα αποτελέσματα του παγετού. Αντίθετα με τα επιβραδυντικά, τα επιταχυντικά είναι επιβλαβή στην τελική αντοχή του σκυροδέματος για αυτό και πρέπει να χρησιμοποιούνται μόνο όταν κρίνεται άκρως απαραίτητο. Σαν επιταχυντικά λειτουργούν το ανθρακικό νάτριο, οι ενώσεις αργίλου, η υδρύαλος κ.λπ. Ωστόσο, αν προστεθεί αργλικό τσιμέντο σε 5 - 20 % ποσότητα και κοινό τσιμέντο λειτουργούν, επίσης, ως επιταχυντικά. Το κυριότερο επιταχυντικό είναι το χλωριούχο ασβέστιο ( $\text{CaCl}_2$ ), το οποίο όμως πλέον αποφεύγεται γιατί διαβρώνει τον οπλισμό. Τα επιταχυντικά διευκολύνουν την ενυδάτωση είτε του αργλικού τριασβεστίου είτε των πυριτικών ενώσεων του τσιμέντου. Στην περίπτωση του αργλικού τριασβεστίου, το σκυρόδεμα διαθέτει μειωμένη αντοχή. Τέλος, μια συνέπεια, ακόμη, των επιταχυντικών είναι η αύξηση της θερμοκρασίας του σκυροδέματος τις πρώτες ώρες λόγω της ελάττωσης του χρόνου που εκλύεται θερμότητα ενυδάτωσης και ταυτόχρονα αυξάνεται η συστολή. Το πιο διαδεδομένο επιταχυντικό είναι το χλωριούχο ασβέστιο ( $\text{CaCl}_2$ ), το οποίο ταυτόχρονα συμπεριλαμβάνεται στα κύρια συστατικά των αντιπαγετικών. Το χλωριούχο ασβέστιο επιταχύνει την αντίδραση τσιμέντου και νερού, αυξάνοντας με αυτόν τον τρόπο την ταχύτητα ανάπτυξης της αντοχής. Επίσης, συντελεί στην μείωση της εξίδρωσης, αυξάνει την θερμοκρασία ενυδάτωσης, παρουσιάζει άνοδο η χρόνια συστολή, ελαττώνεται η ανθεκτικότητα στον παγετό και περιορίζει την διάβρωση του οπλισμού σε περιπτώσεις που η ποσότητα χλωρίου (Cl) ξεπεράσει τα επιτρεπόμενα όρια. Η κατάλληλη περιεκτικότητα χλωριούχου ασβεστίου στο σκυρόδεμα, σύμφωνα με πειραματικά δεδομένα, ώστε να επιταχύνεται η πήξη είναι 2% του βάρους του τσιμέντου. Ωστόσο, το όριο για να αποφευχθούν βλαβερές συνέπειες ορίζεται στο 3%. Παρ' όλα αυτά, ποσοστό μικρότερο του 0,5% μπορεί να έχει

τα αντίθετα αποτελέσματα και να οδηγήσει σε καθυστέρηση της πήξεως. Η μεταφορά του χλωριούχου ασβεστίου γίνεται, αυστηρά, σε υδατοστεγανά ή αεροστεγανά δοχεία αφού μιλάμε για υδροσκοπική ουσία.

- Στεγανοποιητικά: η δίοδος του νερού μέσα στο σκυρόδεμα πραγματοποιείται μέσω των τριχοειδών πόρων του κονιάματος, από τις επιφάνειες επαφής του κονιάματος και των αδρανών ή από τις μακροσκοπικές κοιλότητες λόγω της κακής συμπίκνωσης και τις ρηγματώσεις που είναι αποτέλεσμα των συστοδιαστολών που πραγματοποιούνται με την πάροδο του χρόνου. Η διαδρομή που ακολουθεί το νερό γίνεται με δύο τρόπους: α) την απορρόφηση, όπου το νερό έρχεται σε επαφή με το υλικό, όταν δεν βρίσκεται σε κορεσμένη κατάσταση και β) την διείσδυση του νερού με πίεση. Σκοπός των στεγανοποιητικών είναι, πρώτον, να αποφεύγονται, όσο το δυνατόν καλύτερα, οι ρηγματώσεις και οι κοιλότητες, πράγμα που επιτυγχάνεται με την βελτίωση του εργασίμου και την μείωση της απόμειξης και των συστολών. Δεύτερον, σκόπιμο είναι να μειωθεί το πορώδες μειώνοντας την ποσότητα του νερού αναμίξεως και τρίτον, αποσκοπούν στη μείωση της συνάφειας ή στη δημιουργία δυνάμεων μεταξύ τσιμεντοκονιάματος και νερού, τέτοιες ώστε να απωθούν το νερό. Βασική προϋπόθεση για μια επιτυχή στεγανοποίηση είναι να πληρούνται και τα τρία παραπάνω κριτήρια με την σειρά που αναφέρθηκαν. Ωστόσο, αν το στεγανοποιητικό που προστίθεται δείξει ότι επιτεύχθηκε η στεγανότητα, χωρίς την βοήθεια άλλων ενεργειών, τότε προτιμότερο είναι το συγκεκριμένο δείγμα να απορριφθεί. Οι κατηγορίες που κατατάσσονται τα στεγανοποιητικά είναι οι εξής: α) αδρανή υλικά (χαλαζίας, μπετονίτης, ανθρακικό ασβέστιο). Βρίσκονται σε μορφή λεπτής σκόνης γεμίζοντας τους πόρους και τα κενά του τσιμεντοκονιάματος, δίχως άλλη επίδραση. β) υλικά ανόργανης προέλευσης (θηραϊκή γη, άργιλος, πυριτικά άλατα). Ιδιότητα τους αποτελεί το γεγονός ότι, με την προσθήκη νερού, το μέγεθος τους αυξάνεται με αποτέλεσμα να περικλείουν τους πόρους. γ) αδιάλυτοι σάπωνες (στεατικός ψευδάργυρος, στεατικό ασβέστιο). Τους συναντάμε, συνήθως, σαν λεπτή σκόνη ή σε γαλάκτωμα. Χαρακτηρίζονται, επίσης, ως υδροφοβικές ενώσεις σε κάποιες περιπτώσεις. δ) ρητινικά ή στεατικά άλατα αμμωνίου ως γαλάκτωμα ή πολτό, τα οποία απωθούν το νερό σε έντονο βαθμό. ε) υγροί υδρογονάνθρακες ή προϊόντα πετρελαίου ως γαλακτώματα, τα οποία όταν διαλυθούν μέσα στο μείγμα του σκυροδέματος

περιφράζουν τους πόρους και τα κενά. Στο εμπόριο, τα στεναγοποιητικά υλικά πωλούνται σε μορφή σκόνης ή σε υγρή μορφή και εισάγονται στο μίγμα σε ποσοστό 0,5% - 3% του βάρους του τσιμέντου. Σύμφωνα με τους Γερμανικούς Κανονισμούς, η πήξη πρέπει να ξεκινάει σε λιγότερο από μία ώρα και να μη συντομεύεται σε περισσότερο από δύο ώρες, ωστόσο η διάρκεια της πρέπει να περαιωθεί μέσα σε δεκαέξι ώρες. Επίσης, σε κονίαμα που περιέχει στεναγοποιητικό, μετά την 56η ημέρα, πρέπει να ελεγχθεί ώστε η συστολή που θα παρέλθει με την πάροδο του χρόνου να μην ξεπερνά το 40% της συστολής που θα προέκυπτε χωρίς στεναγοποιητικό. Ταυτόχρονα, η μείωση της αντοχής πρέπει να κυμαίνεται στα όρια του 20% ή 30% για τον μέσο όρο δύο δοκιμίων, ενώ η υδαταπορροφητικότητα των δύο δοκιμίων, μετά την πάροδο των 28 ημερών, πρέπει να παρουσιάζει μεταβολή τουλάχιστον 15% κατ' όγκο το κάθε δοκίμιο (μείωση) και η μέση τιμή των δύο δοκιμών να είναι τουλάχιστον 20%. Κλείνοντας, όπως σε όλα τα πρόσθετα έτσι και στα στεναγοποιητικά, η ποσότητα χλωρίου (Cl) πρέπει να είναι μέσα στα επιτρεπόμενα όρια.

- Αντιπαγαγετικά: ορίζονται τα πρόσθετα, τα οποία ελαχιστοποιούν τις επιπτώσεις του παγετού στο σκυρόδεμα κατά τη διάρκεια της πήξης και έτσι επιτρέπουν την σκυροδέτηση σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες. Σκοπός τους είναι να βοηθήσουν θετικά στις ιδιότητες του σκυροδέματος και να αυξήσουν την αντοχή τους στον παγετό και όχι να μετριάσουν το σημείο πήξης του νερού. Σε περίπτωση που ήταν επιθυμητή η τροποποίηση του σημείου πήξης, αυτό θα επιτυγχανόταν με την προσθήκη ποσοτήτων που θα λειτουργούσαν είτε θετικά είτε αρνητικά στις υπόλοιπες ιδιότητες του σκυροδέματος. Τα αερακτικά, τα οποία αποτελούν κατηγορία αντιπαγαγετικών, δημιουργούν μέσα στο σκυρόδεμα πολλές κοιλότητες, οι οποίες συμβάλλουν στην απομάκρυνση του νερού και στην ελαστικότητα του ιστού του σκυροδέματος που βοηθά στην αντιμετώπιση των συστολών και διαστολών εξαιτίας της θερμοκρασίας. Οι φυσαλίδες του αέρα λειτουργούν σαν μόνωση εμποδίζοντας τη διαφυγή της θερμότητας. Για να είναι πιο βέλτιστο ένα αερακτικό πρόσθετο συστήνεται η ρευστοποιητική του δράση ή η προσθήκη άλλου ρευστοποιητικού επιτρέποντας την μείωση του νερού αναμείξεως.

- Προσθήκες: ονομάζονται τα υλικά εκείνα που παρουσιάζουν μηχανική δράση λόγω της ελάχιστης ή μηδαμινής δραστηριότητας και η μάζα τους συμμετέχει στην σύνθεση των υλικών. Κάποιες από αυτές τις προσθήκες είναι: α) η παιπάλη ή φίλερ, που πρόκειται για λεπτόκοκκα αδρανή γαιώδη υλικά, β) οι ποζολάνες, οι οποίες προέρχονται από ηφαιστειακά πετρώματα τα οποία κατά την ένωση με το νερό σχηματίζουν ασβεστοπυριτικές ενώσεις που κατά τη πάροδο του χρόνου αναπτύσσουν μικρές αντοχές, γ) οι ιπτάμενες τέφρες, που αποτελούν προϊόντα καύσης των γαιανθράκων και των λιγνιτών παραγόμενες κυρίως στα εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος και, όπως και τα ηφαιστειακά υλικά, οι ιδιότητες τους είναι ποζολανικές ή υδραυλικές και δ) η πυριτική παιπάλη, που δημιουργείται ως υποπροϊόν των πυριτιούχων μετάλλων μετά την τοποθέτησή τους στο φούρνο τήξεως. Η δομή της αποτελείται κυρίως από σφαιρίδια διοξειδίου του πυριτίου ( $\text{SiO}_2$ ) και το μέγεθος των κόκκων κυμαίνεται από 0,1 έως 1,0  $\mu\text{m}$ . Υπάρχει μέσα στο σκυρόδεμα σ ποσοστό 5-15% κατά βάρος τσιμέντου είτε ως κονία είτε ως αιώρημα. Λειτουργεί ως λιπαντικό ανάμεσα στους κόκκους αλλά όταν ενωθεί με το υδροξείδιο του ασβεστίου που παράγεται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου προκύπτουν επιπλέον πυριτικά ασβέστια που συμμετέχουν άμεσα στην τελική αντοχή του σκυροδέματος.

### 1.2.6 Άλλα είδη σκυροδέματος

Όσον αφορά το βάρος τους τα σκυροδέματα χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- ✓ Τα κοινά σκυροδέματα, με ειδικό βάρος που κυμαίνεται από 20,0 - 25,0  $\text{kN/m}^3$ .
- ✓ Τα ελαφρά σκυροδέματα, με ειδικό βάρος από 3,0 - 20,0  $\text{kN/m}^3$ .
- ✓ Τα βαριά σκυροδέματα, με ειδικό βάρος από 30,0 - 50,0  $\text{kN/m}^3$ .

Το κοινό σκυρόδεμα είναι το πιο γνωστό είδος σκυροδέματος και αυτό που χρησιμοποιείται ευρέως καθώς ήταν το πρώτο που χρησιμοποιήθηκε. Το ελαφρύ και βαρύ σκυρόδεμα αποτελούν νεότερες εξελίξεις του σκυροδέματος γνωρίζοντας, όμως, όλο και ευρύτερη χρήση το καθένα στον τομέα του. Εκτός, βέβαια, από αυτή την διάκριση υπάρχουν και τα ειδικά σκυροδέματα.

#### A. Ελαφρά Σκυροδέματα

Τα όρια του φαινομένου ειδικού βάρους του σκυροδέματος έχουν αποδειχθεί περιορισμένα, γι' αυτό και για να μειωθεί το φαινόμενο ειδικό βάρος η ενέργεια που πρέπει να γίνει είναι να αυξηθεί σημαντικά το πορώδες, το οποίο εξαρτάται από το πορώδες των αδρανών, το πορώδες του κονιάματος και από την κοκκομετρική σύνθεση.

Τα ελαφρά σκυροδέματα, λοιπόν, διακρίνονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- α) σκυροδέματα με ελαφρά αδρανή,
- β) κυψελωτά σκυροδέματα.

Όσον αφορά την κοκκομετρική σύνθεση, πρόκειται για σκυροδέματα ειδικής επεξεργασίας χωρίς λεπτόκοκκο υλικό, που τις περισσότερες φορές είναι προϊόντα παρασκευής ελαφρών αδρανών.

Ο διαχωρισμός βάσει λειτουργίας είναι ο εξής:

- α) σκυροδέματα μονώσεως, που η μοναδική τους χρήση είναι να επιτευχθεί η μόνωση θερμότητας και ήχου.
- β) σκυροδέματα κατασκευής και μονώσεως, που εκτός από την μόνωση που προσφέρουν, παρουσιάζουν αντοχή και έτσι μπορούν να φέρουν το ίδιο το βάρος και τα φορτία. Χρησιμοποιείται για την κατασκευή διαχωριστικών τοίχων ανάμεσα στους εσωτερικούς χώρους.
- γ) σκυροδέματα κατασκευής, των οποίων η αντοχή ανταποκρίνεται στην επαρκή στατικότητα του κτιρίου και μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για οποιοδήποτε άλλο στατικό στοιχείο της κατασκευής.



	Τύπος σκυροδέματος	πυκνότητα t/m <sup>3</sup>	λ kcal/ m·h·°C	f <sub>θλ</sub> MPa	f <sub>εφ</sub> MPa	Χρόνια συστολή mm/m
1.	Κισηρομπετόν	0,6-1,8	0,25-0,40	2-22	0,5-5	0,3-0,80
2.	Σκωριοκισηρομπετόν	1,1-1,5	-	1-20	-	-
3.	Κεραμομπετόν	1,2-1,8	-	5-20	-	-
4.	Σπογγοκεραμομπετόν	0,6-1,7	0,17-0,51	2,5-12	-	0,36-0,53
5.	Περλιτομπετόν	0,15-1,2	0,07-0,15	1-10	-	-
6.	Ξυλομπετόν	0,6-1,2	0,15-0,30	1-13	1-7	10-30
7.	Κυψελομπετόν	0,4-1,0	0,10-0,52	2-6	0,2-2	10-25
	Ακραίες τιμές	0,15-1,8	0,07-0,51	1-22	0,2-7	0,3-30

Εικόνα 3. Συνοπτικός Πίνακας ιδιοτήτων ελαφρών σκυροδεμάτων τσιμέντου  
(Βιβλίο: Τεχνολογία του Σκυροδέματος – ΧΡΙΣΤΟΥ Μ. ΟΙΚΟΝΟΜΟΥ –  
Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ – 4Μ΄ΉΠΕ – ΤεΚΔΟΤΙΚΗ)

α/α	Ιδιότητα	Μονάδες	Τιμή
1.	Φαινόμενη πυκνότητα ελαφρά μέσα βαριά	t/m <sup>3</sup>	0,3 - 0,8 0,8-1,2 1,2-2,0
2.	απόλυτη πυκνότητα ανόργανα αδρανή οργανικά αδρανή	t/m <sup>3</sup>	2,45 - 2,80 1,75-2,20
3.	Συντελεστής θερμικής διαστολής	/°C	1-1,5 x 10 <sup>-5</sup>
4.	ολικό πορώδες	%	35-80
5.	Συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας	kcal/m·h·°C	0,20 - 0,68
6.	Αντοχή σε θλίψη	MPa	2-50
7.	Αντοχή σε εφελκυσμό	MPa	0,5-3
8.	Μέτρο ελαστικότητας	MPa	10.000-150.000
9.	Χρόνια συστολή ανόργανα αδρανή οργανικά αδρανή	mm/m	0,4-2,0 -6,0

Εικόνα 4. Γενικές ιδιότητες των ελαφρών σκυροδεμάτων (Βιβλίο:  
Τεχνολογία του Σκυροδέματος – ΧΡΙΣΤΟΥ Μ. ΟΙΚΟΝΟΜΟΥ – Εκδόσεις  
ΣΕΛΚΑ – 4Μ΄ΉΠΕ – ΤεΚΔΟΤΙΚΗ)

Οι παραπάνω εικόνες περιγράφουν κάποιες ιδιότητες των ελαφρών σκυροδεμάτων και σύμφωνα με αυτές τις ιδιότητες προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η τιμή του φαινόμενου ειδικού βάρους είναι μικρότερη λόγω του ότι αποτελεί ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των ελαφρών σκυροδεμάτων.
- Το απόλυτο ειδικό βάρος κινείται στα ίδια πλαίσια αφού πρόκειται για συμπαγές υλικό.
- Το ολικό πορώδες παίρνει πάντα την μέγιστη τιμή διότι είναι αυτό το χαρακτηριστικό που μειώνει το βάρος.
- Ο συντελεστής θερμικής αγωγιμότητας κυμαίνεται μεταξύ του 1/2 με 1/8 του συντελεστή που έχει το κοινό σκυρόδεμα.
- Η θλιπτική αντοχή των ελαφρών σκυροδεμάτων είναι μικρότερη σε σχέση με εκείνη των κοινών, όμως όσο αυξάνουμε την προσθήκη τσιμέντου είναι προσιτά τα όρια έως 50 - 60 MPa.
- Η εφελκυστική αντοχή έχει παρατηρηθεί στα ίδια αποτελέσματα, ωστόσο κάποιες φορές μπορεί να είναι και λίγο μειωμένη.
- Το μέτρο ελαστικότητας έχει δείξει πως είναι μειωμένο χωρίς, όμως, να παρατηρείται αύξηση στα βέλη κάμψης αφού το βάρος μειώνεται ταυτόχρονα.
- Η συστολή που προκαλείται με την πάροδο του χρόνου είναι περίπου διπλάσια.

Γενικά, έχει διαπιστωθεί ότι τα ελαφρά σκυροδέματα παρουσιάζουν μεγαλύτερη ποικιλία σχετικά με τα κοινά λόγω των διάφορων υλικών και των μεθόδων που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή τους. Η ονομασία "ελαφρύ σκυρόδεμα" είναι πολύ γενική κι αυτό γιατί οι ιδιότητες του έχουν μεγάλο εύρος.

### **Σκυροδέματα με ελαφρά αδρανή**

Πρόκειται για μια κατηγορία σκυροδεμάτων, στα οποία δεν περιέχονται ασβεστολιθικά αδρανή αλλά κάποια άλλα είδη, χαρακτηριστικά των οποίων είναι το μικρό ειδικό βάρος και το μεγάλο πορώδες. Αυτά τα αδρανή μπορούν να είναι είτε φυσικά είτε τεχνητά καθώς επίσης ανόργανα ή οργανικά. Χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- I. Υλικά φυσικής προέλευσης χωρίς επεξεργασία, όπως τα ηφαιστειακά προϊόντα, η κίσηρη κ.λπ.
- II. Υλικά φυσικής προέλευσης που έχουν υποστεί κάποια βιομηχανική επεξεργασία, όπως ο διογκωμένος περλίτης, ο σπογγοκέραμος κ.λπ.

- III. Βιομηχανικά υποπροϊόντα χωρίς κάποια επεξεργασία, όπως τα οξείδια σιδήρου των υψικαμίνων κ.λπ.
- IV. Βιομηχανικά προϊόντα που έχουν υποστεί επεξεργασία, όπως το διογκωμένο γυαλί, τα διογκωμένα οξείδια του σιδήρου κ.λπ.
- V. Οργανικά υλικά, όπως ξύλο, πλαστικά, φυτικές ίνες κ.λπ.

### Κισηρομπετόν

Αποτελεί συνδυασμό της κίσηρης και του τσιμεντοπολτού. Η κίσηρη είναι ένα πέτρωμα που δημιουργείται από την ψύξη της ηφαιστειακής λάβας καθώς αποβάλλονται από αυτή τα αέρια που βρίσκονται στο εσωτερικό της. Στην Ελλάδα η κίσηρη μπορεί να βρεθεί στη Σαντορίνη, στη Μήλο και σε κάποια ηφαιστειογενή νησιά των Δωδεκανήσων (π.χ. Νίσυρος). Λειτουργεί ως αδρανές υλικό για την παρασκευή του κισηρομπετόν και είναι το φθηνότερο αδρανές που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να παρασκευαστεί ελαφρύ σκυρόδεμα. Το τσιμεντοκονίαμα που χρησιμοποιείται ως συνδετικό υλικό του κισηρομπετόν περιέχει ασβεστολιθική άμμο ή, εναλλακτικά, λεπτόκοκκο υλικό της ίδιας της κίσηρης. Ανάλογα με τον βαθμό στεγανότητας, το βάρος και την αντοχή που επιθυμούμε να έχει το κισηρομπετόν που θα παρασκευάσουμε προστίθενται και οι απαραίτητες αναλογίες αδρανών και τσιμεντοπολτού.

Όπως σε όλα τα ελαφρά σκυροδέματα, έτσι και στο κισηρομπετόν, η χρόνια συστολή είναι μεγαλύτερη σε σχέση με εκείνη του κοινού σκυροδέματος και κινείται στα 0,3 - 0,8 mm/m. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα ελαφρά αδρανή έχουν αυξημένη ελαστικότητα και λιγότερη αντίσταση στη συστολή του κονιάματος.

Στο κισηρομπετόν δίνεται η δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί και για την κατασκευή φέρουσων κατασκευών αφού έχει αποδειχθεί ότι η κίσηρης δεν επιδρά αρνητικά στον οπλισμό. Για τη διάβρωση του είναι υπεύθυνο το πορώδες του υλικού, καθώς επίσης, και ο αέρας και το νερό που εισέρχονται μέσα σε αυτό. Συγκεκριμένα, η παρουσία θείου μέσα στην κίσηρη κάνει τις συνθήκες δυσμενέστερες. Για την προστασία, λοιπόν, του οπλισμού πρέπει να ληφθεί υπ' όψιν η πυκνότητα και η στεγανότητα του ιστού.

Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει τις τιμές του συντελεστή θερμικής διαστολής του σκυροδέματος ανάλογα με το εκάστοτε αδρανές.

Αδρανές υλικό (σκύρα ή χαλίκια)	Γραμμικός συντελεστής θερμικής διαστολής	
	Ξηρά συντήρηση ( $\times 10^{-6} / ^\circ \text{C}$ )	Συντήρηση στο νερό ( $\times 10^{-6} / ^\circ \text{C}$ )
Χαλίκια ποταμών	11,8	11,7
Ψαμμίτης	11,5	11,4
Οξίδια σιδήρου (σκουριά) υψικαμίνων	11,3	11,9
Διαβάσης	11,6	9,9
Βασάλτης	9,8	9,5
Γρανίτης	9,6	9,6
Ασβεστόλιθος	8,2	8,6
Κίσηρη	12,6	10,2

Εικόνα 5. Γραμμικός συντελεστής θερμικής διαστολής σκυροδεμάτων με αδρανή από διάφορες προελεύσεις – (Βιβλίο: Τεχνολογία του Σκυροδέματος – ΧΡΙΣΤΟΥ Μ. ΟΙΚΟΝΟΜΟΥ – Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ – 4Μ΄ΕΠΕ – ΤεΚΔΟΤΙΚΗ)

### Σκωριοκισηρομπετόν

Η σκωριοκίσηρη είναι ένα υλικό που γίνεται από ένα είδος τεχνητής κίσηρης, επεξεργασμένη κατάλληλα σε σπαστήρες για να αποκτήσει το επιθυμητό μέγεθος κόκκων, προερχόμενης από την σκουριά υψικαμίνων, τα προϊόντα των οποίων περιλαμβάνουν πυριτικά, ασβεστολιθικά και αργιλικά υλικά που με την κατάλληλη ψύξη παίρνουν τη μορφή γυαλιού. Στην θερμοκρασία των  $1600^\circ\text{C}$ , τα προϊόντα αυτά λιώνουν και έρχονται με επαφή με υδρατμούς δημιουργώντας μια αφρώδη μάζα.

Η σκωριοκίσηρη αποτελεί το αδρανές υλικό για την παρασκευή του σκωριοκισηρομπετόν. Το φαινόμενο βάρος των κόκκων κυμαίνεται στα  $6,0 - 11,0 \text{ kN/m}^3$  και οι ιδιότητες του είναι παρόμοιες με το κισηρομπετόν που προέρχεται από φυσική κίσηρη.

### Σπογγοκεραμομπετόν

Σπογγοκέραμος ή διογκωμένη άργιλος είναι ένα υλικό που χρησιμοποιείται ως αδρανές, κυρίως στο εξωτερικό, για την παρασκευή ενός ελαφρύ σκυροδέματος, του σπογγοκεραμομπετόν. Για να προκύψει αυτό το προϊόν, κάποιοι άργιλοι με οξειδία του σιδήρου, όταν υπερθερμανθούν σε θερμοκρασία 1200°C πενταπλασιάζουν το μέγεθος τους λόγω της αποσύνθεσης των οξειδίων του σιδήρου και της παραγωγής αερίων. Για να σχηματιστεί, όμως, το συγκεκριμένο υλικό είναι απαραίτητο να υπάρχει μεγάλη ιξώδη συνεκτικότητα ώστε να μην διασπαστεί η μάζα και τα αέρια αυτά να δημιουργήσουν μια πορώδη υφή.

### Περλιτομπετόν

Πρόκειται για συνδυασμό περλίτη ως αδρανές υλικό και τσιμεντοπολτού. Ο περλίτης είναι πέτρωμα ηφαιστειακής προέλευσης και δημιουργείται όταν η ηφαιστειακή λάβα ψυχθεί απότομα. Θεωρείται ως φυσικό γυαλί και η δομή του περιλαμβάνει οξειδία πυριτίου και αλουμινίου. Στην θερμοκρασία μεταξύ 900 - 1200°C οι κόκκοι του διογκώνονται, όπως και στη σκωριοκίσηρη, εξαιτίας των υδρατμών που προκαλεί το νερό που συνδέεται χημικά εσωτερικά του περλίτη.

Η εξόρυξη του γίνεται από το νησί της Μήλου, στον ελλαδικό χώρο, και είναι διαδικασία που ενεργείται στην επιφάνεια του εδάφους σε διάφορα μεγέθη. Η επεξεργασία των προϊόντων εξόρυξης επικεντρώνεται στην επιβολή τους σε θερμοκρασίες άνω των 950°C δεκαπλασιάζοντας, με αυτόν τον τρόπο, το μέγεθος τους και σχηματίζοντας μικρούς κόκκους λευκού χρώματος.

Οι συνήθειες αναλογίες του περλίτη προς το τσιμέντο είναι 4:1 - 8:1. Το φαινόμενο ειδικό βάρος κινείται στα όρια του 3,5 - 6,0kN/m<sup>3</sup> και η θλιπτική του αντοχή γύρω στα 1 - 3 MPa.

### Ξυλομπετόν

Μιλώντας για το ξυλομπετόν αναφερόμαστε σε ένα είδος σκυροδέματος με οργανικά αδρανή κατά τη σύσταση του οποίου τα αδρανή αντιπροσωπεύονται από ίνες ξύλου. Ωστόσο, η επαφή του κονιάματος με το ξύλο δεν δημιουργεί τα επιθυμητά αποτελέσματα και δημιουργεί προβλήματα, τα οποία λύνονται μόνο αν χρησιμοποιηθεί μαγνησιακό τσιμέντο. Σε διαφορετική περίπτωση που

χρησιμοποιείται τσιμέντο κοινής χρήσης πρέπει να προηγηθεί η κατάλληλη επεξεργασία.

Κατά την επεξεργασία αυτή, οι ίνες του ξύλου βρέχονται με ασβεστικό γαλάκτωμα, χλωριούχο ασβέστιο, υδράλο, ασφατικά υλικά, ακόμη και με την κοινή τσιμεντοκονία. Οι ποσότητες που απαιτούνται είναι 150 - 300 kg/m<sup>3</sup> τσιμέντου, όταν πρόκειται για μονωτικά υλικά και 300 - 500 kg/m<sup>3</sup> για ανθεκτικότερα υλικά.

Η θλιπτική και η εφελκυστική αντοχή του ξυλομπετόν είναι περίπου ίδιες, κυρίως στα όρια των μικρών αντοχών. Παρακάτω παρουσιάζονται κάποιες από τις ιδιότητες του ξυλομπετόν.

Τσιμέντο	kg/m <sup>3</sup>	150-300	300-500
Φαινόμενο ειδ. βάρος	kN/m <sup>3</sup>	6,0 - 8,0	8,0 - 12,0
αντοχή σε θλίψη	MPa	1 - 3	3 - 12
αντοχή σε εφελκυσμό	MPa	1 - 3	3 - 7
χρόνια συστολή	mm/m	1 - 3(8)	1 - 3(8)
συντελεστής θερμαγωγιμότητας	kcal/m.h°C	0,15 - 0,30	0,30 - 0,45

*Εικόνα 6. Ιδιότητες του ξυλομπετόν – (Βιβλίο: Τεχνολογία του Σκυροδέματος – ΧΡΙΣΤΟΥ Μ. ΟΙΚΟΝΟΜΟΥ – Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ – 4Μ''ΕΠΕ – ΤεΚΔΟΤΙΚΗ)*

### **Κυψελωτά σκυροδέματα**

Τα κυψελωτά σκυροδέματα ή κυψελομπετόν είναι εκείνα τα ελαφρά σκυροδέματα, τα οποία δεν αποτελούνται από χονδρόκοκα αδρανή και θα μπορούσαν, εναλλακτικά, να ονομάζονται και κυψελοκονιάματα. Σκοπός τους είναι να δημιουργηθεί ένας πορώδης ιστός καθώς εγκλωβίζονται εκεί φυσαλίδες αέρα ή άλλα αέρια που υπάρχουν μέσα στο κονίαμα.

Διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες. Σε αεριομπετόν, που οι φυσαλίδες σχηματίζονται κατά τη διάρκεια μιας χημικής αντίδρασης και σε αφρομπετόν, που οι φυσαλίδες είναι αποτέλεσμα μηχανικού τρόπο εγκλεισμού αέρα.

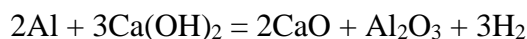
Η παρασκευή τους συνίσταται να είναι αποκλειστικά εργοστασιακή, διότι οι αναλογίες συνθέσεως καθώς και η διαδικασία παρασκευής τους πρέπει να είναι τόσο

ακριβείς που δεν επιτρέπεται η εργοταξιακή παραγωγή. Τόσο η διαδικασία όσο και τα χημικά πρόσθετα είναι αυστηρά τυποποιημένα.

### Αεριομετόν

Τα πιο συνήθη χημικά πρόσθετα ώστε να δημιουργηθούν αέρια μέσα στο κονίαμα είναι η σκόνη αλουμινίου (Al), η σκόνη σιδήρου (Fe), το υπεροξείδιο του υδρογόνου με υποχλωριώδες ασβέστιο ( $H_2O_2 + CaCl_2O_2$ ) και το ανθρακικό ασβέστιο ( $CaC_2$ ).

Όμως, το πιο γνωστό από τα προαναφερθέντα είναι το αλουμίνιο που σε συνδυασμό με το υδροξείδιο του ασβεστίου δίνουν υδρογόνο σύμφωνα με την παρακάτω χημική αντίδραση:



Όσον αφορά τις ιδιότητες του, το αεριομετόν έχει αντοχή σε θλίψη 1 - 10 MPa, αντοχή σε εφελκυσμό από κάμψη 0,5 - 2 MPa, χρόνια συστολή 1 - 2,5 (4,0) mm/m και συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda = 0,10 - 0,80 \text{ kcal/m.h.}^\circ\text{C}$ .

### Αφρομετόν

Η ονομασία αυτή οφείλεται στο γεγονός ότι για τον σχηματισμό των φυσαλίδων χρησιμοποιείται ένα αφροποιητικό υλικό και ένας σταθεροποιητής.

Συνήθη αφροποιητικά υλικά αποτελούν το ρετσίνι πεύκου επεξεργασμένο με καυστικό νάτριο και κόλλα για να πάρει μια πιο σαπωνώδη υφή, η παραφίνη κ.λπ. Από την άλλη σαν σταθεροποιητές λειτουργούν η υδρύαλος, η κόλλα, η σκόνη άνθρακα, η στάχτη κ.λπ.

Σκοπός των αφροποιητικών είναι να δημιουργήσουν φυσαλίδες αέρα, αποτέλεσμα που πετυχαίνουν όσο μειώνουν την τάση στην επιφάνεια της μάζας, όσο βρίσκεται ακόμη σε ρευστή κατάσταση. Αντίθετα, οι σταθεροποιητές, αυξάνουν την αντοχή περιμετρικά των φυσαλίδων για να φυλακίσουν εκεί τον αέρα, αφού αυξάνουν την συνεκτικότητα.

## B. Βαριά Σκυροδέματα

Ονομάζονται βαριά σκυροδέματα επειδή το ειδικό τους βάρος ξεπερνά τα  $30,0 \text{ kN/m}^3$  και για την παραγωγή τους λαμβάνονται ως αδρανή βαρέα πετρώματα.

Κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ότι έχουν πολύ μεγάλο ειδικό βάρος χωρίς όμως να αναπτύσσουν υψηλή αντοχή. Η αντοχή τους κινείται στην περιοχή ορίων της αντοχής του κονιάματος που παίρνει μέρος στη διαδικασία δημιουργίας τους καθώς πραγματοποιείται η πρόσφυση κονιάματος και αδρανών. Εξαιτίας αυτού του φαινομένου, η χρήση τους γίνεται μόνο σε εξαιρετικές περιπτώσεις που απαιτείται μεγαλύτερο βάρος ή πυκνότητα. Τέτοιες περιπτώσεις είναι στα θεμέλια μηχανών και στην κατασκευή θωράκισης της ραδιενέργειας σε πυρηνικούς αντιδραστήρες.

### C. Ειδικά Σκυροδέματα

#### Σκυροδέματα υψηλής αντοχής

Σκυροδέματα υψηλής αντοχής (high strength concrete) θεωρούνται εκείνα που η αντοχή τους ξεπερνά τα  $50 \text{ MPa}$ . Για να επιτευχθούν αυτές οι υψηλές αντοχές πρέπει:

- η ποσότητα του νερού να είναι μειωμένη όσο το δυνατόν περισσότερο, σε ποσοότητες  $0,40$  χωρίς τη χρήση υπερρυστοποιητικού και  $0,25$  για τις περιπτώσεις που το ρυστοποιητικό περιέχεται στη μέγιστη επιτρεπόμενη ποσότητα.
- να αυξηθεί το τσιμέντο, αλλά να μην ξεπερνά τα  $500 \text{ kg/m}^3$ .
- να προστεθεί πυριτική παιπάλη χαρακτηριζόμενη ως πολύ υψηλής αντοχής  $5 - 15 \%$  κατά βάρος τσιμέντου. Προϋπόθεση για την προσθήκη παιπάλης είναι να μειωθεί η παιπάλη των αδρανών και να αυξηθεί το υπερρυστοποιητικό πάνω από την δόση που απαιτείται.

Αν ακολουθηθούν τα παραπάνω με ακρίβεια τότε πετυχαίνονται αντοχές έως και  $135 \text{ MPa}$ . Τέτοια σκυροδέματα έχουν χρησιμοποιηθεί σε τεράστια έργα όπως μεγάλα κτίρια και γέφυρες πολλών ανοιγμάτων.



Ωστόσο, όπως είναι φυσικό, τα σκυροδέματα υψηλής αντοχής έχουν και κάποια μειονεκτήματα, κάποια από τα οποία είναι:

- έχουν μικρό αριθμό ανάπτυξης της αντοχής συναρτήσει του χρόνου, αποτέλεσμα του οποίου, πολλές φορές, είναι να μειωθεί η αντοχή. Παρατηρείται, κυρίως, σε αντοχές σε εφελκυσμό και σε αντοχές σε εφελκυσμό από κάμψη.
- παρουσιάζουν ευαισθησία στην ξήρανση και δημιουργούν μικρές ρηγματώσεις στην επιφάνεια. Για αυτό το μειονέκτημα είναι υπεύθυνη η πυριτική παιπάλη.
- εμφανίζουν μεγάλο μέτρο ελαστικότητας, μικρή πλαστιμότητα και μικρές παραμορφώσεις.

### **Σκυρόδεμα με ανακυκλούμενα υλικά**

Σκυρόδεμα με ανακυκλούμενα υλικά (Recycled concrete) ονομάζεται το σκυρόδεμα, το οποίο περιέχει αδρανή που προέρχονται από σκυροδέματα παλαιών κατασκευών. Υπάρχουν δύο αιτιολογίες για να χρησιμοποιηθεί ένα παλαιό σκυρόδεμα ως αδρανές.

Πρώτον, για λόγους οικονομίας, όταν σε κάποια περιοχή τα υλικά είναι δύσκολο να βρεθούν καθώς και το κόστος μεταφοράς τους στη συγκεκριμένη περιοχή. Έτσι, αν το κόστος εξόρυξης, τεμαχισμού και μεταφοράς βρίσκεται πολύ κοντά στο κόστος επαναχρησιμοποίησης, τότε προτιμάται η δεύτερη μέθοδος.

Δεύτερον, σε περιπτώσεις που το παλαιό υλικό παρουσιάζει προβλήματα εναπόθεσης.

Η διαδικασία αυτής της τεχνικής έχει ως εξής: το παλαιό σκυρόδεμα αφού καθαιρεθεί, τεμαχίζεται σε μεγάλα μεγέθη και στη συνέχεια τοποθετούνται στον θραυστήρα ώστε να πάρουν το κατάλληλο μέγεθος της τάξης των 40 mm.

Μια διαφορετική μέθοδος είναι χρησιμοποιώντας τα μεγάλα μηχανήματα οδοποιίας να επιτευχθεί συγχρόνως καθαίρεση, θραύση, ανάμιξη και διάστρωση του υλικού.

Ωστόσο, το ανακυκλούμενο σκυρόδεμα παρουσιάζει και ορισμένα προβλήματα. Πρώτον, μπορεί να βρεθούν μέσα σε αυτό ξένα υλικά, όπως η άσφαλτος ή κάποιο υλικό που χρησιμοποιείται στο υπόστρωμα. Σε αυτή την περίπτωση, απαιτείται επιπλέον καθαρισμός και πλύσιμο του υλικού. Δεύτερον, υπάρχει ελλιπής ποσότητα λεπτόκοκκου υλικού, πράγμα το οποίο αντιμετωπίζεται με την προσθήκη άμμου κατά 15 - 30 %.

Οι ιδιότητες που εμφανίζουν τα ανακυκλούμενα αδρανή είναι ότι έχουν μεγαλύτερη απορροφητικότητα και μικρότερο φαινόμενο ειδικό βάρος. Οι ιδιότητες, όμως, του προϊόντος που παράγεται τελικά είναι οι ακόλουθες:

- Παρουσιάζει αύξηση στην τιμή του εργασίμου, λόγω της απορροφητικότητας που αυξάνεται και του ακανόνιστου σχήματος
- Μειώνεται το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή (κατά 2 - 10 MPa) σύμφωνα με πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί σε ένα εξάμηνο. Αυτό το πρόβλημα αντιμετωπίζεται με λίγη παραπάνω ποσότητα τσιμέντου.
- Η συστολή ξήρανσης φαίνεται να αυξάνεται ενώ η θερμικές συστολοδιαστολές δεν διαφοροποιούνται.

Επιπρόσθετα, το νέο υλικό που παράγεται εμφανίζει μεγαλύτερη ανθεκτικότητα επειδή το παλιό κονίαμα που ερχόταν με επαφή με τα αδρανή έχει κλείσει τους ανοιχτούς πόρους με αποτέλεσμα να δημιουργήσει κάτι σαν τείχος προστασίας, το οποίο λειτουργεί αρνητικά στην απορροφητικότητα.

### **Ινοπλισμένα Σκυροδέματα**

Ινοπλισμένα ονομάζονται τα σκυροδέματα στα οποία προστίθενται ίνες αμιαντοσιμέντου, γυαλιού, πλαστικές και μεταλλικές ώστε να βελτιωθούν κάποιες από τις ιδιότητες τους. Ο τρόπος με τον οποίο οι ίνες λαμβάνουν χώρο μέσα στη μάζα του σκυροδέματος προσδίδουν καλύτερη ομοιογένεια. Χρησιμοποιούνται

συνήθως μεταλλικές ίνες όσον αφορά την τροποποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων και πλαστικές για την βελτίωση της πλαστιμότητας.

Οι ίνες λαμβάνουν τις δυνάμεις μέσω των ρωγμών και της παραμόρφωσης που δημιουργούν στο σκυρόδεμα. Αφού δημιουργηθεί ρηγμάτωση οι ίνες που υπάρχουν μέσα στο υλικό δέχονται τις δυνάμεις λόγω εφελκυσμού αυξάνοντας, με αυτόν τον τρόπο, την πλαστιμότητα.

Τοποθετώντας ινοπλισμό μέσα στο σκυρόδεμα επηρεάζονται πολλές από τις ιδιότητες του με κυριότερα το εργάσιμο και την πλαστιμότητα. Η μεταβολή οφείλεται στην ποσότητα των ινών που θα περιχυθούν στο υλικό, καθώς και στην υφή τους. Οι ίνες προστίθενται σε ποσοστό περίπου 3 - 8 %κατά βάρος. Μεγαλύτερη ποσότητα προκαλεί προβλήματα στο εργάσιμο και μικρότερη δεν επιδρά καν.

Οι ιδιότητες του ινοπλισμένου σκυροδέματος είναι:

- ✓ Έχει, κατά κάποιο τρόπο, αυξημένη αντοχή σε θλίψη, όχι, όμως, φανερά αισθητή συγκριτικά με την αντοχή του υλικού, και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι όταν το υλικό καταπονηθεί θλιπτικά οι ίνες δυσκολεύουν την εγκάρσια παραμόρφωση να αναπτυχθεί μειώνοντας τον συντελεστή Poisson( $\nu$ ).
- ✓ Μέχρι τη δημιουργία των πρώτων ρωγμών η εφελκυστική αντοχή είναι μεγαλύτερη.
- ✓ Όπως στον εφελκυσμό οι ίνες αναλαμβάνουν τις εφελκυστικές δυνάμεις, έτσι και στην διάτμηση οι διατμητικές δυνάμεις που εμφανίζονται είναι αρμοδιότητα των ινών. Έτσι, η αντοχή σε διάτμηση αυξάνεται.
- ✓ Το μέτρο ελαστικότητας δεν παρουσιάζει μεγάλη μεταβολή γιατί οι τιμές του λαμβάνονται στο στάδιο πριν τη ρηγμάτωση που προκαλούν οι ίνες.

- ✓ Σημαντική διαφορά παρατηρείται στην πλαστιμότητα και στην ενέργεια που απορροφάται.

Στο τελικό στάδιο που έχει σχηματιστεί πλήρως το επιθυμητό προϊόν, οι ιδιότητες του εξαρτώνται από την ποσότητα των ινών, την γεωμετρία τους και τη συνάφεια ινών και τσιμεντοκονίας.

Τέλος, όσον αφορά τη χρήση του ινοπλισμένου σκυροδέματος, πρόκειται για περιπτώσεις που απαιτείται μεγάλη παραμόρφωση και πλαστιμότητα και σε περιπτώσεις που δεν μπορεί να τοποθετηθεί οπλισμός όπως, η επένδυση σηράγγων, στην ενισχύση του σκυροδέματος έναντι πυρκαγιάς, σεισμού, τριβής και στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα.

### **Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα**

Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (gunite, shotcrete, sprayed concrete) λέγεται το σκυρόδεμα που στρώνεται σε μια επιφάνεια με ειδικό μηχάνημα εκτόξευσης του υλικού. Υπάρχουν δύο τρόποι εκτόξευσης:

- α) η υγρή εκτόξευση, κατά την οποία τα υλικά παρασκευής αναμιγνύονται πριν γίνει η εκτόξευση. Η μέθοδος αυτή εφαρμόζεται σε μεγάλα έργα που απαιτούνται μεγάλες ποσότητες τσιμέντου, και
- β) η ξηρή εκτόξευση, όπου γίνεται η ανάμειξη των ξηρών υλικών πριν την εκτόξευση ενώ το νερό προστίθεται στη φάση της εκτόξευσης και ταυτόχρονα γίνεται η ανάμειξη τους όσο το τελικό προϊόν φτάνει στην επιφάνεια που διαστρώνεται. Χρησιμοποιείται κυρίως για επισκευές και ενισχύσεις κατασκευών και σε οποιοδήποτε έργο που χρειάζεται μικρή ποσότητα υλικού.

Στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα διακρίνουμε δύο περιπτώσεις, την στρώση που αναφέρεται στο μέρος του υλικού που προσκολλάται επάνω στην επιφάνεια στην οποία εκτοξεύεται και την απώλεια αναπηδήσεως, δηλαδή στο ποσοστό του υλικού που χάνεται. Τα ποσοστά αυτά είναι:

15 - 30 % σε κατακόρυφες επιφάνειες

5 - 10 % σε οριζόντιες επιφάνειες (δάπεδα)

30 - 50 % σε οροφές

Το υλικό που χάνεται απαγορεύεται να χρησιμοποιηθεί ξανά. Ωστόσο, στο εκτοξευόμενο σκυρόδεμα υπάρχει η δυνατότητα να μεταλλικές ή συνθετικές ίνες, ταχυπηκτικά πρόσθετα και διάφορες προσθήκες, όπως ιπτάμενη τέφρα, σκωρία υψικαμίνων κλπ.

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα, όπως και το κοινό, συνθέεται βάσει των απαραίτητων κανονισμών για να επιτευχθούν ορισμένες ιδιότητες. Συγκεκριμένα, η μικρότερη οριακά ποσότητα τσιμέντου που προστίθεται είναι τα  $300\text{kg/m}^3$  και ο λόγος νερού προς τσιμέντο κυμαίνεται μέσα στα όρια 0,35 - 0,55.

Για τη σωστή διάστρωση του εκτοξευόμενου σκυροδέματος πρέπει να γίνονται μερικές ενέργειες. Αρχικά, η επιφάνεια που πρόκειται να διαστρωθεί πρέπει να καθαρίζεται καλά από περιττά υλικά, οποιαδήποτε κοιλότητα υπάρχει πρέπει να σκυροδετείται και να βρέχεται καλά. Επίσης, το ακροφύσιο που θα γίνει η εκτόξευση πρέπει κάθε στιγμή να είναι κάθετο στην επιφάνεια και τόσο η ταχύτητα όσο και η απόσταση της εκτόξευσης να υπόκεινται σε δοκιμές προηγουμένως ώστε να υπολογιστούν σωστά. Τέλος, σε περίπτωση δεύτερης στρώσης είναι απαραίτητη η διαδικασία καθαρισμού όπως και στην πρώτη, ο χειριστής του μηχανήματος να είναι έμπειρος ώστε να κρίνει την ταχύτητα, την απόσταση και την ποσότητα του νερού. Η συντήρηση γίνεται με τον ίδιο τρόπο με του κοινού σκυροδέματος.

Το πλεονέκτημα του εκτοξευόμενου σκυροδέματος είναι ότι η συμπίκνωση και η αντοχή του είναι αυξημένες λόγω της δύναμης που ασκείται κατά τη διαδικασία της επίστρωσης. Ωστόσο, το μειονέκτημα αυτού του είδους σκυροδέματος είναι ότι λόγω της ποσότητας των λεπτόκοκκων υλικών που περιέχει εμφανίζει αυξημένη ρηγμάτωση. Για να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος της

αντοχής χρησιμοποιούνται κύλινδροι διαμέτρου 100 mm και λόγο μήκους προς διάμετρο 1.

Το εκτοξευόμενο σκυρόδεμα είναι περισσότερο δημοφιλές στις επισκευές κατασκευών επειδή υπάρχει μεγάλη πρόσφυση με το παλιό σκυρόδεμα χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο. Παράλληλα, σε έργα με δυσκολία κατασκευής ξυλότυπου και τοποθέτηση οπλισμού (π.χ. σήραγγες). Στις περιπτώσεις αυτές χρησιμοποιείται πλέγμα για να ενισχυθεί η επένδυση.

### **Ρητινοσκυροδέματα**

Ρητινοσκυροδέματα ονομάζονται τα σκυροδέματα εκείνα που περιέχουν στη δομή τους διάφορες συνθετικές ρητίνες, δηλαδή πλαστικά. Τα συνθετικά αυτά είναι κυρίως πολυμερή πλαστικά.

Μονομερή ορίζονται τα μόρια τα οποία με την ένωση με άλλα χημικά μόρια δημιουργούν τα πολυμερή. Η διαδικασία της ένωσης ονομάζεται πολυμερισμός και επιτυγχάνεται με την βοήθεια των καταλυτών ή με ακτινοβολία.

Τα πλαστικά διακρίνονται στα θερμοπλαστικά, τα οποία γίνονται εύπλαστα σε αυξημένη θερμοκρασία και στα μη θερμοπλαστικά, τα οποία δεν δέχονται καμία αλλαγή στις ιδιότητες τους όσο κι αν αυξηθεί η θερμοκρασία. Ωστόσο, τα περισσότερα πλαστικά, σε γενικές γραμμές, αλλάζουν ιδιότητες σε θερμοκρασία άνω των 65°C και είναι άχρηστα σε περίπτωση πυρκαγιάς αφού καταστρέφονται αν ξεπεραστούν οι 200 - 300 °C.

Οι τιμές των χαρακτηριστικών τους είναι για αντοχή σε θλιψη 75 - 130 MPa, αντοχή σε εφελκυσμό 30 - 70 MPa και μέτρο ελαστικότητας 650 - 700 GPa.

Τα ρητινοσκυροδέματα διακρίνονται σε δύο μεγάλες κατηγορίες:

- σκυροδέματα όπου τα συνθετικά υλικά προστίθενται κατά την ανάμειξη και χωρίζονται σε σκυροδέματα που έχουν σαν

συνδετική ύλη το συνθετικό υλικό (polymerconcrete) και στα σκυροδέματα που έχουν σαν συνδετική ύλη το συνθετικό υλικό και το τσιμέντο (polymerportlandcementconcrete). Το συνθετικό υλικό που εισέρχεται στο σκυρόδεμα βρίσκεται σε ποσοστό 5 - 30% κ.β. μαζί με τα υπόλοιπα υλικά. Χρησιμοποιούνται, συνήθως, πολυεστέρες και εποξειδικές ρητίνες ή παρόμοια υλικά. Η υγρασία των αδρανών περιορίζεται σε λιγότερο από 2%. Τα μηχανήματα μεταφοράς και επίστρωσης είναι κοινά με το απλό σκυρόδεμα, όμως μετά το πέρας εργασίας πρέπει να ξεπλένονται. Αφού αναμειχθούν και διαστρωθούν πραγματοποιείται ο πολυμερισμός με ακτινοβολία ή καταλύτη, που διαρκεί έως και λίγες ώρες.

- σκυροδέματα, μέσα στα οποία υπάρχουν συνθετικά υλικά (polymerimpregnatedconcrete, PIC), όπου η ρητίνη προστίθεται με τη βοήθεια κάποιου μονομερούς, αφού προηγηθεί η σκυροδέτηση και εν συνεχεία πραγματοποιείται ο πολυμερισμός.

Γενικά, έχει αποδειχθεί ότι τα ρητινοσκυροδέματα εμφανίζουν μεγαλύτερη αντοχή και στην επιφανειακή τριβή, μεγαλύτερη πρόσφυση και σημαντικότερα, μεγαλύτερη ανθεκτικότητα.

### **Αυτοσυμπυκνούμενα σκυροδέματα**

Αυτοσυμπυκνούμενα ονομάζονται τα σκυροδέματα των οποίων τα χαρακτηριστικά τείνουν περισσότερο προς τα χαρακτηριστικά των υγρών. Η δημιουργία τους οφείλεται στις μεγάλες απαιτήσεις υψηλής αντοχής σκυροδεμάτων, στο να χρησιμοποιούνται όσο το δυνατόν περισσότερες λεπτόκοκκες προσμίξεις και, φυσικά, στην εξέλιξη των υπερρρευστοποιητικών.

Τα αυτοσυμπυκνούμενα σκυροδέματα επιτρέπουν την ομαλή ροή έως ότου γίνει επίπεδη η πάνω επιφάνεια, εξαλείφουν κάθε ίχνος αέρα που υπάρχει ως φυσαλίδες και παρουσιάζει έλλειψη απομίξεως.

Ωστόσο, τα αυτοσμπυκνούμενα σκυροδέματα μπορούν να είναι είτε υψηλής είτε χαμηλής αντοχής.

Για τα σκυροδέματα αυτά δεν αρκούν οι κλασικές πειραματικές μέθοδοι μέτρησης της ρευστότητας όπως ο κώνος καθίζησης ή η τράπεζα εξαπλώσεως). Αντίθετα, προτείνονται οι παρακάτω μέθοδοι:

1. Δοχείο δύο συγκοινωνούντων θαλάμων σε σχήμα U ή ανάποδο Π, οι οποίοι χωρίζονται στα κατάντη από μια σχάρα κι ένα διάφραγμα. Σ' αυτή την περίπτωση το σκυρόδεμα εισέρχεται στον ένα θάλαμο και κατευθύνεται προς τον άλλον μέσω της σχάρας. Στον δεύτερο θάλαμο γίνεται η μέτρηση του ύψους του υλικού, της ταχύτητας ροής και της ποιότητας που έχει το υλικό, μετά την είσοδο του στο δεύτερο θάλαμο. Η μέθοδος αυτή δίνει καλύτερα αποτελέσματα σε αδρανή έως 25mm.
2. Συσκευή καθίζησης (slumpcone) με μεταλλική βάση 0,8 x 0,8 m. Σ' αυτή την περίπτωση καταγράφεται ο χρόνος από τη στιγμή που αφαιρείται ο κώνος μέχρι να σταματήσει η ροή του υλικού πάνω στη μεταλλική βάση ή μέχρι η διάμετρος να γίνει 500 mm. Προτείνεται για σκυροδέματα αδρανών έως 40 mm.
3. Μεταλλικό χωνί ή αλλιώς, ανεστραμμένος κώνος, με στόμιο στη βάση είτε σε κυλινδρικό σχήμα με διάμετρο 75 mm και με μήκος 150 mm ή ορθογώνιο διαστάσεων 65 x 75 mm και μήκους 150mm. Σ' αυτή τη μέθοδος καταγράφεται ο χρόνος που απαιτείται για να αδειάσει ο κώνος ή η ταχύτητα ροής ή κάποιος δείκτης ροής. Συστήνεται για σκυροδέματα αδρανών μέχρι 25 mm.
4. Συσκευή σχήματος L. Το υλικό τοποθετείται το κατακόρυφο δοχείο διαστάσεων 80 x 200 mm και ύψους 400mm και αφήνεται ελεύθερο μέσω διαφράγματος στο



οριζόντιο δοχείο πλάτους 200 mm και μήκους αρκετού ώστε να ρέει το υλικό.

Ως λεπτόκοκκα χαρακτηρίζονται τα υλικά των οποίων οι κόκκοι τους είναι μικρότεροι των 0,125 mm. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι το τσιμέντο, η παιπάλη που προέρχεται από αδρανή, το φίλερ, η ιπτάμενη τέφρα και η πυριτική παιπάλη. Έτσι, ένα λεπτόκοκκο υλικό σε συνδυασμό με το νερό και τα κατάλληλα υπερρυστοποιητικά συνθέτουν ένα μείγμα μέσα στο οποίο υπάρχουν κόκκοι χονδρόκοκκων υλικών.

Αυτό το μείγμα εμφανίζει τη μέγιστη ρευστότητα (μικρό ιξώδες και μικρό όριο διαρροής) αλλά ταυτόχρονα την κατάλληλη συνεκτικότητα για να μπορούν να στέκονται στη θέση τους τα χονδρότερα αδρανή.

Συγχρόνως, τα υπερλεπτόκοκκα υλικά παίζουν τον ρόλο του ρυθμιστή της ρευστότητας ώστε να μην διαχωρίζονται τα υπόλοιπα υλικά.

Οπότε, ένα μείγμα υπό αυτές τις προϋποθέσεις χαρακτηρίζεται από αύξηση των λεπτόκοκκων υλικών ξεπερνώντας τα υπάρχοντα όρια, χρήση υπερρυστοποιητικού και μείωση του μέγιστου κόκκου των αδρανών.

### **Σκυροδέματα μεγάλου όγκου**

Πρόκειται για το σκυρόδεμα έργων που οι διαστάσεις τους είναι τέτοιες που υπολογίζουμε τη θερμότητα που εκλύεται στη φάση την ενυδάτωσης και τις διαφορές που μπορεί να παρουσιάσει η θερμοκρασία μεταξύ εξωτερικής επιφάνειας και εσωτερικού.

Ένα έργο με μεγάλες διαστάσεις εμποδίζει τη θερμότητα που αναπτύσσεται λόγω της ενυδάτωσης να απομακρυνθεί καθώς και επηρεάζει αναλόγως και τις συστοδιαστολές του υλικού. Αποτέλεσμα των δύο περιγραφόμενων φαινομένων είναι η

σημαντική ρηγματώση του τελικού αποτελέσματος. Το πλεονέκτημα, όμως, είναι ότι τα ογκώδη έργα δεν απαιτούν πολύ υψηλή αντοχή και υπάρχει η δυνατότητα προσθήκης λιγότερου τσιμέντου και μικρότερης αντοχής.

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, τα υλικά και η μελέτη σύνθεσης πρέπει να ελαχιστοποιούν όσο το δυνατόν περισσότερο τη θερμότητα που εκλύεται κατά την ενυδάτωση εκτός από την εξασφάλιση των υπόλοιπων απαιτήσεων, όπως η αντοχή και η στεγανότητα. Γι' αυτό, λοιπόν, προτιμούνται ειδικά τσιμέντα με προσθήκες όπως η κίσηρη και η ιπτάμενη τέφρα. Τα αδρανή που χρησιμοποιούνται δεν μπορούν να ξεπερνούν τα 150 mm.

Για να μεταφερθεί το σκυρόδεμα στον τόπο της διαδικασίας της σκυροδέτησης χρησιμοποιούνται αντλήσεις, κάδοι αναβατόρια, κυλιόμενες ταινίες ή άλλοι μηχανικοί τρόποι. Η σκυροδέτηση πρέπει να πραγματοποιείται σε στρώσεις μέγιστου πάχους 500 mm για κόκκους διαμέτρου 150mm. Οι δονητές που παίρνουν μέρος στη διαδικασία της συμπίκνωσης πρέπει να έχουν μεγάλη ισχύ και να προϋποθέτουν την βέλτιστη συμπίκνωση στον ελάχιστο χρόνο.

Για τον έλεγχο της εκλυόμενης θερμότητας πρέπει να χρησιμοποιούνται ειδικά θερμομέτρα για να τεθεί υπό έλεγχο ότι δεν θα παρουσιαστεί διαφορά θερμοκρασίας μεγαλύτερη των 20°C ανάμεσα στην εξωτερική επιφάνεια και στο εσωτερικό. Σε περίπτωση εκτάκτου ανάγκης μπορεί να χρησιμοποιηθεί ψύξη αδρανών, εγκατάσταση σωλήνων κρύου νερού ή σκυροδέτηση της βραδινές ώρες. Αντίθετα, σε περίπτωση κρύου καιρού πρέπει να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα για να μην ψυχθεί η επιφάνεια και η διαφορά θερμοκρασίας να κυμαίνεται στα επιτρεπτά όρια.

### 1.3 Ιδιότητες του σκυροδέματος

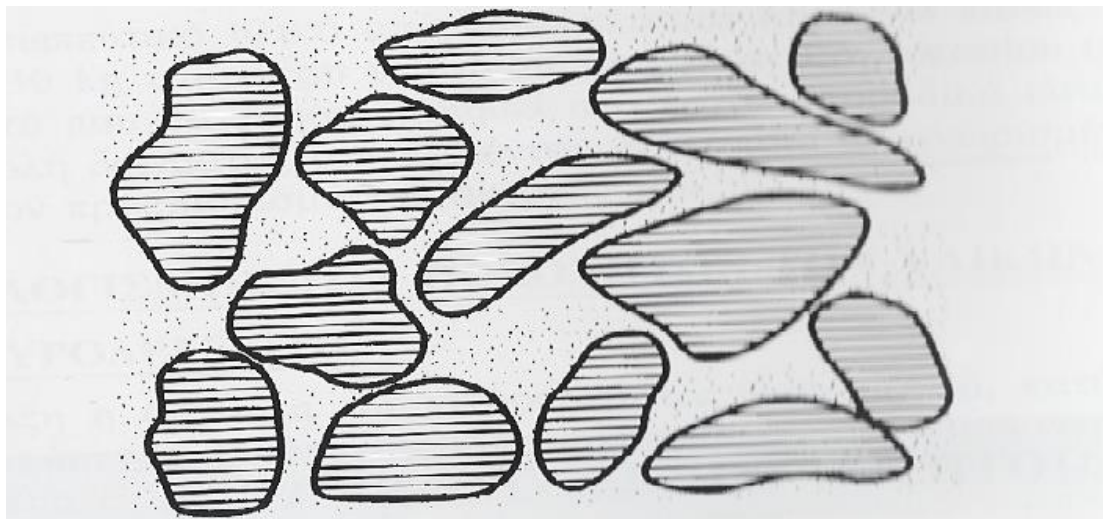
Το σκυρόδεμα, όπως και όλα τα υλικά, παρουσιάζει ορισμένες ιδιότητες που το κάνουν ευρέως διαδεδομένο στη χρήση του παγκοσμίως. Οι ιδιότητες αυτές, λοιπόν, είναι:

- Παρουσιάζει μεγάλη αντοχή όσον αφορά την διάβρωση του λόγω νερού, γι' αυτό και άλλωστε χρησιμοποιείται και για την κατασκευή φραγμάτων και καναλιών.
- Έχει τη δυνατότητα να μεταφέρεται, να διακινείται και να διαστρώνεται με μεγάλη ευελιξία καθώς και να παίρνει τη μορφή ποικίλων σχημάτων σε διάφορα μεγέθη. Σ' αυτό, εξάλλου, οφείλεται η χρήση του σε κατασκευές κάθε είδους (κτιριακές, υποδομών κ.λπ.).
- Είναι ένα φθηνό υλικό και μπορεί να παρασκευαστεί οπουδήποτε (εργοστασιακό ή εργοταξιακό σκυρόδεμα) και κάτω από οποιεσδήποτε συνθήκες – ακόμη και σε υγρό περιβάλλον (π.χ. μέσα στη θάλασσα).
- Είναι το ανθεκτικότερο υλικό σε θέματα πυρκαγιάς και το αποδοτικότερο από άλλα δομικά υλικά σε ότι αφορά το ενεργειακό κόστος λειτουργίας των κατασκευών.

#### 1.3.1 Ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος

- Εξίδρωση: είναι το φαινόμενο όπου τα στερεά συστατικά του σκυροδέματος διαχωρίζονται από το νερό. Συμβαίνει στο διάστημα πριν την πήξη. Επί της ουσίας, τα στερεά μέρη του μίγματος παρουσιάζουν καθίζηση και το νερό, εξαιτίας των τριχοειδών δυνάμεων, κινείται προς τα πάνω. Δημιουργείται με αυτόν τον τρόπο στην επιφάνεια μια στρώση νερού που στη συνέχεια εξατμίζεται. Έτσι, μειώνεται ο τελικός όγκος και απομακρύνεται το νερό, πράγμα το οποίο είναι επιθυμητό καθώς ευνοείται η αντοχή. Ο διαχωρισμός, ωστόσο, στερεών υλικών και νερού, είναι ανεπιθύμητος αφού δημιουργεί ανομοιογένεια στο σκυρόδεμα γιατί καθώς το νερό κινείται προς τα ανάντη ακολουθούν μαζί του τα λεπτόκοκκα μέρη του τσιμέντου. Με αυτόν τον τρόπο, το μίγμα υστερεί σε τσιμέντο και στην επιφάνεια του παρατηρείται ένα στρώμα κονίας, η οποία ρηγματώνεται και αποφλοιώνεται. Επίσης, ενώ το νερό διέρχεται από τα στερεά συστατικά δημιουργεί στο μίγμα λεπτούς σωλήνες. Ταυτόχρονα, το νερό συγκεντρώνεται και ανάμεσα στα κενά των

σκύρων δημιουργώντας κοιλότητες όπως επίσης και κάτω από τις ράβδους οπλισμού μειώνοντας τη συνεργασία σκυροδέματος και χάλυβα και αυξάνοντας τον κίνδυνο διάβρωσης του.



*Εικόνα 7. Σχηματική παράσταση εξιδρώσεως (Βιβλίο: Τεχνολογία του Σκυροδέματος – ΧΡΙΣΤΟΥ Μ. ΟΙΚΟΝΟΜΟΥ – Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ – 4Μ΄ΉΠΕ – ΤεΚΔΟΤΙΚΗ)*

- Απόμειξη: είναι το φαινόμενο κατά το οποίο τα στερεά συστατικά του σκυροδέματος διαχωρίζονται μεταξύ τους ανάλογα με το βάρος τους. Τα βαρύτερα οδεύουν προς τα χαμηλά κι έτσι δημιουργούνται στρώσεις με βάση αυτόν τον διαχωρισμό. Το συγκεκριμένο φαινόμενο επηρεάζει αρνητικά την αντοχή του σκυροδέματος καθώς κατανέμει τα υλικά του ανομοιόμορφα και χωρίς συνοχή.
- Εργάσιμο: χαρακτηρίζεται η ευκολία με την οποία γίνεται η μεταφορά, η διάστρωση και η συμπύκνωση του σκυροδέματος. Ωστόσο, ένας σωστότερος ορισμός θα μπορούσε να είναι το έργο που κρίνεται απαραίτητο να επιτευχθεί ώστε να υπερνικήσουμε τις εσωτερικές τριβές μέχρι την συμπύκνωση του σκυροδέματος. Το εργάσιμο είναι συνδεδεμένο με κάποιες άλλες ιδιότητες όπως η ρευστότητα, δηλαδή το πόσο εύκολα ρέει το υλικό και εξαρτάται από την ποσότητα νερού που έχει αναμειχθεί. Δεύτερη ιδιότητα αποτελεί η πλαστικότητα, το πως παραμορφώνεται το υλικό χωρίς να χάσει την συνέχειά του. Επίσης, άλλη μία ιδιότητα είναι η συνοχή, η οποία ορίζεται ως το αποτέλεσμα της έλξης των μορίων του υλικού πράγμα που συνδέεται άμεσα

με την πλαστικότητα. Παράλληλα, εξίσου σημαντικό ρόλο παίζει και η συμπτύκνωσιμότητα και είναι εξαρτώμενη από τα κενά και τον αρχικό βαθμό συμπτύκνωσης. Τελευταία ιδιότητα είναι η συνεκτικότητα, που άλλες φορές χρησιμοποιείται για το εργάσιμο και άλλοτε για την ρευστότητα. Το εργάσιμο είναι ανάλογο της ρευστότητας του μίγματος. Επομένως, αύξηση του νερού αναμείξεως συνεπάγεται αύξηση του εργασιμου Η ρευστότητα επηρεάζεται με μικρότερο βαθμό από τον λόγο νερού προς τσιμέντο. Επειδή το εργάσιμο δεν μπορεί να μετρηθεί απευθείας, έχουν εφαρμοστεί κάποιοι πειραματικοί τρόποι μέτρησης του. Στην Ελλάδα χρησιμοποιούνται κυρίως οι:

1. Καθίζηση
2. Μέτρο εξαπλώσεως
3. Μέτρο συμπτύκνωσης
4. Δοκιμή VEBE

### 1.3.2 Ιδιότητες του στερεού σκυροδέματος

➤ Αντοχή σε εξωτερικές δυνάμεις: αντοχή ονομάζεται η μέγιστη τιμή δύναμης που μπορεί να παραλάβει και να μεταβιβάσει ένα σημείο του υλικού σε διπλανό χωρίς να καταστραφεί και να παραμορφωθεί. Τεχνολογικά, όμως, ως αντοχή θεωρούμε την ικανότητα του υλικού να παίρνει και να μεταφέρει δυνάμεις με μία οριακή τιμή. Η αντοχή είναι μια ιδιότητα που εξαρτάται από την εντατική κατάσταση, την ποιότητα και την φύση του υλικού. Βέβαια, υπάρχουν ορισμένοι παράγοντες που επιδρούν και κατά την παρασκευή του σκυροδέματος και κατά τη μέτρηση της αντοχής. Οι παράγοντες αυτοί είναι:

1. Οι αναλογίες συνθέσεως, οι ποσότητες, δηλαδή, τσιμέντου, νερού και αδρανών ανά κυβικό μέτρο.
2. Η ποιότητα των υλικών, στην οποία κατηγορία δεν συμπεριλαμβάνονται μόνο τα τρία συστατικά του τσιμεντοπολτού αλλά παίζουν σημαντικό ρόλο και ο βαθμός άλεσης του τσιμέντου, η ποιότητα των πετρωμάτων, το σχήμα και η μορφή των αδρανών και η κοκκομετρική διαβάθμιση.
3. Τα "άχρηστα" υλικά που υπάρχουν ανάμεσα στους κόκκους ή μέσα στο νερό.
4. Η συμπτύκνωση του νωπού σκυροδέματος.
5. Η ηλικία του σκυροδέματος.

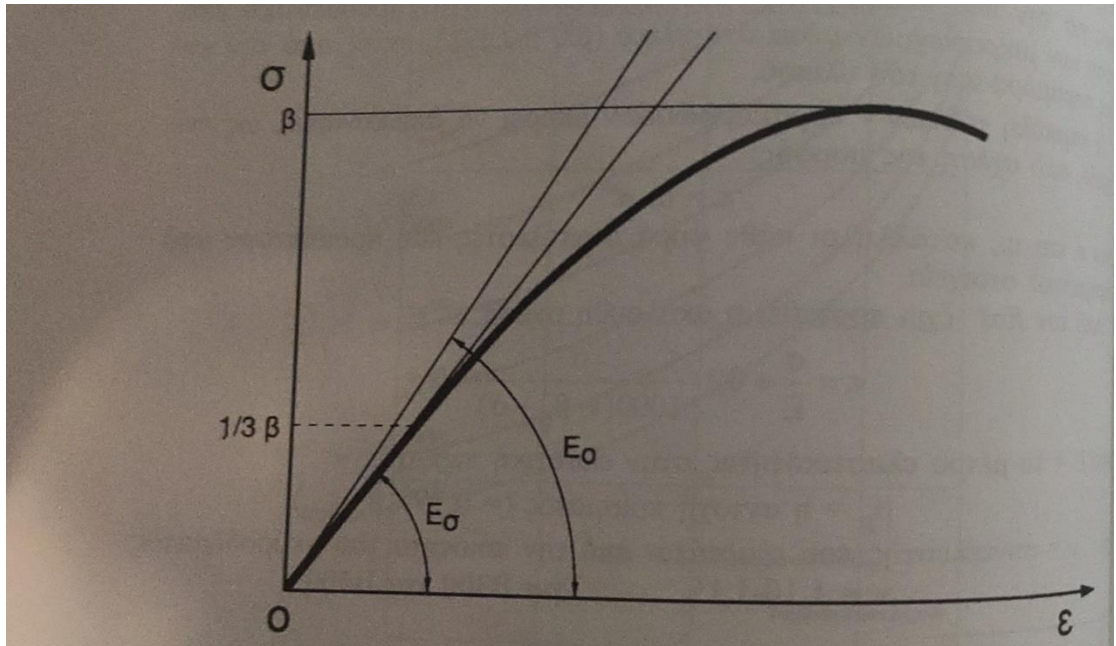
6. Ο τρόπος συντήρησης του σκυροδέματος, δηλαδή σε ποιες συνθήκες υγρασίας και θερμοκρασίας πραγματοποιήθηκε η πήξη και η σκλήρυνση του.
7. Το σχήμα, το μέγεθος, η εξωτερική υφή, η επιπεδότητα, η καμπυλότητα και οι γωνίες του δοκιμίου που αποθηκεύτηκε το σκυρόδεμα.
8. Η μορφή της καταπόνησης, δηλαδή η ταχύτητα και ο τρόπος φόρτισης του υλικού.

Οι παράγοντες που αναφέρθηκαν διαμορφώνουν ένα εύρος τιμών για την αντοχή του σκυροδέματος.

Όσον αφορά την στατική καταπόνηση οι θλιπτικές αντοχές κυμαίνονται από 50 kg/cm<sup>2</sup> έως 600kg/cm<sup>2</sup>, ενώ οι εφελκυστικές στο 1/10 έως 1/15 της θλιπτικής αντοχής.

Η μέτρηση της αντοχής γίνεται, σύμφωνα με τον Κανονισμό, σε δοκίμια συγκεκριμένου σχήματος και διαστάσεων και περιγράφεται με κάθε λεπτομέρεια ο τρόπος παρασκευής και συντήρησης του σκυροδέματος. Είναι γνωστή κι αλλιώς ως συμβατική αντοχή. Αυτό γίνεται διότι, όπως αναφέρθηκε, η αντοχή επηρεάζεται από πληθώρα παραγόντων και είναι αναγκαία η σύγκριση των αποτελεσμάτων. Οποιαδήποτε διαφοροποίηση από τις οδηγίες του κανονισμού προϋποθέτει αναγωγή στη συμβατική αντοχή.

- Ελαστική και πλαστική συμπεριφορά: η ελαστοπλαστική συμπεριφορά του σκυροδέματος απεικονίζεται με την καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων που φαίνεται παρακάτω.



Εικόνα 8. Ενδεικτική καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων σκυροδέματος  
(Βιβλίο: Τεχνολογία του Σκυροδέματος – ΧΡΙΣΤΟΥ Μ. ΟΙΚΟΝΟΜΟΥ –  
Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ – 4Μ΄΄ΕΠΕ – ΤεΚΔΟΤΙΚΗ)

Μέτρο Ελαστικότητας ονομάζεται ο λόγος των τάσεων προς τις παραμορφώσεις, δηλαδή η κλίση της εφαπτομένης της καμπύλης που παριστάνεται στην παραπάνω εικόνα και είναι αντιστρόφως ανάλογο της καταπόνησης, μειώνεται, δηλαδή, όσο αυξάνεται η καταπόνηση. Το μέτρο ελαστικότητας του σκυροδέματος κυμαίνεται μεταξύ των ορίων 5-10 GPa.

- Χρόνια συστολή και χρόνια διαστολή του σκυροδέματος: ονομάζονται τα φαινόμενα κατά τα οποία το σκυρόδεμα παρουσιάζει συστολή όταν βρίσκεται στον αέρα (συστολή ξηράνσεως) και διαστολή όταν βρίσκεται στο νερό (διαστολή υγράνσεως). Η συνολική συστολή του σκυροδέματος είναι 0,1- 1,0 mm/m και η συνολική διαστολή 0,1-0,3 mm/m. Γενικά, το μέγεθος της συστολής είναι εξαρτώμενο από την ποιότητα και το είδος του τσιμέντου καθώς επίσης και αυξάνεται αν αυξηθεί η ποσότητα του, γεγονός που δικαιολογεί τη μεγαλύτερη συστολή της τσιμεντοκονίας έναντι του σκυροδέματος. Ταυτόχρονα, αυξάνεται όσο προστίθενται νερό αναμείξεως και γίνεται αύξηση του πορώδους. Συνεπώς, η συστολή μειώνεται όσο αυξάνεται η αντοχή. Επηρεάζεται, συγχρόνως, από την φύση και την ποιότητα των αδρανών, διότι αδρανή με μεγάλη υδαταπορροφητικότητα επιταχύνουν την ξήρανση λόγω της μικρής παραμορφωσιμότητας και του μικρού μέτρου

ελαστικότητας. Σε λεπτόκοκκα αδρανή η συστολή παρουσιάζει αύξηση. Άλλη μία πληροφορία σχετικά με την συστολή είναι ότι είναι συνδεδεμένη με τις διαστάσεις και την μορφή του στοιχείου, πράγμα που δηλώνει ότι όσο αυξάνεται οι διαστάσεις αυτού του στοιχείου μειώνονται. Τέλος, εξαρτάται από τις υγρομετρικές συνθήκες του περιβάλλοντος επειδή με ελάττωση της υγρασίας διευκολύνεται η ξήρανση και έτσι η συστολή αυξάνεται.

- Ερπυσμός: ορίζεται ως η παραμόρφωση που προκύπτει από την επιβολή μιας θλιπτικής δύναμης. Ο ερπυσμός έχει εξηγηθεί με πολλές θεωρίες, ωστόσο, αυτή που έχει επικρατήσει είναι η θεωρία της "ιξώδους ροής" του Freyssinet που υποστηρίζει ότι το ασυμπιεστο νερό που βρίσκεται ανάμεσα στους πόρους δέχεται ένα μέρος του φορτίου που έχει επιβληθεί και συγχρόνως προσπαθεί να διαρρεύσει, φαινόμενο που πραγματοποιείται με πολύ αργούς ρυθμούς, λόγω τριβής, μέσω των μικρότερων διόδων. Με την απομάκρυνση αυτή το αντίστοιχο φορτίο μεταφέρεται στα στερεά μέρη όπου συμπιέζεται. Ο ερπυσμός παρουσιάζει ορισμένα χαρακτηριστικά εκ των οποίων είναι ότι το μέγεθος του είναι αντιστρόφως ανάλογο της ποιότητας του και εν τέλει μπορεί φτάσει μια τιμή πολλαπλάσια της συστολής. Το φαινόμενο αυτό πραγματοποιείται από 1 έως 10 χρόνια αλλά συνήθως έχει ολοκληρωθεί μέχρι τα δύο έτη. Επίσης, έως μια τιμή του φορτίου  $1/3$  β<sub>θο</sub> ερπυσμός είναι ανάλογος του φορτίου, στη συνέχεια όμως όσο το φορτίο αυξάνεται ο ερπυσμός αυξάνεται όλο και γρηγορότερα. Χαρακτηριστική είναι και η εκθετική του εξέλιξη κατά την οποία στην αρχή πραγματοποιείται γρήγορα και όσο προχωράει επιβραδύνεται έως μια οριακή τιμή. Επίσης, αυξάνεται όσο μειώνονται οι διαστάσεις του στοιχείου. Στα τσιμέντα υψηλής αντοχής, βέβαια, ο ερπυσμός είναι μικρότερος. Επηρεάζεται από το είδος των αδρανών και συγκεκριμένα από το μέτρο ελαστικότητας καθώς επίσης και ελαττώνεται στα χονδρόκοκκα αδρανή. Παρουσιάζει αύξηση όσο προσθέτουμε νερό αναμίξεως και, όπως και στη χρόνια συστολή, εξαρτάται από τις υγρομετρικές συνθήκες και τέλος, κατά την επιβολή φορτίου, μειώνεται όσο μεγαλύτερη είναι η ηλικία του σκυροδέματος.
- Πορώδες: είναι το πλήθος των κοιλοτήτων που υπάρχουν στο σκυρόδεμα οι οποίες μπορεί να είναι γεμάτες με αέρα ή νερό. Διακρίνονται, ανάλογα με την προέλευση τους σε διάφορες κατηγορίες:
  - α) Πόροι των αδρανών υλικών, δηλαδή οι πόροι των σκύρων και της άμμου.



β) Πόροι που σχηματίζονται από τις φυσαλίδες αέρα μέσα στο τσιμεντοκονίαμα.

γ) Πόροι που δημιουργούνται στην τσιμεντοκονία μετά την εξάτμιση του νερού.

δ) Κενά μεταξύ τσιμεντοκονιάματος και αδρανών που οφείλονται είτε στην κακή πρόσφυση, είτε λόγω συστολής του τσιμεντοπολτού, είτε στο νερό που συγκεντρώνεται στη βάση των κόκκων εξαιτίας της εξίδρωσης.

ε) Κοιλότητες που σχηματίζονται από την συμπύκνωση που δεν πραγματοποιείται σωστά.

στ) Κενά που συνδέονται με τις ρηγματώσεις λόγω συστολής και εξωτερικών καταπονήσεων.

Για το σκυρόδεμα το πορώδες βρίσκεται μέσα στα όρια 8 με 25%. Συντελεί τόσο την χρόνια συστολή, τον ερπυσμό, την υδαταπορροφητικότητα, την υδατοστεγανότητα όσο και την ανθεκτικότητα κάθε υλικού στον παγετό και, φυσικά, την αντοχή.

➤ Υδαταπορροφητικότητα και υδατοπερατότητα:

Υδαταπορροφητικότητα είναι η ικανότητα να απορροφά το υλικό νερό χωρίς εξωτερική πίεση ενώ υδατοπερατότητα είναι η ικανότητα του νερού να διαπερνά μέσα από το υλικό, όταν αυτό βρίσκεται υπό πίεση.

➤ Θερμοαγωγιμότητα: χαρακτηρίζεται από τον συντελεστή θερμικής αγωγιμότητας  $\lambda$  (kcal. m/m<sup>2</sup>. h. °C) που εκφράζει την ποσότητα της θερμότητας που διέρχεται ανά μονάδα επιφάνειας του υλικού, ανά μονάδα πάχους, σε μία ώρα και για διαφορά θερμοκρασίας 1°C. Το αντίθετο ονομάζεται συντελεστής θερμικής αντιστάσεως και ορίζεται ως  $k=1/\lambda$  (m<sup>2</sup>. h. °C/m. kcal). Η θερμοαγωγιμότητα αυξάνεται όσο αυξάνεται η πυκνότητα του σκυροδέματος καθώς και όσο αυξάνεται η ποσότητα του τσιμέντου και η περιεχόμενη υγρασία. Αύξηση παρατηρείται και με την αύξηση της θερμοκρασίας του σκυροδέματος και, τελικά, με την αύξηση των διαστάσεων του σώματος.

➤ Θερμοδιαστολή: άλλη μια ιδιότητα του σκυροδέματος είναι ότι με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνονται οι διαστάσεις του, δηλαδή διαστέλλεται. Ο συντελεστής θερμοδιαστολής  $\alpha$  είναι ο λόγος της επιμήκυνσης προς το αρχικό μήκος καθώς η θερμοκρασία αυξάνεται κατά 1°C. Για το σκυρόδεμα, η τιμή του εξαρτάται από τα υλικά της

σύνθεσης του με βάση τις αναλογίες τους. Ωστόσο, κατά τη θερμοδιαστολή δεν έχει παρατηρηθεί αλλαγή στην ποιότητα του σκυροδέματος όπως επίσης δεν μεταβλήθηκε η αναλογία του νερού ανάμειξης. Αντίθετα, αν μειωθεί η ποσότητα του τσιμέντου παρατηρείται και μείωση της θερμοδιαστολής. Σημειώνεται πως τα τσιμέντα που δεν προέρχονται από ασβεστολιθικά αδρανή έχουν μεγαλύτερο συντελεστή συγκριτικά με τα άλλα και για θερμοκρασίες που ξεπερνούν τους 850-900°C η θερμοδιαστολή λειτουργεί σαν μόνιμη παραμόρφωση. Επιπρόσθετα, ο συντελεστής θερμοδιαστολής είναι άμεσα συνδεδεμένος με τη θερμοκρασία διότι έως τους 300°C αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας και στη συνέχεια παρουσιάζει μείωση. Τέλος, όσο μεγαλύτερης ηλικίας σκυρόδεμα συναντάμε η θερμοδιαστολή μειώνεται.

- Ανθεκτικότητα:ως ανθεκτικότητα ή ανθεκτικότητα σε διάρκεια ή στο χρόνο εννοείται η ικανότητα που διαθέτει το σκυρόδεμα στις εξωτερικές επιρροές που δέχεται για μεγάλο χρονικό διάστημα και κατατάσσεται σε τρεις κατηγορίες: α) τις περιβαλλοντικές δράσεις (θερμοκρασιακές μεταβολές, υγρασία κ.λπ.), β) τις χημικές δράσεις (οφείλονται στη λειτουργία της κατασκευής) και γ) μόνιμες μηχανικές δράσεις (τριβή δαπέδων κ.λπ.). Δεχόμαστε, όμως, και την πυρκαγιά σαν ανθεκτικότητα παρόλο που δεν έχει διάρκεια και ορίζεται σαν μία ειδική περίπτωση.

## 2 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ ΚΑΙ ΠΟΙΕΣ ΕΙΝΑΙ

Το σκυρόδεμα διακρίνεται σε τρεις κατηγορίες, οι οποίες είναι οι ακόλουθες:

- Κατηγορίες αντοχής (strength classes)
- Κατηγορίες κάθισης (workability classes)
- Κατηγορίες ανθεκτικότητας (durability classes)

### 2.1 Κατηγορίες αντοχής (strength classes)

Η διάκριση στις κατηγορίες αυτές γίνεται με βάση την αντοχή του σκυροδέματος σε θλίψη. Εκφράζεται έτσι ώστε ο πρώτος αριθμός να αντιστοιχεί στην αντοχή του πρότυπου κυλινδρικού δοκιμίου (ύψους 30 cm και διαμέτρου 15 cm) ( $h/d = 30/15$ ) και ο δεύτερος του πρότυπου κυβικού δοκιμίου (πλευράς 15cm) ( $a_{χα} = 15 \times 15$ cm). Οι αριθμοί των συμβολισμών είναι εκφρασμένοι σε MPa ( $10^6$  N/m<sup>2</sup>). Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα 2 και το EN 206-1 οι κατηγορίες αντοχής είναι:

Κατηγορία Αντοχής	Αντοχή κυλίνδρου (f <sub>ck,κυλινδ.</sub> ) (MPa)	Αντοχή κύβου (f <sub>ck,κυβ.</sub> ) (MPa)
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55

C50/60	50	60
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C80/95	80	95
C90/105	90	105

*Πίνακας 1. Κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος*

## 2.2 Κατηγορίες κάθισης (workabilityclasses)

Κάθιση χαρακτηρίζεται ένα μέτρο εργασιμότητας του σκυροδέματος. Επιτυγχάνεται με το πείραμα ενός κώνου γεμάτο με σκυρόδεμα και πόσο έχει ελαττωθεί το ύψος αυτού του δείγματος όταν αφαιρεθεί η κωνική μήτρα. Η κάθιση εκφράζεται σε mm και οι κατηγορίες της είναι:

Κατηγορία Κάθισης	Κάθιση σε mm
S1	10-40
S2	50-90
S3	100-150
S4	160-210
S5	≥220

*Πίνακας 2. Κατηγορίες κάθισης σκυροδέματος*

## 2.3 Κατηγορίες ανθεκτικότητας (durabilityclasses)

Η ανθεκτικότητα εκφράζει την αντοχή του σκυροδέματος στη διάρκεια του χρόνου και πως αυτό συμπεριφέρεται στις επιδράσεις του εξωτερικού περιβάλλοντος και οι κατηγορίες είναι οι παρακάτω:

- α) Cementcontent (ελάχιστη περιεκτικότητα τσιμέντου)
- β) Water / Cementratio (λόγοςνερού προς τσιμέντο)
- γ) Compaction (συμπύκνωση / δόνηση σκυροδέματος)
- δ) Curing (συντήρηση σκυροδέματος)
- ε) Cover (πάχος της στρώσης της επικάλυψης του οπλισμού)

### **3 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΤΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ ΤΟΥ ΜΕΛΛΟΝΤΟΣ**

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, το πιο διαδεδομένο δομικό υλικό στις μέρες μας είναι το σκυρόδεμα. Υπήρξε ύψιστης σημασίας ήδη από το παρελθόν και είναι βέβαιο πως θα παραμείνει στην ίδια θέση και στο μέλλον. Η υπόθεση αυτή στηρίζεται στην άποψη ότι το σκυρόδεμα βρίσκεται σε πλεονεκτική θέση σε σχέση με άλλα δομικά υλικά, όπως ο χάλυβας και το ξύλο. Ωστόσο, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη και οι περιβαλλοντικοί παράγοντες κατά τη χρήση ενός υλικού, πράγμα που εκτιμάται να πραγματοποιηθεί στο μέλλον.

#### **3.1 Ζήτηση του σκυροδέματος στο μέλλον**

Τα τελευταία χρόνια η ζήτηση του σκυροδέματος αυξάνεται με ταχύτατους ρυθμούς κι αυτό οφείλεται στις μεγάλες απαιτήσεις μεγάλων τεχνικών έργων. Σύμφωνα με έρευνες, προβλέπεται η αύξηση αυτή να συνεχίσει να αναπτύσσεται αναλόγως.

Η ποσότητα σκυροδέματος που χρησιμοποιείται συνήθως υπό κανονικές συνθήκες περιλαμβάνει 12% τσιμέντο, 8% νερό και 8% αδρανή. Συνεπώς, ξοδεύονται περίπου 1,5 δισεκατομμύρια τόνοι τσιμέντου, 9 δισεκατομμύρια τόνοι πετρωμάτων και άμμου και 1 δισεκατομμύριο τόνους νερού ετησίως. Όπως έχουν δείξει σχετικές έρευνες πρόκειται η ζήτηση του τσιμέντου να αυξηθεί σε 18 δισεκατομμύρια τόνους (αύξηση 16,5 δισεκατομμύρια τόνοι) έως το 2050. Επομένως, η μεταφορά τέτοιων ποσοτήτων τσιμέντου και η εξόρυξη αυτών των αριθμών των αδρανών λειτουργούν αρνητικά τόσο ενεργειακά όσο και περιβαλλοντικά.

Πλέον, σε μεγάλα αστικά κέντρα, και όχι μόνο, στις περισσότερες χώρες του κόσμου κατασκευάζονται τεχνικά έργα τεράστιου μεγέθους και ταυτόχρονα βελτιώνονται τα ήδη υπάρχοντα. Κατοικίες και βιομηχανικά κτίρια, τεχνικά έργα μεταφοράς ανθρώπων και προϊόντων (αυτοκινητόδρομοι, σιδηρόδρομοι, αεροδρόμια, λιμάνια γέφυρες) και κατασκευή σωλήνων για ύδρευση και αποχέτευση απαιτούν πολλούς τόνους σκυροδέματος και έτσι αυξάνεται όλο περισσότερο η ζήτηση του τόσο κατασκευαστικά όσο και οικονομικά έναντι του χάλυβα.

### 3.2 Πλεονεκτήματα της χρήσης σκυροδέματος συγκριτικά με τον χάλυβα

Ο χάλυβας ανταγωνίζεται εξαιρετικά το σκυρόδεμα, λόγω του πολύ αυξημένου κόστους που διαθέτει το ξύλο και της μεγάλης ποσότητας δομικών υλικών που απαιτούνται στην κατασκευή τεχνικών έργων. Όπως, όμως, φαίνεται το σκυρόδεμα θα βρίσκεται στην πρώτη επιλογή των υλικών σε σχέση με τον χάλυβα επειδή θα επιβάλλεται με γνώμονα κάποιες περιβαλλοντικές και τεχνικές παραμέτρους.

- Έλεγχος των βελών κάμψης: Αποδεδειγμένα, οι βυθισμένες δοκοί προεντεταμένου σκυροδέματος είναι το 35% των χαλύβδινων δοκών ίδιων διαστάσεων. Επίσης, η προένταση μπορεί να δώσει θετικό βέλος κάμψης (ανοδική παραμόρφωση) λόγω του ίδιου βάρους και σχετικά με το συνολικό ωφέλιμο φορτίο το βέλος κάμψης να είναι μηδενικό.
- Αντοχή σε έκρηξη: η αντοχή σε έκρηξη των δοκών σκυροδέματος είναι μεγαλύτερη από την αντοχή των χαλύβδινων δοκών επειδή οι τένοντες που χρησιμοποιούνται για την προένταση του σκυροδέματος έχουν υψηλό μέτρο ελαστικότητας.
- Αντοχή σε πολύ χαμηλές θερμοκρασίες: οι χαλύβδινες κατασκευές δεν κατανέμουν σωστά τις τάσεις που αναπτύσσονται λόγω χαμηλών θερμοκρασιών ενώ οι πλάκες σκυροδέματος, με την κατάλληλη προένταση και τη βοήθεια του χάλυβα είναι ικανές να παραλάβουν όλες τις διατμητικές τάσεις των ψυχρών θερμοκρασιών.

### 3.3 Περιβαλλοντική θεώρηση

Το πιο φιλικό προς το περιβάλλον δομικό υλικό είναι το σκυρόδεμα που παρασκευάζεται με τσιμέντο Portland. Παρόλα αυτά, η βιομηχανία του σκυροδέματος είναι υπεύθυνη για τις εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και πρέπει να γίνουν πολλές ενέργειες ώστε να πάψουν αυτές οι επιπτώσεις που προκαλούνται στο περιβάλλον.

Βιομηχανική οικολογία σημαίνει ότι όσα απόβλητα δημιουργεί μια βιομηχανία είναι απαραίτητο να ανακυκλώνονται και να χρησιμοποιούνται σε κάποια άλλη βιομηχανία λειτουργώντας έτσι υπέρ και των δύο αλλά και του περιβάλλοντος.

Ετησίως, απόβλητα που προέρχονται από κατασκευαστικές ενέργειες απορρίπτονται στις βάσεις οδών παρόλο που έχει αναπτυχθεί η κατάλληλη τεχνολογία για την ανακύκλωση αποβλήτων χρησιμοποιώντας τα ως χονδρόκοκκα υλικά στα μίγματα σκυροδέματος. Επιπλέον, το πόσιμο νερό που συλλέγεται για την παρασκευή των μιγμάτων αυτών μπορεί να δώσει τη θέση του σε μη πόσιμο νερό, εφόσον αποδειχθεί ότι δεν επηρεάζει τις ιδιότητες του μίγματος.

Μία από τις πρακτικότερες λύσεις που μπορούν να εφαρμοστούν για την μείωση της εκπομπής διοξειδίου του άνθρακα που οφείλονται στις βιομηχανίες σκυροδέματος είναι να ελαχιστοποιηθεί ο συντελεστής κλίνκερ του τελικού προϊόντος αυξάνοντας στο μέγιστο το ποσοστό των ορυκτών πρόσμικτων καθώς και την εκτεταμένη χρήση των blendedτσιμέντων. Λαμβάνοντας υπόψη τεχνικά και οικονομικά κριτήρια, από τα ορυκτά πρόσμικτα προτιμάται η ιπτάμενη τέφρα γιατί μειώνει σημαντικά το διοξείδιο του άνθρακα που εξέρχεται στην ατμόσφαιρα.

### **3.4 Βιωσιμότητα και ανθεκτικότητα σκυροδέματος**

Δυστυχώς, η βιομηχανική οικολογία είναι ένα σχέδιο που μπορεί να εφαρμοστεί μόνο στο κοντινό μέλλον. Για μακροπρόθεσμα σχέδια αειφόρου ανάπτυξης κρίνεται σκόπιμο να βελτιωθεί η αποδοτικότητα των πρώτων υλών.

Το κύριο αίτιο που προκαλεί τη φθορά του σκυροδέματος είναι η διάβρωση του οπλισμού και σε δεύτερη μοίρα έρχεται η περίπτωση που πραγματοποιείται αντίδραση αλκαλίων - αδρανών ή εναλλακτικά διόγκωση λόγω θεικών.

Βασικό ερώτημα αποτελεί το ότι γιατί οι κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος εμφανίζουν ρωγμές και φθείρονται πριν το χρονικό διάστημα που έχει, αρχικά, υπολογισθεί. Τα σημερινά τσιμέντα Portland που χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο είναι φτιαγμένα έτσι ώστε να αναλαμβάνουν πρώιμες αντοχές και έτσι ρηγματώνονται εύκολα. Ο τρόπος με τον οποίο συνδέονται μεταξύ τους οι εσωτερικές με τις εξωτερικές ρωγμές, τις μικρορωγμές και τα κενά δίνουν τη δυνατότητα στο νερό και στα επιβλαβή ιόντα να επηρεάσουν την ανθεκτικότητα.



Τα σημερινά σκυροδέματα, που παράγονται από τσιμέντο Portland, είναι ικανά να παραλάβουν πρώιμες αντοχές. Όμως, σε αυτόν τον τύπο τσιμέντου αναπτύσσεται θερμική συστολή σε μεγάλο βαθμό, αυτογενή συστολή και συστολή ξήρανσης. Αποτέλεσμα είναι να ρηγματώνεται και το νερό να διαπερνά νωρίτερα σε σχέση με τα τσιμέντα που χρησιμοποιούνταν παλαιότερα. Το σκυρόδεμα ΗVFA προσφέρει ασφάλεια και ανθεκτικότητα του υλικού σε διαβρωτικό περιβάλλον και τη δυνατότητα να διατηρήσει τις ιδιότητες του και είναι ένα προϊόν χωρίς ρηγματώσεις.

## **ΜΕΡΟΣ Β: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ**

# 1 ΠΕΙΡΑΜΑ 1ο: ΔΟΚΙΜΗ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΚΑΘΙΖΗΣΗΣ ΚΑΙ ΩΡΙΜΑΝΣΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

## 1.1 Σκοπός

Σκοπός του συγκεκριμένου πειράματος είναι να υπολογιστούν οι ποσότητες υλικών που απαιτούνται για να παρασκευαστεί σκυρόδεμα για να καλυφθούν δύο κόλουροι κώνοι, δύο κύβοι και δύο κύλινδροι καθώς και η ποσότητα ρευστοποιητή που πρέπει να προστεθεί στο τελικό μίγμα έτσι ώστε η εργασιμότητα του σκυροδέματος να πέσει μια κατηγορία. Επίσης, σκοπός είναι να βρεθεί η αντοχή των 28 ημερών κατά Saul και να εκτιμηθεί ο χρόνος που απαιτείται για το ξεκαλούπωμα σύμφωνα με τις θερμοκρασίες και την αντοχή που απαιτούνται.

## 1.2 Εξοπλισμός

- Δύο κόλουροι κώνοι, ύψους 300mm, διαμέτρου βάσης 200 mm και διαμέτρου κορυφής 100mm,
- Δύο κύβοι πλευράς 150mm
- Δύο κύλινδροι, ύψους 300mm και ακτίνας 75 mm
- Μια μεταλλική ράβδος κυκλικής διατομής, διαμέτρου 16 mm και μήκους 600 mm με στρογγυλεμένα άκρα
- Μια οριζόντια, μη απορροφητική επιφάνεια
- Άμμος
- Γαρμπίλι
- Χαλίκι
- Τσιμέντο C20/25, C25/30, C35/45
- Νερό

### 1.3 Διαδικασία πειράματος

Αρχικά, λαμβάνονται τα απαραίτητα υλικά που χρειάζονται για το πείραμα και υπολογίζονται οι ποσότητες άμμου, γαρμπιλίου, χαλικιού, τσιμέντου και νερού που χρειάζονται για την πλήρωση δύο κόλourων κώνων, δύο κύβων και δύο κυλίνδρων, οι υπολογισμοί των οποίων φαίνονται παρακάτω.

Αφού υπολογιστούν τα απαιτούμενα υλικά ξεκινά η διαδικασία παρασκευής του σκυροδέματος και για τους τρεις τύπους τσιμέντου που έχουν επιλεγεί. Όταν το μίγμα είναι έτοιμο ο ένας κώνος γεμίζεται με αυτό για να πραγματοποιηθεί η δοκιμή της καθίζησης.

Σχηματίζονται τρεις στρώσεις υλικού ίσου πάχους οι οποίες συμπυκνώνονται με τη ράβδο με 25 χτυπήματα σε όλη την επιφάνεια του. Στην πρώτη στρώση, η ράβδος πρέπει να τοποθετείται ελαφρώς διαγώνια και να γίνεται κατακόρυφη στη συνέχεια. Για να γίνει σωστά το πείραμα πρέπει οι μισοί χτύποι της ράβδου να γίνονται περιμετρικά. Στις άλλες δύο στρώσεις η ράβδος πρέπει να εισέρχεται σε όλο το βάθος τους. Η τελευταία στρώση συμπληρώνεται με παραπάνω υλικό και είναι σκόπιμο, κάθε φορά που χρειάζεται, να προστίθεται ώστε να βρίσκεται πάντα σε περίσσεια.

Μετά τους 25 χτύπους της ράβδου το πλεονάζον υλικό απορρίπτεται και ο κώνος αφαιρείται κατακόρυφα μέσα σε 5 - 10 sec. Δίνεται προσοχή στον χρόνο εκτέλεσης του πειράματος διότι δεν πρέπει από την αρχή έως τη λήξη του να ξεπερνά τα 2,5 min.

Στη συνέχεια, αφού ολοκληρωθεί η διαδικασία της καθίζησης για την πλήρωση ενός κύβου και ενός κυλίνδρου, υπολογίζεται η ποσότητα ρευστοποιητή που πρέπει να προστεθεί ώστε η εργασιμότητα του σκυροδέματος να πέσει μια κατηγορία.

Τέλος, καταγράφονται οι ποσοτικές αντοχές σκυροδέματος που είναι αναγκαίες για το ξεκαλούπωμα και οι μέσες θερμοκρασίες ώστε να υπολογιστεί η αντοχή στις 28 ημέρες, κατά Saul και πόσος χρόνος θα περάσει για την ολοκλήρωση του ξεκαλουπώματος, σύμφωνα με την απαιτούμενη αντοχή και τις μέσες θερμοκρασίες.

## 1.4 Εκτέλεση Πειράματος

Κατηγορία Σκυροδέματος	Καθίζηση	Άμμος	Γαρμπίλι	Χαλίκι	Τσιμέντο	Νερό
C20/25	S2	1025	180	680	300	185
C25/30	S2	975	180	685	340	190
C35/45	S2	925	180	690	380	195

*Πίνακας 3: Κιλά που απαιτούνται για την παρασκευή ποσότητας σκυροδέματος που ισοδυναμούν με όγκο δύο κόλουρων κώνων, δύο κύβων και δύο κυλίνδρων.*

ΓΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ C20/25

- Κιλά που απαιτούνται για όγκο δύο κόλουρων κώνων:

$$V_{\text{κόλουρου κώνου}}: 0.3 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} = 0.006 \text{ m}^3$$

Άρα:

$$\text{Άμμος: } 0.006 \times 1025 = 6.15 \text{ kg} \rightarrow \text{Άμμος σύνολο: } 12.30 \text{ kg}$$

$$\text{Γαρμπίλι: } 0.006 \times 180 = 1.08 \text{ kg} \rightarrow \text{Γαρμπίλι σύνολο: } 2.16 \text{ kg}$$

$$\text{Χαλίκι: } 0.006 \times 680 = 4.08 \text{ kg} \rightarrow \text{Χαλίκι σύνολο: } 8.16 \text{ kg}$$

$$\text{Τσιμέντο: } 0.006 \times 300 = 1.80 \text{ kg} \rightarrow \text{Τσιμέντο σύνολο: } 3.60 \text{ kg}$$

$$\text{Νερό: } 0.006 \times 185 = 1.11 \text{ kg} \rightarrow \text{Νερό σύνολο: } 2.22 \text{ kg}$$

- Κιλά που απαιτούνται για όγκο δύο κύβων:

$$V_{\text{κύβου}}: 0.15 \text{ m} \times 0.15 \text{ m} \times 0.15 \text{ m} = 0.0034 \text{ m}^3$$

Άρα:

$$\text{Άμμος: } 0.0034 \times 1025 = 3.49 \text{ kg} \rightarrow \text{Άμμος σύνολο: } 6.98 \text{ kg}$$

$$\text{Γαρμπίλι: } 0.0034 \times 180 = 0.61 \text{ kg} \rightarrow \text{Γαρμπίλι σύνολο: } 1.22 \text{ kg}$$

Χαλίκι:  $0.0034 \times 680 = 2.31 \text{kg}$  → Χαλίκι σύνολο: 4.62kg

Τσιμέντο:  $0.0034 \times 300 = 1.02 \text{kg}$  → Τσιμέντο σύνολο: 2.04kg

Νερό:  $0.0034 \times 185 = 0.63 \text{kg}$  → Νερό σύνολο: 1.26kg

- Κιλά που απαιτούνται για όγκο δύο κυλίνδρων:

$V_{\text{κυλίνδρου}} : \pi \times (0.075 \text{ m})^2 \times 0.3 \text{ m} = 0.0053 \text{ m}^3$

Άμμος:  $0.0053 \times 1025 = 5.43 \text{kg}$  → Άμμος σύνολο: 10.86kg

Γαρμπίλι:  $0.0053 \times 180 = 0.95 \text{kg}$  → Γαρμπίλι σύνολο: 1.90kg

Χαλίκι:  $0.0053 \times 680 = 3.60 \text{kg}$  → Χαλίκι σύνολο: 7.20kg

Τσιμέντο:  $0.0053 \times 300 = 1.59 \text{kg}$  → Τσιμέντο σύνολο: 3.18kg

Νερό:  $0.0053 \times 185 = 0.98 \text{kg}$  → Νερό σύνολο: 1.96kg

ΓΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ C25/30

- Κιλά που απαιτούνται για όγκο δύο κόλπουρων κώνων:

$V_{\text{κόλπουρου κώνου}} : 0.3 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} = 0.006 \text{ m}^3$

Άρα:

Άμμος:  $0.006 \times 975 = 5.85 \text{kg}$  → Άμμος σύνολο: 11.70kg

Γαρμπίλι:  $0.006 \times 180 = 1.08 \text{ kg}$  → Γαρμπίλι σύνολο: 2.16 kg

Χαλίκι:  $0.006 \times 685 = 4.11 \text{kg}$  → Χαλίκι σύνολο: 8.22kg

Τσιμέντο:  $0.006 \times 340 = 2.04 \text{kg}$  → Τσιμέντο σύνολο: 4.08kg

Νερό:  $0.006 \times 185 = 1.11 \text{kg}$  → Νερό σύνολο: 2.28kg

- Κιλά που απαιτούνται για όγκο δύο κύβων:

$V_{\text{κύβου}} : 0.15 \text{ m} \times 0.15 \text{ m} \times 0.15 \text{ m} = 0.0034 \text{ m}^3$

Άρα:

Άμμος:  $0.0034 \times 975 = 3.32\text{kg}$  → Άμμος σύνολο: 6.64kg

Γαρμπίλι:  $0.0034 \times 180 = 0.61\text{kg}$  → Γαρμπίλι σύνολο: 1.22kg

Χαλίκι:  $0.0034 \times 685 = 2.33\text{kg}$  → Χαλίκι σύνολο: 4.66kg

Τσιμέντο:  $0.0034 \times 340 = 1.16\text{kg}$  → Τσιμέντο σύνολο: 2.32kg

Νερό:  $0.0034 \times 190 = 0.65\text{kg}$  → Νερό σύνολο: 1.30kg

- Κιλά που απαιτούνται για όγκο δύο κυλίνδρων:

$V_{\text{κυλίνδρου}} : \pi \times (0.075 \text{ m})^2 \times 0.3 \text{ m} = 0.0053 \text{ m}^3$

Άμμος:  $0.0053 \times 975 = 5.17\text{kg}$  → Άμμος σύνολο: 10.37kg

Γαρμπίλι:  $0.0053 \times 180 = 0.95\text{kg}$  → Γαρμπίλι σύνολο: 1.90kg

Χαλίκι:  $0.0053 \times 685 = 3.63\text{kg}$  → Χαλίκι σύνολο: 7.26kg

Τσιμέντο:  $0.0053 \times 340 = 1.80\text{kg}$  → Τσιμέντο σύνολο: 3.60kg

Νερό:  $0.0053 \times 190 = 1.01\text{kg}$  → Νερό σύνολο: 2.02kg

ΓΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ C35/45

- Κιλά που απαιτούνται για όγκο δύο κόλουρων κώνων:

$V_{\text{κόλουρου κώνου}} : 0.3 \text{ m} \times 0.2 \text{ m} \times 0.1 \text{ m} = 0.006 \text{ m}^3$

Άρα:

Άμμος:  $0.006 \times 925 = 5.55\text{kg}$  → Άμμος σύνολο: 11.10kg

Γαρμπίλι:  $0.006 \times 180 = 1.08 \text{ kg}$  → Γαρμπίλι σύνολο: 2.16 kg

Χαλίκι:  $0.006 \times 690 = 4.14\text{kg}$  → Χαλίκι σύνολο: 8.28kg

Τσιμέντο:  $0.006 \times 380 = 2.28\text{kg}$  → Τσιμέντο σύνολο: 4.56kg

Νερό:  $0.006 \times 195 = 1.17\text{kg}$  → Νερό σύνολο: 2.34kg

- Κιλά που απαιτούνται για όγκο δύο κύβων:

$$V_{\text{κύβου}} : 0.15\text{m} \times 0.15\text{m} \times 0.15\text{m} = 0.0034\text{m}^3$$

Άρα:

$$\text{Άμμος: } 0.0034 \times 925 = 3.15\text{kg} \rightarrow \text{Άμμος σύνολο: } 6.30\text{kg}$$

$$\text{Γαρμπίλι: } 0.0034 \times 180 = 0.61\text{kg} \rightarrow \text{Γαρμπίλι σύνολο: } 1.22\text{kg}$$

$$\text{Χαλίκι: } 0.0034 \times 690 = 2.35\text{kg} \rightarrow \text{Χαλίκι σύνολο: } 4.70\text{kg}$$

$$\text{Τσιμέντο: } 0.0034 \times 380 = 1.29\text{kg} \rightarrow \text{Τσιμέντο σύνολο: } 2.58\text{kg}$$

$$\text{Νερό: } 0.0034 \times 195 = 0.66\text{kg} \rightarrow \text{Νερό σύνολο: } 1.32\text{kg}$$

- Κιλά που απαιτούνται για όγκο δύο κυλίνδρων:

$$V_{\text{κυλίνδρου}} : \pi \times (0.075 \text{ m})^2 \times 0.3 \text{ m} = 0.0053 \text{ m}^3$$

$$\text{Άμμος: } 0.0053 \times 925 = 4.90\text{kg} \rightarrow \text{Άμμος σύνολο: } 9.80\text{kg}$$

$$\text{Γαρμπίλι: } 0.0053 \times 180 = 0.95\text{kg} \rightarrow \text{Γαρμπίλι σύνολο: } 1.90\text{kg}$$

$$\text{Χαλίκι: } 0.0053 \times 690 = 3.66\text{kg} \rightarrow \text{Χαλίκι σύνολο: } 7.32\text{kg}$$

$$\text{Τσιμέντο: } 0.0053 \times 340 = 2.01\text{kg} \rightarrow \text{Τσιμέντο σύνολο: } 4.02\text{kg}$$

$$\text{Νερό: } 0.0053 \times 195 = 1.03\text{kg} \rightarrow \text{Νερό σύνολο: } 2.06\text{kg}$$

- Απαιτούμενη ποσότητα ρευστοποιητή για την πλήρωση ενός κόλουρου κώνου:

$$M_{\text{ρευστοποιητη}} : 0.006 \times 300 \times 0.8 = 1.44 \text{ kg} \text{ ώστε να πέσει από την κατηγορία S2 στην κατηγορία S3.}$$

- Απαιτούμενη ποσότητα ρευστοποιητή για την πλήρωση ενός κύβου:

$$M_{\text{ρευστοποιητη}} : 0.0034 \times 300 \times 0.8 = 0.82 \text{ kg} \text{ ώστε να πέσει από την κατηγορία S2 στην κατηγορία S3.}$$

- Απαιτούμενη ποσότητα ρευστοποιητή για την πλήρωση ενός κυλίνδρου:



$M_{\text{ρευστοποιητη}}: 0.0053 \times 300 \times 0.8 = 1.27 \text{ kg}$  ώστε να πέσει από την κατηγορία S2 στην κατηγορία S3.

Απαίτηση %	1η Εβδομάδα	2η Εβδομάδα	3η Εβδομάδα	4η Εβδομάδα
70	10	23	17	8
73	12	17	18	13
76	14	11	19	18

*Πίνακας 4. Απαιτούμενες ποσοτικές αντοχές σκυροδέματος για ξεκαλούπωμα και μέσες θερμοκρασίες σε °C*

ΓΙΑ ΑΠΑΙΤΗΣΗ 70%

Από το διάγραμμα μεταβολής συντελεστή ωρίμανσης, R συναρτήσει ποσοστού αντοχής, με βάση το ποσοστό αντοχής 70% βρίσκεται ο συντελεστής  $R(28) = 250$ .

Βάσει του μαθηματικού συντελεστή ωρίμανσης R(28):

$$R(28) = (10 + 10) \times 7 + (23 + 10) \times 7 + (17 + 10) \times 7 + (8 + 10) \times 7 = 686$$

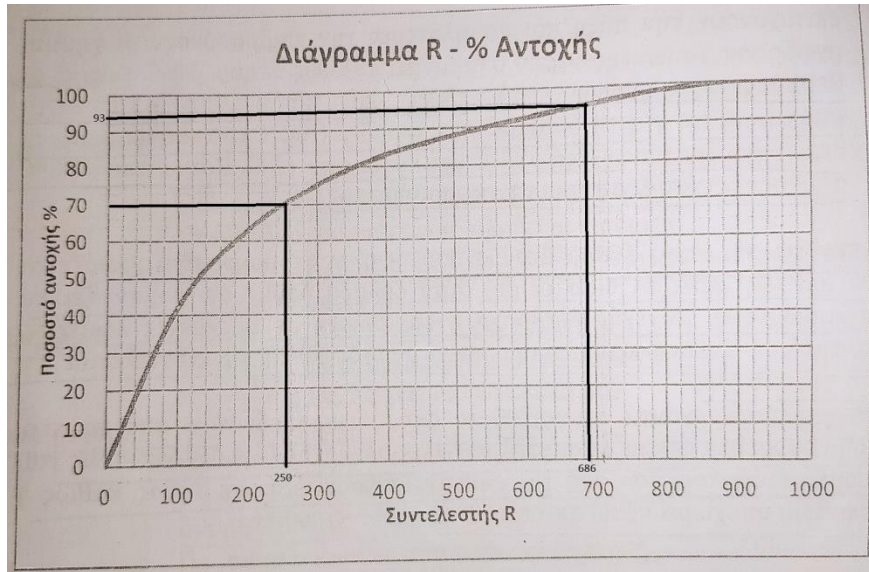
Από το διάγραμμα, με βάση τον συντελεστή  $R(28) = 686$  βρίσκουμε το  $f_{\text{expect}} = 93 \%$

Διερεύνηση του τύπου:  $R(28) = (10 + 10) \times 7 + (23 + 10) \times t_{\text{require}} \rightarrow$

$$250 = 140 + 33t_{\text{require}} \rightarrow$$

$$t_{\text{require}} = \frac{250 - 140}{33} = 3.33 \text{ ημέρες}$$

Άρα το ξεκαλούπωμα θα εκτελεστεί συνολικά σε  $7 + 3 = 10$  ημέρες.



Εικόνα 9. Ενδεικτική καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων σκυροδέματος (Βιβλίο: Τεχνολογία του Σκυροδέματος – ΧΡΗΣΤΟΥ Μ. ΟΙΚΟΝΟΜΟΥ – Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ – 4Μ’ΕΠΕ – ΤεκΔΟΤΙΚΗ)

ΓΙΑ ΑΠΑΙΤΗΣΗ 73%

Από το διάγραμμα μεταβολής συντελεστή ωρίμανσης, R συναρτήσει ποσοστού αντοχής, με βάση το ποσοστό αντοχής 73% βρίσκεται ο συντελεστής  $R(28) = 280$ .

Βάσει του μαθηματικού συντελεστή ωρίμανσης  $R(28)$ :

$$R(28) = (12 + 10) \times 7 + (17 + 10) \times 7 + (18 + 10) \times 7 + (13 + 10) \times 7 = 700$$

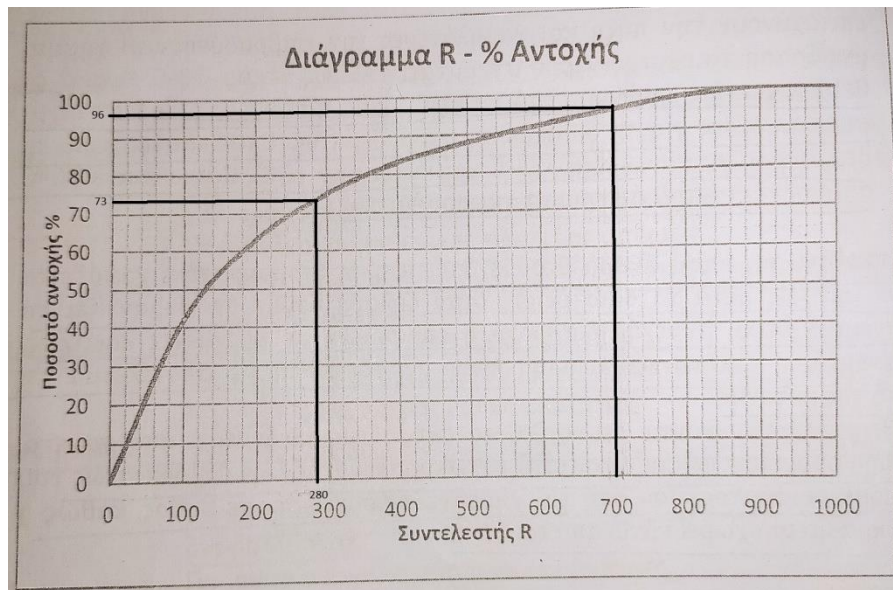
Από το διάγραμμα, με βάση τον συντελεστή  $R(28) = 700$  βρίσκουμε το  $f_{\text{expect}} = 96\%$

Διερεύνηση του τύπου:  $R(28) = (12 + 10) \times 7 + (17 + 10) \times t_{\text{require}} \rightarrow$

$$280 = 154 + 27 \times t_{\text{require}} \rightarrow$$

$$t_{\text{require}} = \frac{280 - 154}{27} = 4.67 \text{ ημέρες}$$

Άρα το ξεκαλούπωμα θα εκτελεστεί συνολικά σε  $7 + 4 = 11$  ημέρες.



Εικόνα 10. Διάγραμμα μεταβολής συντελεστή ωρίμανσης, συναρτήσει του ποσοστού αντοχής 73 %.

ΓΙΑ ΑΠΑΙΤΗΣΗ 76 %

Από το διάγραμμα μεταβολής συντελεστή ωρίμανσης, R συναρτήσει ποσοστού αντοχής, με βάση το ποσοστό αντοχής 76% βρίσκεται ο συντελεστής  $R(28) = 300$ .

Βάσει του μαθηματικού συντελεστή ωρίμανσης  $R(28)$ :

$$R(28) = (14 + 10) \times 7 + (11 + 10) \times 7 + (19 + 10) \times 7 + (18 + 10) \times 7 = 714$$

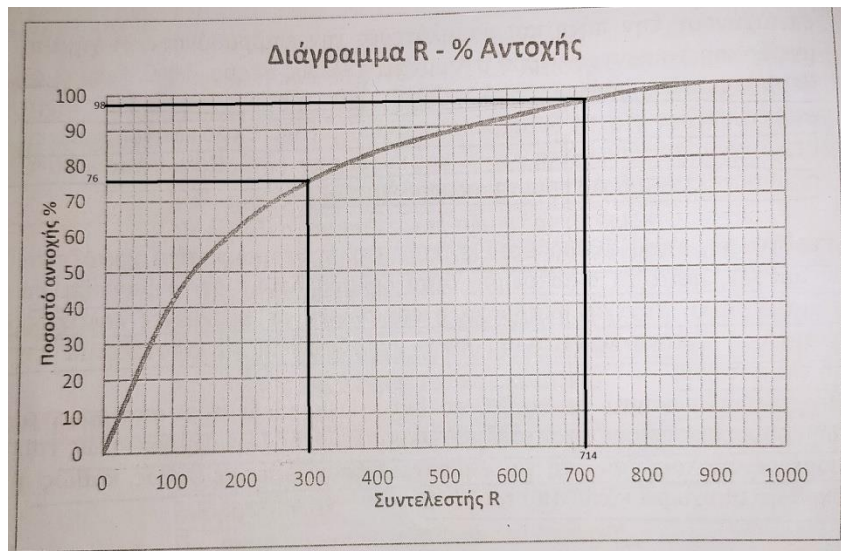
Από το διάγραμμα, με βάση τον συντελεστή  $R(28) = 714$  βρίσκουμε το  $f_{\text{expect}} = 98 \%$

Διερεύνηση του τύπου:  $R(28) = (14 + 10) \times 7 + (11 + 10) \times t_{\text{require}} \rightarrow$

$$300 = 168 + 21 \times t_{\text{require}} \rightarrow$$

$$t_{\text{require}} = \frac{300 - 168}{21} = 6.29 \text{ ημέρες}$$

Άρα το ξεκαλούπωμα θα εκτελεστεί συνολικά σε  $7 + 6 = 13$  ημέρες.



Εικόνα 11. Διάγραμμα μεταβολής συντελεστή ωρίμανσης, συναρτήσει του ποσοστού αντοχής 76 %.

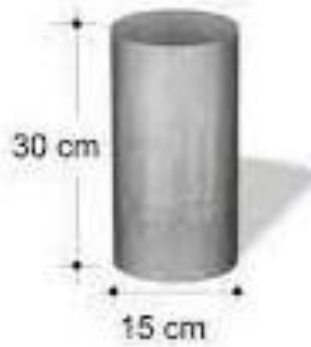
## 1.5 Εικόνες



Εικόνα 12. Κόλουρος Κώνος



*Εικόνα 13. Κύβος*



*Εικόνα 14. Κύλινδρος*

## 1.6 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τους τρεις τύπους σκυροδέματος

	<b>C20/25</b>	<b>C25/30</b>	<b>C35/45</b>
<b>Kg άμμου για δύο κόλourους κώνους</b>	12.30	11.70	11.10
<b>Kg γαρμπιλίου για δύο κόλourους κώνους</b>	2.16	2.16	2.16
<b>Kg χαλικιών για δύο κόλourους κώνους</b>	8.16	8.22	8.28
<b>Kg τσιμέντου για δύο κόλourους κώνους</b>	3.60	4.08	4.56
<b>Kg νερού για δύο κόλourους κώνους</b>	2.22	2.28	2.34
<b>Kg άμμου για δύο κύβους</b>	6.98	6.64	6.30
<b>Kg γαρμπιλίου για δύο κύβους</b>	1.22	1.22	1.22
<b>Kg χαλικιών για δύο κύβους</b>	4.62	4.66	4.70
<b>Kg τσιμέντου για δύο κύβους</b>	2.04	2.32	2.58
<b>Kg νερού για δύο</b>	1.26	1.30	1.32

<b>κύβους</b>			
<b>Kg άμμου για δύο κυλίνρους</b>	10.86	10.37	9.80
<b>Kg γαρμπιλιού για δύο κυλίνρους</b>	1.90	1.90	1.90
<b>Kg χαλικιών για δύο κυλίνρους</b>	7.20	7.26	7.32
<b>Kg τσιμέντου για δύο κυλίνρους</b>	3.18	3.60	4.02
<b>Kg νερού για δύο κυλίνρους</b>	1.96	2.02	2.06
<b>Ημέρες ξεκαλουπώματος</b>	10	11	13

*Πίνακας 5. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τους τρεις τύπους σκυροδέματος*

## **2 ΠΕΙΡΑΜΑ 2ο: ΔΟΚΙΜΗ ΑΜΕΣΟΥ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

### **2.1 Σκοπός**

Σκοπός του πειράματος αυτού είναι να ελεγχθεί η θλιπτική αντοχή και μέσω αυτής η κατηγορία της παρτίδας του σκυροδέματος που έχει χρησιμοποιηθεί. Αυτό επιτυγχάνεται είτε με τη βοήθεια κυβικών δοκιμίων, τα οποία αφού ωριμάσουν τοποθετούνται στη μηχανή θραύσης, είτε με πυρηνοληψία από ήδη υπάρχουσα κατασκευή. Για να γίνει αυτό έχουν δοθεί από τον ΚΤΣ 2016 ορισμένα κριτήρια ανάλογα με τον αριθμό των δοκιμίων και με το αν το σκυρόδεμα είναι εργοταξιακό ή εργοστασιακό.

### **2.2 Εξοπλισμός**

- Κυβικά Δοκίμια
- Κυλινδρικά Δοκίμια
- Σκυρόδεμα C20/25, C25/30, C35/45
- Καροτιέρα
- Μηχανή θραύσης

### **2.3 Διαδικασία πειράματος**

#### Έλεγχος σκυροδέματος για αντοχή σε θλίψη

Αρχικά, για να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος του σκυροδέματος είναι απαραίτητο να έχει χρησιμοποιηθεί ο ίδιος τύπος σκυροδέματος σε ολόκληρο το έργο. Στην περίπτωση που έχουν χρησιμοποιηθεί δύο ή περισσότεροι τύποι σκυροδέματος πρέπει να γίνει έλεγχος για κάθε τύπο ξεχωριστά.

#### Δειγματοληψία



Ο έλεγχος πραγματοποιείται σε κυβικά δοκίμια ακμής 150 mmή σε κυλινδρικά διαμέτρου 150 mmκαι ύψους 300mm τα οποία συλλέγονται στη θέση διάστρωσης, αν πρόκειται για εργοταξιακό σκυρόδεμα, ή στην θέση παράδοσης, αν αφορά εργοστασιακό σκυρόδεμα.

Σκόπιμο είναι ο παραγωγός να ενημερώσει σχετικά με τις διαστάσεις των δοκιμίων που χρησιμοποίησε κατά τους ελέγχους ώστε να γίνει ο έλεγχος με τις ίδιες προϋποθέσεις. Τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται στον έλεγχο τοποθετούνται στη μηχανή θραύσης μετά από 28 ημέρες, εκτός κι αν έχει συμφωνηθεί κάτι διαφορετικό για τις απαιτήσεις του έργου για ειδικούς λόγους.

Η κάθε λήψη καθώς και η ώρα λήψης πρέπει να καταγράφονται από τον παραγωγό στο δελτίο αποστολής και στο έντυπο παράδοσης, το οποίο υπογράφει ο μηχανικός.

Κατά τη διαδικασία του ελέγχου έχουν το δικαίωμα να είναι παρόντες όλοι οι ενδιαφερόμενοι.

#### Εργοστασιακό σκυρόδεμα με πιστοποίηση ελέγχου παραγωγής

Ως παρτίδα σκυροδέματος ορίζεται το σκυρόδεμα που διαστρώνεται σε μια ημέρα. Η αντοχή του σε θλίψη προκύπτει από τον μέσο όρο των δειγμάτων που αναφέρονται στον παρακάτω πίνακα.

Τα δοκίμια που πρέπει να ελεγχθούν είναι ανάλογα του μεγέθους της παρτίδας και, επίσης, αναφέρονται στον πίνακα παρακάτω.

<b>Μέγεθος Παρτίδας</b>	<b>Ελάχιστο πλήθος δειγμάτων "n"</b>
Παρτίδα μέχρι 2 φορτία	2
Παρτίδα μεταξύ δύο φορτίων και 50 m <sup>3</sup>	3
Παρτίδα μεταξύ 50m <sup>3</sup> και 300 m <sup>3</sup>	6
>300m <sup>3</sup> : η ποσότητα που υπερβαίνει τα 300 m <sup>3</sup> θα χωρίζεται σε παρτίδες των 50m <sup>3</sup> περίπου	3

Πίνακας 6. Ελάχιστο πλήθος δειγμάτων που λαμβάνεται ανά παρτίδα (Πηγή: Εργαστηριακές Ασκήσεις Οπλισμένου Σκυροδέματος - Κωνσταντίνος Δημάκος)

Από ένα φορτίο λαμβάνεται μόνο ένα δείγμα για τον έλεγχο. Στην περίπτωση που η σκυροδέτηση γίνεται μόνο με ένα φορτίο, δίνεται η δυνατότητα λήψης και δύο δειγμάτων αλλά το κάθε δείγμα λαμβάνεται μετά την εκφόρτωση 1 m<sup>3</sup> σκυροδέματος και αφού έχει ληφθεί το προηγούμενο δείγμα.

Οι θλιπτικές αντοχές στις 28 ημέρες είναι απαραίτητο να επαληθεύουν τα κριτήρια 1 και 2 του πίνακα 6

Αν δεν ικανοποιείται το κριτήριο 2 από ένα μόνο δείγμα τότε αμφισβητείται η αντοχή του φορτίου σκυροδέματος και ακολουθεί επανέλεγχος.

Αν ένα από τα δύο κριτήρια δεν ικανοποιούνται τότε έχουμε αμφισβήτηση παρτίδας και η διαδικασία επαναλαμβάνεται από την αρχή.

Πλήθος δειγμάτων "n" από τον συγκεκριμένο όγκο σκυροδέματος	Κριτήριο 1	Κριτήριο 2
	Μέση τιμή αντοχής σε θλίψη "n" δειγμάτων ( $f_n$ ) σε MPa	Αντοχή σε θλίψη κάθε δείγματος ( $f_i$ ) σε MPa
2 - 3	$f_n \geq f_{ck} + 2$	$f_i \geq f_{ck} - 2,5$
6	$f_n \geq f_{ck} + 3,5$	$f_i \geq f_{ck} - 2,5$

Πίνακας 7. Κριτήρια συμμόρφωσης εξωτερικού ελέγχου (ταυτοποίησης) για θλιπτική αντοχή για το εργοστασιακό σκυρόδεμα με πιστοποίηση ελέγχου παραγωγής (Πηγή: Εργαστηριακές Ασκήσεις Οπλισμένου Σκυροδέματος - Κωνσταντίνος Δημάκος)

#### Εργοστασιακό σκυρόδεμα χωρίς πιστοποίηση ελέγχου παραγωγής

Λαμβάνονται 6 δοκίμια από ισάριθμα δείγματα μιας παρτίδας. Αν η παρτίδα ξεπερνά τα 150 m<sup>3</sup>, τότε χωρίζεται σε ίσα μέρη που να μην ξεπερνούν τα 150 m<sup>3</sup> και για κάθε παρτίδα πραγματοποιείται μια διαφορετική δειγματοληψία 6 δοκιμίων.

Για να πραγματοποιηθεί ο έλεγχος συλλέγεται μόνο ένα δείγμα από το φορτίο και καταγράφονται λήψη και η ώρα λήψης του. Περισσότερα δείγματα επιτρέπονται μόνο αν η σκυροδέτηση έχει γίνει με λιγότερα από 6 δοκίμια.

Για τον έλεγχο της αντοχής πρέπει ισχύουν τα παρακάτω κριτήρια 3 και 4:

Πλήθος δειγμάτων "n" από τον συγκεκριμένο όγκο σκυροδέματος	Κριτήριο 3	Κριτήριο 4
	Μέση τιμή αντοχής σε θλίψη 6 δειγμάτων ( $f_6$ ) σε MPa	Αντοχή σε θλίψη κάθε δείγματος ( $f_i$ ) σε MPa
6	$f_6 \geq f_{ck} + 1.6 \times s_6$	$f_i \geq f_{ck} - 2$

*Πίνακας 8. Κριτήρια συμμόρφωσης εξωτερικού ελέγχου για θλιπτική αντοχή για εργοστασιακό σκυρόδεμα χωρίς πιστοποίηση ελέγχου παραγωγής(Πηγή: Εργαστηριακές Ασκήσεις Οπλισμένου Σκυροδέματος - Κωνσταντίνος Δημάκος)*

όπου ως  $s_6$  ορίζεται η τυπική απόκλιση.

Εφόσον, το κριτήριο 4 δεν ισχύει για μόνο ένα από τα δείγματα, τότε αμφισβητείται η αντοχή του σκυροδέματος και πρέπει να ακολουθηθεί η διαδικασία εξ' αρχής. Αντίθετα, όταν δεν ισχύουν ένα από τα δύο κριτήρια οδηγούμαστε σε αμφισβήτηση παρτίδας και ακολουθεί επανέλεγχος.

#### Εργοταξιακό σκυρόδεμα

Πραγματοποιείται δειγματοληψία κατά την διάρκεια των τριών πρώτων ημερών με τη λήψη 12 δειγμάτων η κάθε μία και στη συνέχεια οι δειγματοληψίες θα αποτελούνται από τρία δείγματα.

Η λήψη των δοκιμών γίνεται τυχαία από διαφορετικά μίγματα.

Οι αντοχές των 12 δειγμάτων πρέπει να εξισώνουν τα κριτήρια 5 και 6 του παρακάτω πίνακα.

Πλήθος δειγμάτων	Κριτήριο 5	Κριτήριο 6
	Μέση τιμή αντοχής σε θλίψη 12 δειγμάτων $f_{12}$ σε MPa	Αντοχή σε θλίψη κάθε δείγματος ( $f_i$ ) σε MPa
12	$f_{12} \geq f_{ck} + 1.57 \times s_{12}$	$f_i \geq f_{ck} - 3$

Πίνακας 9. Κριτήρια συμμόρφωσης εξωτερικού ελέγχου για θλιπτική αντοχή για εργοταξιακό σκυρόδεμα τις τρεις πρώτες ημέρες διάστρωσης (Πηγή: Εργαστηριακές Ασκήσεις Οπλισμένου Σκυροδέματος - Κωνσταντίνος Δημάκος)

όπου  $s_{12}$  τυπική απόκλιση.

Οι αντοχές των 3 δειγμάτων πρέπει να ανταποκρίνονται στα κριτήρια 7 και 8 του πίνακα.

Πλήθος δειγμάτων από τον συγκεκριμένο όγκο σκυροδέματος	Κριτήριο 7	Κριτήριο 8
	Μέση τιμή αντοχής σε θλίψη 36 δειγμάτων $f_{36}$ σε MPa	Μέση τιμή αντοχής σε θλίψη 3 δειγμάτων $f_3$ σε MPa
3	$f_{36} \geq f_{ck} + 1.7 \times s_{60}$	$f_i \geq f_{ck} + 1.83 \times s_{60}$

Πίνακας 10. Κριτήρια συμμόρφωσης εξωτερικού ελέγχου για θλιπτική αντοχή για εργοταξιακό σκυρόδεμα μετά την τρίτη ημέρα διάστρωσης (Πηγή: Εργαστηριακές Ασκήσεις Οπλισμένου Σκυροδέματος - Κωνσταντίνος Δημάκος)

όπου  $f_{30}$  ο μέσος όρος αντοχή των 3 δοκιμίων,

$f_{360}$  μέσος όρος αντοχής των 3 δοκιμίων της μιας ημέρας αθροιστικά με τα προηγούμενα 33 δοκίμια και

$s_{60}$  τυπική απόκλιση.

Αν το κριτήριο 6 δεν ισχύει τότε έχουμε αμφισβήτηση φορτίου ενώ αν δεν ικανοποιείται ένα από τα υπόλοιπα κριτήρια οδηγούμαστε σε αμφισβήτηση παρτίδας και πρέπει να γίνει επανέλεγχος.

## 2.4 Εκτέλεση πειράματος

Για την κατασκευή ενός νέου έργου έγινε παραλαβή 90 m<sup>3</sup> σκυροδέματος για κάθε μία από τις τρεις κατηγορίες σκυροδέματος, C20/25, C25/30, C35/45 που πρέπει να εξεταστούν. Έγινε η λήψη 6 κυλινδρικών δοκιμίων, τα οποία τοποθετήθηκαν στη μηχανή θραύσης μετά το πέρας των 28 ημερών. Τα αποτελέσματα του πειράματος περιγράφονται παρακάτω αναλυτικά για κάθε κατηγορία χωριστά.

ΓΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ C20/25

Τα αποτελέσματα της δοκιμής αξονικής θλίψης είναι τα ακόλουθα:

A/A Δοκιμίου	Φορτίο (kN)
Δοκίμιο 1	630
Δοκίμιο 2	623
Δοκίμιο 3	629
Δοκίμιο 4	650
Δοκίμιο 5	637
Δοκίμιο 6	402

Πίνακας 11. Αποτελέσματα δοκιμής αξονικής θλίψης για σκυρόδεμα C20/25

Υπολογισμός θλιπτικής τάσης για τον κάθε κύλινδρο:

$$\text{Εμβαδόν κυλίνδρου: } A = \frac{\pi \times d^2}{4} = \frac{\pi \times 0.15^2}{4} = 0.018 \text{ m}^2,$$

Δοκίμιο 1: Μετατροπή από kN σε N: 630 kN = 0.630 N

$$\sigma_1 = \frac{P}{A} = \frac{0.630}{0.018} = 35 \text{ MPa}$$

Δοκίμιο 2: Μετατροπή από kNσε N: 623kN = 0.623 N

$$\sigma_2 = \frac{P}{A} = \frac{0.623}{0.018} = 34.61 \text{ MPa}$$

Δοκίμιο 3: Μετατροπή από kNσε N: 629kN = 0.629 N

$$\sigma_3 = \frac{P}{A} = \frac{0.629}{0.018} = 34.94 \text{ MPa}$$

Δοκίμιο 4: Μετατροπή από kNσε N: 650kN = 0.650 N

$$\sigma_4 = \frac{P}{A} = \frac{0.650}{0.018} = 36.11 \text{ MPa}$$

Δοκίμιο 5: Μετατροπή από kNσε N: 637kN = 0.637 N

$$\sigma_5 = \frac{P}{A} = \frac{0.637}{0.018} = 35.39 \text{ MPa}$$

Δοκίμιο 6: Μετατροπή από kNσε N: 402kN = 0.402 N

$$\sigma_6 = \frac{P}{A} = \frac{0.402}{0.018} = 22.33 \text{ MPa}$$

$$\text{Μέσος όρος: } \sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 + \sigma_5 + \sigma_6}{6} = \frac{35 + 34.61 + 34.94 + 36.11 + 35.39 + 22.33}{6} = 33.06 \text{ MPa}$$

Εξετάζουμε αν ικανοποιούνται τα κριτήρια 3 και 4 που αφορά εργοστασιακό σκυρόδεμα χωρίς πιστοποίηση ελέγχου παραγωγής.

Κριτήριο 3: ( $f_6 \geq f_{ck} + 1.6 \times s_6$ )

$$s_6 = \sqrt{\left(\frac{\sum(F_i - F_6)}{5}\right)} = \sqrt{\frac{1.94^2 + 1.55^2 + 1.88^2 + 3.05^2 + 2.33^2 + (-10.73)^2}{5}} = 5.28 > 1.5$$

$$\text{Άρα } f_6 \geq f_{ck} + 1.6 \times s_6 \rightarrow 33.06 \geq 20 + 1.6 \times 5.28 \rightarrow 33.06 \geq 28.45$$

Συνεπώς το κριτήριο 3 ισχύει.

Κριτήριο 4: ( $f_i \geq f_{ck} - 2$ )

Δοκίμιο 1 :  $35 \geq 20 - 2 \rightarrow 35 \geq 18$  ΙΣΧΥΕΙ

Δοκίμιο 2 :  $34.61 \geq 20 - 2 \rightarrow 34.61 \geq 18$  ΙΣΧΥΕΙ

Δοκίμιο 3 :  $34.94 \geq 20 - 2 \rightarrow 34.94 \geq 18$  ΙΣΧΥΕΙ

Δοκίμιο 4 :  $36.11 \geq 20 - 2 \rightarrow 36.11 \geq 18$  ΙΣΧΥΕΙ

Δοκίμιο 5 :  $35.39 \geq 20 - 2 \rightarrow 35.39 \geq 18$  ΙΣΧΥΕΙ

Δοκίμιο 6 :  $22.33 \geq 20 - 2 \rightarrow 22.33 \geq 18$  ΙΣΧΥΕΙ

Συνεπώς το κριτήριο 4 ισχύει.

Εφόσον ισχύουν και τα δύο κριτήρια δεν αμφισβητείται η αντοχή της ελεγχόμενης παρτίδας.

ΓΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ C25/30

Τα αποτελέσματα της δοκιμής αξονικής θλίψης είναι τα ακόλουθα:

A/A Δοκιμίου	Φορτίο (kN)
Δοκίμιο 1	649
Δοκίμιο 2	633
Δοκίμιο 3	401
Δοκίμιο 4	640
Δοκίμιο 5	635
Δοκίμιο 6	630

*Πίνακας 12.Αποτελέσματα δοκιμής αξονικής θλίψης για σκυρόδεμα C25/30.*

Υπολογισμός θλιπτικής τάσης για τον κάθε κύλινδρο:

$$\text{Εμβαδόν κυλίνδρου: } A = \frac{\pi x d^2}{4} = \frac{\pi x 0.15^2}{4} = 0.018 \text{ m}^2,$$

Δοκίμιο 1: Μετατροπή από kN σε N: 649kN = 0.649N

$$\sigma_1 = \frac{P}{A} = \frac{0.649}{0.018} = 36.06 \text{ MPa}$$

Δοκίμιο 2: Μετατροπή από kN σε N: 633kN = 0.633 N

$$\sigma_2 = \frac{P}{A} = \frac{0.633}{0.018} = 35.17 \text{ MPa}$$

Δοκίμιο 3: Μετατροπή από kN σε N: 401kN = 0.401N

$$\sigma_3 = \frac{P}{A} = \frac{0.401}{0.018} = 22.28 \text{ MPa}$$

Δοκίμιο 4: Μετατροπή από kN σε N: 640kN = 0.640 N

$$\sigma_4 = \frac{P}{A} = \frac{0.640}{0.018} = 35.56 \text{ MPa}$$

Δοκίμιο 5: Μετατροπή από kN σε N: 635kN = 0.635N

$$\sigma_5 = \frac{P}{A} = \frac{0.635}{0.018} = 35.28 \text{ MPa}$$

Δοκίμιο 6: Μετατροπή από kN σε N: 630kN = 0.630N

$$\sigma_6 = \frac{P}{A} = \frac{0.630}{0.018} = 35 \text{ MPa}$$

$$\text{Μέσος όρος: } \sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 + \sigma_5 + \sigma_6}{6} = \frac{36.06 + 35.17 + 22.28 + 35.56 + 35.28 + 35}{6} = 33.23 \text{ MPa}$$



Εξετάζουμε αν ικανοποιούνται τα κριτήρια 3 και 4 που αφορά εργοστασιακό σκυρόδεμα χωρίς πιστοποίηση ελέγχου παραγωγής.

Κριτήριο 3: ( $f_6 \geq f_{ck} + 1.6 \times s_6$ )

$$s_6 = \sqrt{\left(\frac{\sum(F_i - F_6)}{5}\right)} = \sqrt{\frac{2.83^2 + 1.94^2 + (-10.95)^2 + 2.33^2 + 2.05^2 + 1.77^2}{5}} = 5.37 > 1.5$$

$$\text{άρα } f_6 \geq f_{ck} + 1.6 \times s_6 \rightarrow 33.23 \geq 20 + 1.6 \times 5.37 \rightarrow 33.23 \geq 33.59$$

Συνεπώς το κριτήριο 3 δεν ισχύει.

Κριτήριο 4: ( $f_i \geq f_{ck} - 2$ )

$$\text{Δοκίμιο 1 : } 36.06 \geq 25 - 2 \rightarrow 36.06 \geq 23 \text{ ΙΣΧΥΕΙ}$$

$$\text{Δοκίμιο 2 : } 35.17 \geq 25 - 2 \rightarrow 35.17 \geq 23 \text{ ΙΣΧΥΕΙ}$$

$$\text{Δοκίμιο 3 : } 22.28 \geq 25 - 2 \rightarrow 22.28 \geq 23 \text{ ΔΕΝ ΙΣΧΥΕΙ}$$

$$\text{Δοκίμιο 4 : } 35.56 \geq 25 - 2 \rightarrow 35.56 \geq 23 \text{ ΙΣΧΥΕΙ}$$

$$\text{Δοκίμιο 5 : } 35.28 \geq 25 - 2 \rightarrow 35.28 \geq 23 \text{ ΙΣΧΥΕΙ}$$

$$\text{Δοκίμιο 6 : } 35 \geq 25 - 2 \rightarrow 35 \geq 23 \text{ ΙΣΧΥΕΙ}$$

Συνεπώς το κριτήριο 4 δεν ισχύει, επομένως η αντοχή του σκυροδέματος του φορτίου αμφισβητείται.

Τα κριτήρια 3 και 4 δεν ισχύουν συνεπώς αμφισβητείται η αντοχή της ελεγχόμενης παρτίδας και ακολουθεί επανέλεγχος.

ΓΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ C35/45

Τα αποτελέσματα της δοκιμής αξονικής θλίψης είναι τα ακόλουθα:

A/A Δοκιμίου	Φορτίο (kN)
Δοκίμιο 1	645
Δοκίμιο 2	628

Δοκίμιο 3	637
Δοκίμιο 4	403
Δοκίμιο 5	636
Δοκίμιο 6	634

Πίνακας 13.Αποτελέσματα δοκιμής αξονικής θλίψης για σκυρόδεμα C35/45.

Υπολογισμός θλιπτικής τάσης για τον κάθε κύλινδρο:

$$\text{Εμβαδόν κυλίνδρου: } A = \frac{\pi \times d^2}{4} = \frac{\pi \times 0.15^2}{4} = 0.018 \text{ m}^2,$$

Δοκίμιο 1: Μετατροπή από kNσε N: 645 kN = 0.645N

$$\sigma_1 = \frac{P}{A} = \frac{0.645}{0.018} = 35.83 \text{ MPa}$$

Δοκίμιο 2: Μετατροπή από kNσε N: 628kN = 0.628N

$$\sigma_2 = \frac{P}{A} = \frac{0.628}{0.018} = 34.89 \text{ MPa}$$

Δοκίμιο 3: Μετατροπή από kNσε N: 637kN = 0.637N

$$\sigma_3 = \frac{P}{A} = \frac{0.637}{0.018} = 25.39 \text{ MPa}$$

Δοκίμιο 4: Μετατροπή από kNσε N: 403kN = 0.403N

$$\sigma_4 = \frac{P}{A} = \frac{0.403}{0.018} = 22.39 \text{ MPa}$$

Δοκίμιο 5: Μετατροπή από kNσε N: 636kN = 0.636N

$$\sigma_5 = \frac{P}{A} = \frac{0.636}{0.018} = 35.33 \text{ MPa}$$

Δοκίμιο 6: Μετατροπή από kNσε N: 634kN = 0.634N

$$\sigma_6 = \frac{P}{A} = \frac{0.634}{0.018} = 35.22 \text{ MPa}$$

$$\text{Μέσος όρος: } \sigma = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_4 + \sigma_5 + \sigma_6}{6} = \frac{35.83 + 34.89 + 35.39 + 22.39 + 35.33 + 35.22}{6} = 33.18 \text{ MPa}$$

Εξετάζουμε αν ικανοποιούνται τα κριτήρια 3 και 4 που αφορά εργοστασιακό σκυρόδεμα χωρίς πιστοποίηση ελέγχου παραγωγής.

Κριτήριο 3: ( $f_6 \geq f_{ck} + 1.6 \times s_6$ )

$$s_6 = \sqrt{\left(\frac{\sum(F_i - F_6)}{5}\right)} = \sqrt{\frac{2.65^2 + 1.71^2 + 2.21^2 + (-10.79)^2 + 2.15^2 + 2.04^2}{5}} = 5.29 > 1.5$$

$$\text{άρα } f_6 \geq f_{ck} + 1.6 \times s_6 \rightarrow 33.18 \geq 35 + 1.6 \times 5.29 \rightarrow 33.18 \geq 43.46$$

Συνεπώς το κριτήριο 3 δεν ισχύει.

Κριτήριο 4: ( $f_i \geq f_{ck} - 2$ )

$$\text{Δοκίμιο 1 : } 35.83 \geq 35 - 2 \rightarrow 35.83 \geq 33 \text{ ΙΣΧΥΕΙ}$$

$$\text{Δοκίμιο 2 : } 34.89 \geq 35 - 2 \rightarrow 34.89 \geq 33 \text{ ΙΣΧΥΕΙ}$$

$$\text{Δοκίμιο 3 : } 35.39 \geq 35 - 2 \rightarrow 35.39 \geq 33 \text{ ΙΣΧΥΕΙ}$$

$$\text{Δοκίμιο 4 : } 22.39 \geq 35 - 2 \rightarrow 22.39 \geq 33 \text{ ΔΕΝ ΙΣΧΥΕΙ}$$

$$\text{Δοκίμιο 5 : } 35.33 \geq 35 - 2 \rightarrow 35.33 \geq 33 \text{ ΙΣΧΥΕΙ}$$

$$\text{Δοκίμιο 6 : } 35.22 \geq 35 - 2 \rightarrow 35.22 \geq 33 \text{ ΙΣΧΥΕΙ}$$

Συνεπώς το κριτήριο 4 δεν ισχύει, επομένως η αντοχή του σκυροδέματος του φορτίου αμφισβητείται.

Τα κριτήρια 3 και 4 δεν ισχύουν συνεπώς αμφισβητείται η αντοχή της ελεγχόμενης παρτίδας και ακολουθεί επανέλεγχος.

## 2.5 Εικόνες



*Εικόνα 15. Μηχανή θλίψης*

## 2.6 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τους τρεις τύπους σκυροδέματος

	C20/25	C25/30	C35/45
--	--------	--------	--------

<b>Κριτήριο 3</b>	ΙΣΧΥΕΙ	ΔΕΝ ΙΣΧΥΕΙ	ΔΕΝ ΙΣΧΥΕΙ
<b>Κριτήριο 4</b>	ΙΣΧΥΕΙ	ΔΕΝ ΙΣΧΥΕΙ	ΔΕΝ ΙΣΧΥΕΙ
<b>Αμφισβήτηση παρτίδας</b>	ΟΧΙ	ΝΑΙ	ΝΑΙ

*Πίνακας 14. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τους τρεις τύπους σκυροδέματος*

## **3 ΠΕΙΡΑΜΑ 3: ΔΟΚΙΜΗ ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΥ ΑΝΤΟΧΩΝ ΙΝΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

### **3.1 Σκοπός**

Σκοπός του συγκεκριμένου πειράματος είναι να εκτιμηθεί η αντοχή τριών ινοπλισμένων δοκών με τρία διαφορετικά είδη σκυροδέματος C20/25, C25/30 και C35/45, οι οποίες τοποθετούνται στη μηχανή θραύονται στη μηχανή κάμψης μετά το πέρας των 28 ημερών.

### **3.2 Εξοπλισμός**

- Σκυρόδεμα C20/25, C25/30, C35/45
- Χαλύβδινες ίνες μήκους 3-6 cm με κυκλική διατομή με διάμετρο 0,15-1 mm

### **3.3 Διαδικασία πειράματος**

Αρχικά, παρασκευάζεται 1 m<sup>3</sup> σκυροδέματος για τις τρεις κατηγορίες χωριστά. Πέντε λεπτά πριν ολοκληρωθεί η ανάμειξη προστίθενται οι χαλύβδινες ίνες (30-50 kg/m<sup>3</sup>) και συνεχίζεται η διαδικασία της ανάμειξης. Έπειτα, τα μίγματα τοποθετούνται στα καλούπια και ύστερα από 28 ημέρες καταπονούνται στη μηχανή κάμψης προκύπτοντας τα αποτελέσματα παρακάτω.

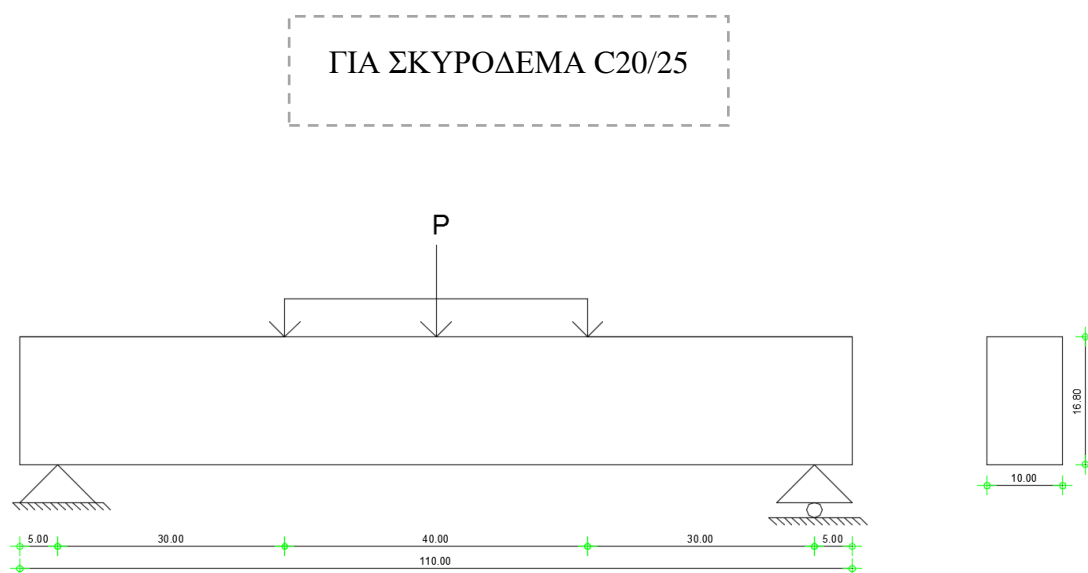
Πειράματα έχουν δείξει πως η προσθήκη ινών στο σκυρόδεμα επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες του τελικού προϊόντος, καθώς αυξάνει το φορτίο αστοχίας σε πλάκα σκυροδέματος C50 κατά 8,4%, την αντοχή σε εφελκυσμό από κάμψη κατά 3,9% και την αντοχή σε θλίψη από κάμψη κατά 8,2%. Στην αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό από κάμψη οφείλεται το γεγονός ότι μπορεί να μειωθεί ο κύριος σπλισμός της επικάλυψης λόγω των ινών και να αντικατασταθεί το πλέγμα από σίδηρο σε πλάκα που περιέχει εκ κατασκευής ίνες. Επιπλέον, παρατηρείται ελάττωση στις ρωγμές της επιφάνειας των πλακών κατά την πήξη.

Ινοπλισμένα σκυροδέματα χρησιμοποιούνται συνήθως σε δεξαμενές ή σιλό, σε λιμενικά έργα, σε οδοστρώματα αεροδρομίων, σε αντιστηρίξεις και σταθεροποιήσεις πρανών και σε σήραγγες και τέλος σε προκατασκευασμένα έργα.

Το κόστος για χαλύβδινες ίνες κυμαίνεται στα 40€/m<sup>3</sup>.

### 3.4 Εκτέλεση πειράματος

Παρακάτω παρατίθενται τα αποτελέσματα της μηχανής κάμψης των τριών δοκών και η επεξεργασία των δεδομένων.



Εικόνα 16. Ινοπλισμένη δοκός C20/25

Disp (mm)	Load (kN)
0.00	0.00
0.03	0.64
0.08	2.58
0.09	2.65

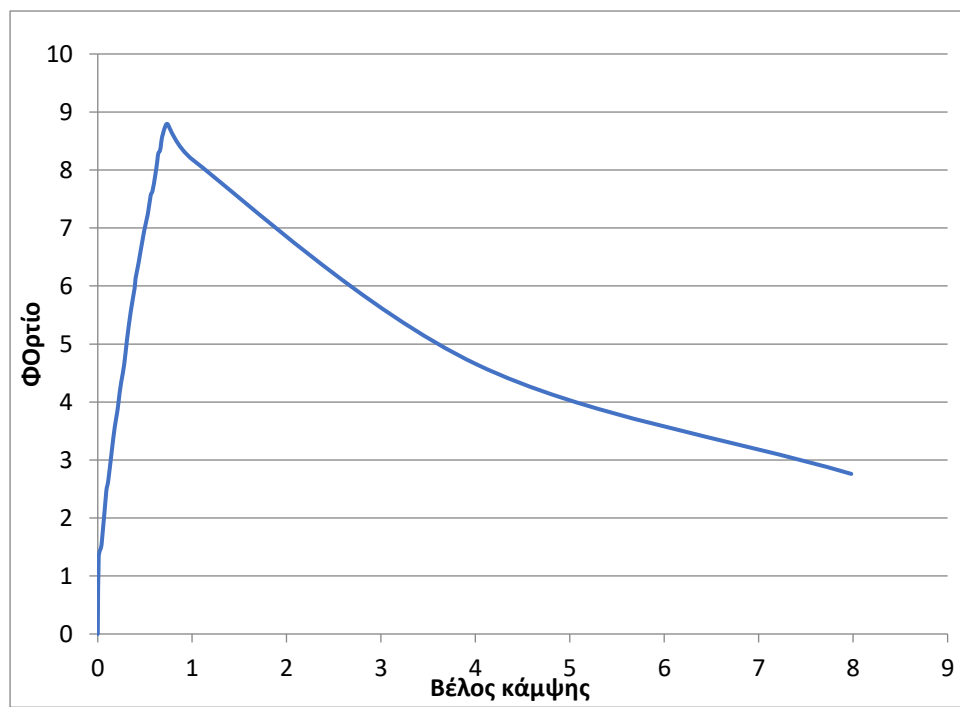
0.10	2.86
0.13	3.20
0.17	3.80
0.19	4.06
0.20	4.10
0.23	4.48
0.27	4.97
0.28	5.14
0.31	5.59
0.32	5.63
0.34	5.95
0.36	6.15
0.39	6.40
0.40	6.55
0.43	6.74
0.48	7.36
0.49	7.45
0.50	7.55
0.53	7.79
0.57	8.11
0.58	8.17
0.59	8.28



0.60	8.36
0.63	8.62
0.66	8.83
0.69	9.15
0.99	7.12
3.59	3.27

Πίνακας 15. Αποτελέσματα μηχανής κάμψης για ινοπλισμένη δοκό C20/25

Διάγραμμα φορτίου βέλους κάμψης και υπολογισμός αντοχής



Εικόνα 17. Διάγραμμα φορτίου - βέλους κάμψης

$$(\sigma_{xx})_{\theta\rho} = \frac{3 \times P_{\theta\rho} \times L}{2 \times b \times h^2} = \frac{3 \times 8.83 \times 1.10}{2 \times 0.1 \times 0.168^2} = 5162.09 \text{ kPa}$$

Υπολογισμός ροπής

Λαμβάνουμε δύο σημεία από τον πίνακα δεδομένων που αντιστοιχούν στο διάγραμμα. Έστω:

Σημείο A = 8.83

Σημείο B = 9.15

$$M_A = \frac{P \times L}{4} = \frac{8.83 \times 110}{4} = 242.83 \text{ kNm}$$

$$M_B = \frac{P \times L}{4} = \frac{9.15 \times 110}{4} = 251.63 \text{ kNm}$$

Υπολογισμός ροπής αδράνειας

$$I_{zz} = \frac{b \times h^3}{12} = \frac{10 \times 16.8^3}{12} = 3951.36 \text{ cm}^4$$

$$y = \frac{h}{2} = \frac{16.8}{2} = 8.4 \text{ cm}$$

Υπολογισμός τάσεων A και B

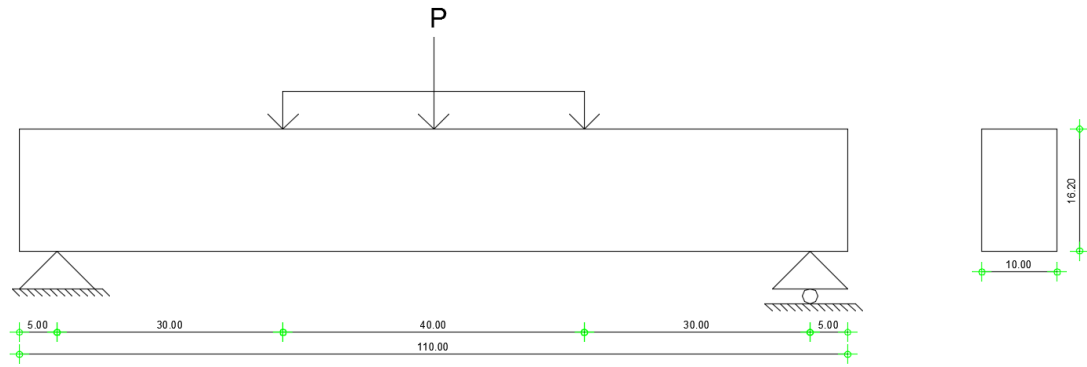
$$\sigma_A = \frac{M_A}{I_{zz}} \times y = \frac{242.83}{3951.36} \times 8.4 = 0.5162 \text{ kPa} = 51.62 \text{ MPa}$$

$$\sigma_B = \frac{M_B}{I_{zz}} \times y = \frac{251.63}{3951.36} \times 8.4 = 0.5349 \text{ kPa} = 53.49 \text{ MPa}$$

% Αύξηση της αντοχής

$$\frac{S_B - S_A}{S_A} \times 100 = \frac{53.49 - 51.62}{51.62} \times 100 = 3.62\%$$

ΓΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ C25/30



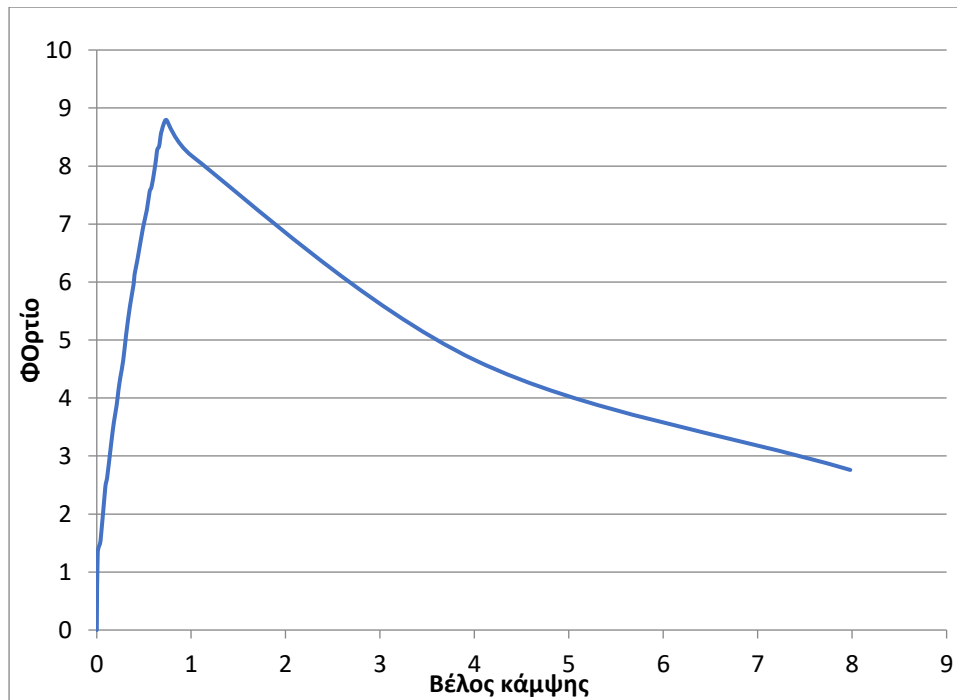
Εικόνα 18. Ινοπλισμένη δοκός C25/30

Disp (mm)	Load (kN)
0.00	0.00
0.04	1.11
0.09	2.32
0.12	2.75
0.15	3.20
0.16	3.43
0.17	3.60
0.20	4.26
0.22	4.65
0.24	4.95
0.26	5.25
0.29	5.52
0.30	5.63
0.32	5.93

0.35	6.14
0.36	6.23
0.37	6.31
0.38	6.42
0.40	6.63
0.41	6.72
0.42	6.82
0.43	6.89
0.46	7.12
0.49	7.42
0.50	7.53
0.54	7.83
0.56	7.93
0.58	8.10
0.59	8.23
0.62	8.53
0.70	7.95
4.36	3.35

*Πίνακας 16. Αποτελέσματα μηχανής κάμψης για ινοπλισμένη δοκό C25/30*

Διάγραμμα φορτίου βέλους κάμψης και υπολογισμός αντοχής



Εικόνα 19. Διάγραμμα φορτίου - βέλους κάμψης

$$(\sigma_{xx})_{\theta\rho} = \frac{3 \times P_{\theta\rho} \times L}{2 \times b \times h^2} = \frac{3 \times 8.23 \times 1.10}{2 \times 0.1 \times 0.162^2} = 5174.33 \text{ kPa}$$

#### Υπολογισμός ροπής

Λαμβάνουμε δύο σημεία από τον πίνακα δεδομένων που αντιστοιχούν στο διάγραμμα. Έστω:

Σημείο A = 8.23

Σημείο B = 8.53

$$M_A = \frac{P \times L}{4} = \frac{8.23 \times 110}{4} = 226.33 \text{ kNm}$$

$$M_B = \frac{P \times L}{4} = \frac{8.53 \times 110}{4} = 234.58 \text{ kNm}$$

#### Υπολογισμός ροπής αδράνειας

$$I_{zz} = \frac{b \times h^3}{12} = \frac{10 \times 16.2^3}{12} = 3542.94 \text{ cm}^4$$

$$y = \frac{h}{2} = \frac{16.2}{2} = 8.1 \text{ cm}$$

Υπολογισμός τάσεων Α και Β

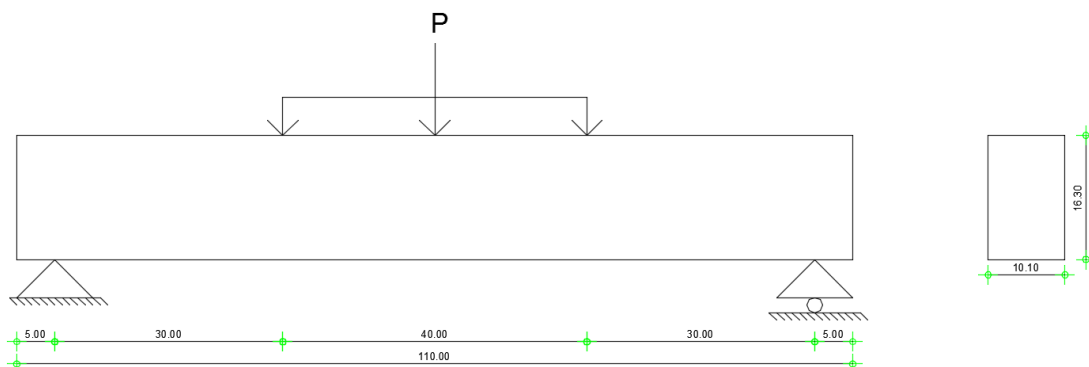
$$\sigma_A = \frac{M_A}{I_{zz}} \times y = \frac{226.33}{3542.94} \times 8.1 = 0.5174 \text{ kPa} = 51.74 \text{ MPa}$$

$$\sigma_B = \frac{M_B}{I_{zz}} \times y = \frac{234.58}{3542.94} \times 8.1 = 0.5363 \text{ kPa} = 53.63 \text{ MPa}$$

% Αύξηση της αντοχής

$$\frac{S_B - S_A}{S_A} \times 100 = \frac{53.63 - 51.74}{51.74} \times 100 = 3.65\%$$

ΓΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ C35/45



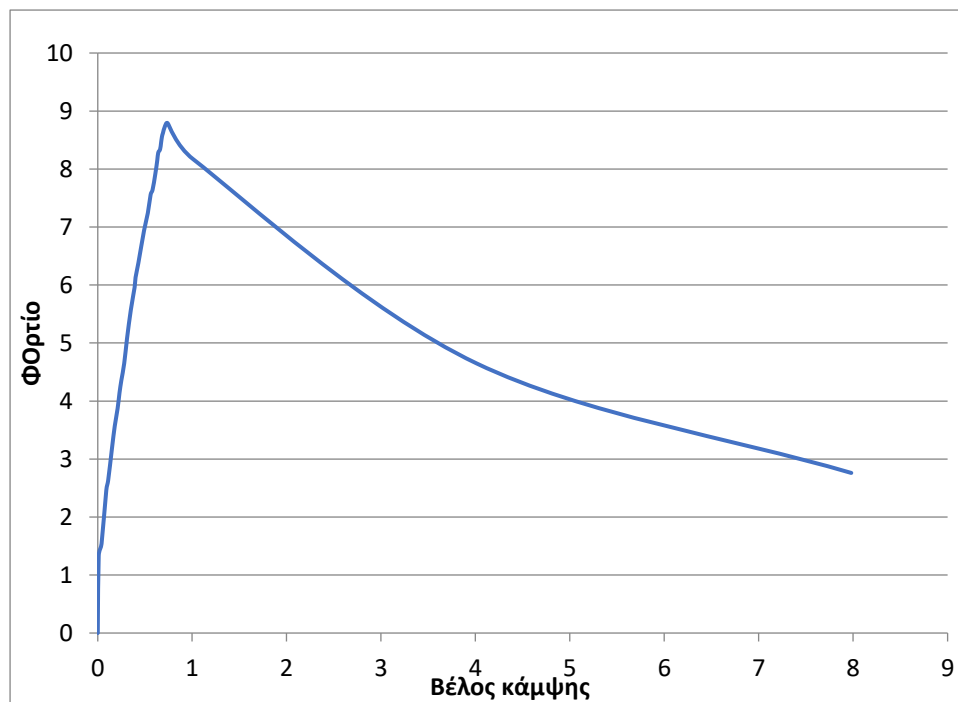
Εικόνα 20. Ινοπλισμένη δοκός C35/45

Disp (mm)	Load (kN)
0.00	0.00
0.01	1.33
0.04	1.54
0.09	2.46
0.11	2.63
0.15	3.18
0.18	3.57
0.21	3.87
0.23	4.14
0.25	4.36
0.28	4.65
0.31	5.08
0.35	5.57
0.39	5.96
0.40	6.13
0.43	6.38
0.49	6.94
0.53	7.24
0.56	7.56
0.58	7.64
0.61	7.92

0.63	8.15
0.64	8.28
0.66	8.34
0.67	8.45
0.68	8.56
0.69	8.62
0.71	8.73
0.74	8.79
1.01	8.17
4.01	4.65
7.98	2.76

Πίνακας 17. Αποτελέσματα μηχανής κάμψης για ινοπλισμένη δοκό C35/45

Διάγραμμα φορτίου βέλους κάμψης και υπολογισμός αντοχής





Εικόνα 21. Διάγραμμα φορτίου - βέλους κάμψης

$$(\sigma_{xx})_{\theta\rho} = \frac{3 \times P_{\theta\rho} \times L}{2 \times b \times h^2} = \frac{3 \times 8.73 \times 1.10}{2 \times 0.1 \times 0.163^2} = 5421.54 \text{ kPa}$$

Υπολογισμός ροπής

Λαμβάνουμε δύο σημεία από τον πίνακα δεδομένων που αντιστοιχούν στο διάγραμμα. Έστω:

Σημείο A = 8.73

Σημείο B = 8.79

$$M_A = \frac{P \times L}{4} = \frac{8.73 \times 110}{4} = 240.08 \text{ kNm}$$

$$M_B = \frac{P \times L}{4} = \frac{8.79 \times 110}{4} = 241.73 \text{ kNm}$$

Υπολογισμός ροπής αδράνειας

$$I_{zz} = \frac{b \times h^3}{12} = \frac{10.1 \times 16.3^3}{12} = 3645.05 \text{ cm}^4$$

$$y = \frac{h}{2} = \frac{16.3}{2} = 8.15 \text{ cm}$$

Υπολογισμός τάσεων A και B

$$\sigma_A = \frac{M_A}{I_{zz}} \times y = \frac{240.08}{3645.05} \times 8.15 = 0.5368 \text{ kPa} = 53.68 \text{ MPa}$$

$$\sigma_B = \frac{M_B}{I_{zz}} \times y = \frac{241.73}{3645.05} \times 8.15 = 0.5405 \text{ kPa} = 54.05 \text{ MPa}$$

% Αύξηση της αντοχής

$$\frac{S_B - S_A}{S_A} \times 100 = \frac{54.05 - 53.68}{53.68} \times 100 = 0.69\%$$

### 3.4 Εικόνες



*Εικόνα 22. Μηχανή κάμψης*

### 3.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τους τρεις τύπους σκυροδέματος

	<b>C20/25</b>	<b>C25/30</b>	<b>C35/45</b>
<b>Αντοχή (kPa)</b>	5162.09	5174.33	5421.54
<b>Ροπή A (kNm)</b>	242.83	226.33	240.08
<b>Ροπή B (kNm)</b>	251.63	234.58	241.73

<b>Τάση A (MPa)</b>	51.62	51.74	53.68
<b>Τάση B (MPa)</b>	53.49	53.63	54.05
<b>% Αύξηση της αντοχής</b>	3.62	3.65	0.69

*Πίνακας 18. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τους τρεις τύπους σκυροδέματος*

## 4 ΠΕΙΡΑΜΑ 4: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΡΙΑΚΗΣ ΡΟΠΗΣ ΑΝΤΟΧΗΣ ΔΟΚΟΥ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

### 4.1 Σκοπός

Σκοπός του τελευταίου πειράματος είναι να εκτιμηθεί η οριακή ροπή αντοχής για τρεις δοκούς C20/25, C25/30, C35/45 γνωρίζοντας τη γεωμετρία τους.

### 4.2 Εξοπλισμός

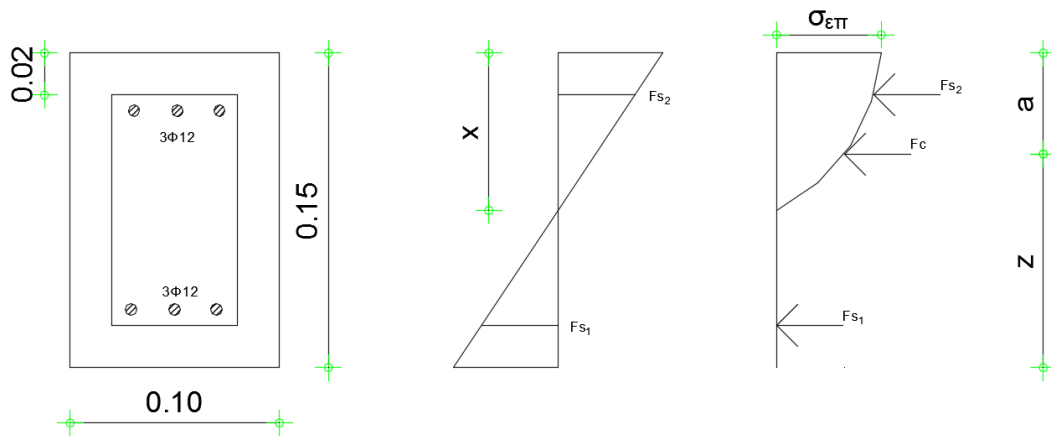
- Σκυρόδεμα C20/25, C25/30, C35/45
- Χάλυβας B500c

### 4.3 Διαδικασία πειράματος

Κατασκευάζονται τρεις δοκοί οπλισμένου σκυροδέματος C20/25, C25/30, C35/45 με χάλυβα B500c. Με βάση τη γεωμετρία τους, η οποία φαίνεται παρακάτω, υπολογίζεται η οριακή τους αντοχή.

### 4.4 Εκτέλεση πειράματος

ΓΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ C20/25



Εικόνα 23. Διατομή δοκού C20/25 και διαγράμματα τάσεων και παραμορφώσεων

Εξετάζεται η αμφιέρειστη δοκός ορθογωνικής διατομής  $b \times h = 100 \times 150 \text{ mm}^2$  και μήκους  $l = 1.60 \text{ m}$ , που υποβάλλεται σε κάμψη 4 σημείων. Ο εφελκόμενος και ο θλιβόμενος χάλυβας είναι 3Φ12. Η απόσταση φορτίου - στήριξης ( $a_s$ ) είναι 0.30 m.

Σκυρόδεμα: Χρησιμοποιείται σκυρόδεμα C20/25

Χάλυβας: Χρησιμοποιείται χάλυβας B500c

Θεωρούμε ότι η παραμόρφωση στο άνω πέλμα της δοκού έχει εξαντληθεί και είναι  $\epsilon_c = 3.5 \%$ .

### ΤΑΣΕΙΣ - ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

#### Σκυρόδεμα:

Χαρακτηριστική αντοχή σκυροδέματος σε κεντρική θλίψη:  $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$

Συντελεστής ασφαλείας σκυροδέματος στην ΟΚΑ:  $\gamma_c = 1.5$

Αντοχή σχεδιασμού:  $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{20}{1.5} = 13.33 \text{ MPa}$

Μέτρο ελαστικότητας για κατηγορία C20/25:  $E_{cm} = 29 \text{ GPa}$

#### Χάλυβας:

Χαρακτηριστική αντοχή διαρροής χάλυβα:  $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$

Συντελεστής ασφαλείας χάλυβα στην ΟΚΑ:  $\gamma_s = 1.15$

$$\text{Αντοχή σχεδιασμού: } f_{yk} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1.15} = 434.78 \text{ MPa} = \sigma_y$$

Μέτρο ελαστικότητας για χάλυβα B500c:  $E_s = 200 \text{ GPa}$

Παραμόρφωση χάλυβα:

$$\text{Νόμος Hooke: } \sigma = E \epsilon \rightarrow \epsilon_{sy} = \frac{\sigma_y}{E_s} = \frac{434.78}{200 \times 10^3} = 2.17 \times 10^{-3} = 2.17\%$$

1η παραδοχή: Έστω ότι και οι δύο χάλυβες έχουν διαρρεύσει

$$F_{S1} = \sigma_{s1} \times A_{s1} = \frac{434.78}{1.15} \times 3 \times \pi \times \frac{12^2}{4} = 128.28 \text{ kN}$$

$$F_{S2} = \sigma_{s2} \times A_{s2} = \frac{434.78}{1.15} \times 3 \times \pi \times \frac{12^2}{4} = 128.28 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} F_c &= \sigma_m \times (x) \times b = a \times f_{cd} \times (x) \times b = a \times \frac{0.85 \times f_{ck}}{\gamma_c} \times (x) \times b \\ &= 0.81 \times \frac{0.85 \times 20}{1.5} \times (x) \times 0.10 = 0.918 \times kN \end{aligned}$$

Όπου  $a$  είναι ο συντελεστής πληρώσεως, εξαρτάται από την παραμόρφωση και για  $\epsilon_c = 3.5\%$  είναι  $a = 0.81$ .

Επειδή πρέπει να ισχύει  $\sum F = F_{s1} - F_c - F_{s2} = 0 \rightarrow 128.28 - 0.918 \times x - 128.28 = 0 \rightarrow X = 0$  δεν ισχύει, οπότε η παραδοχή πως και οι δύο χάλυβες έχουν διαρρεύσει δεν είναι σωστή.

2η παραδοχή: Έστω ότι ο εφελκόμενος χάλυβας έχει διαρρεύσει και ο θλιβόμενος όχι

$$F_{S1} = \sigma_{s1} \times A_{s1} = \frac{500}{1.15} \times 3 \times \pi \times \frac{12^2}{4} = 128.28 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} F_{S2} &= \sigma_{s2} \times A_{s2} = (E_s \times \varepsilon_{s2}) \times A_{s2} = 200 \times \frac{\varepsilon_{s2} (x - 20)}{x} \times 3 \times \pi \times \frac{12^2}{4} \\ &= 200 \times 3.5 \times \frac{(x - 20)}{x} \times 3 \times \pi \times \frac{12^2}{4} = 237.50 \frac{(x - 20)}{x} \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_c &= \sigma_m \times (x) \times b = a \times f_{cd} \times (x) \times b = a \times \frac{0.85 \times f_{ck}}{\gamma_c} \times (x) \times b \\ &= 0.81 \times \frac{0.85 \times 20}{1.5} \times (x) \times 0.10 = 0.918 \times x \text{ kN} \end{aligned}$$

Επειδή πρέπει να ισχύει  $\sum F = F_{s1} - F_c - F_{s2} = 0 \rightarrow 128.28 - 0.918 \times x - 237.50 \frac{(x-20)}{x} = 0 \rightarrow$

$$128.28x - 0.918x^2 - 237.50(x - 20) = 0 \rightarrow$$

$$128.28x - 0.918x^2 - 237.50x + 4750 = 0 \rightarrow$$

$$-0.918x^2 - 109.22x - 4750 = 0 \rightarrow$$

$$0.918x^2 + 109.22x - 4750 = 0$$

$$\Delta = \beta^2 - 4\alpha\gamma = 109.22^2 - 4 \times 0.918 \times (-4750) = 29371.0084$$

$$\begin{aligned} x_{1,2} &= \frac{-\beta \pm \sqrt{\Delta}}{2\alpha} = \frac{-109.22 \pm \sqrt{29371.0084}}{2 \times 0.918} = x_1 = 33.856 \text{ mm} \text{ ή } x_2 \\ &= -152.832 \text{ mm απορρίπτεται} \end{aligned}$$

Επομένως,  $x = 0.033856 \text{ m}$

#### Παραμόρφωση θλιβόμενου χάλυβα

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon_{c2}}{x} = \frac{\varepsilon_{s2}}{x - d_2} \rightarrow \varepsilon_{s2} = \frac{x - d_2}{x} \times \varepsilon_{c2} \rightarrow \varepsilon_{s2} = \frac{0.033856 - 0.02}{0.033856} \times 3.5 \rightarrow \varepsilon_{s2} = 1.43 \text{ ‰} < \varepsilon_{sy} = \\ 2.17 \text{ ‰} \end{aligned}$$

Οπότε, ο θλιβόμενος χάλυβας δεν έχει διαρρεύσει.

### Παραμόρφωση εφελκόμενου χάλυβα

$$\frac{\varepsilon_{c2}}{x} = \frac{\varepsilon_{s1}}{d-x} \rightarrow \varepsilon_{s1} = \frac{d-x}{x} \times \varepsilon_{c2} \rightarrow \varepsilon_{s1} = \frac{0.13 - 0.033856}{0.033856} \times 3.5 \rightarrow \varepsilon_{s1} = 9.94 \text{ ‰} > \varepsilon_{sy} = 2.17 \text{ ‰}$$

Οπότε, ο εφελκόμενος χάλυβας έχει διαρρέυσει.

Εφόσον ο εφελκόμενος χάλυβας έχει διαρρέυσει και ο θλιβόμενος όχι, η παραδοχή είναι σωστή.

### ΔΥΝΑΜΕΙΣ

Δύναμη εφελκόμενου χάλυβα  $F_{s1} = 128.28 \text{ kN}$

Δύναμη σκυροδέματος  $F_c = 0.918x = 0.918 \times 0.033856 \rightarrow F_c = 31.08 \text{ kN}$

Δύναμη θλιβόμενου χάλυβα  $F_{s2} = 237.50 \frac{(x-20)}{x} = 237.50 \frac{(0.033856-0.02)}{0.033856} = 97.20 \text{ kN}$

$$\sum F = F_{s1} - F_c - F_{s2} = 0 \rightarrow 128.28 - 31.08 - 97.20 = 0 \rightarrow 0 = 0 \text{ Ισχύει}$$

### ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΡΙΑΚΗΣ ΡΟΠΗΣ ΚΑΙ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

$$\alpha = \zeta x = 0.416 \times 0.033856 = 0.014 \text{ m}$$

όπου  $\zeta$  είναι ο συντελεστής κέντρου βάρους και για παραμόρφωση ίση με 3.5 ‰ είναι  $\zeta = 0.416$

$$z = d - \alpha = 0.13 - 0.014 = 0.116 \text{ m}$$

Ροπή ως προς τη στάθμη του εφελκόμενου χάλυβα:

$$M_{RD} = F_c \times z + F_{s2}(d - d_2) = 31.08 \times 0.116 + 97.20 \times (0.13 - 0.02) \rightarrow$$

$$M_{RD} = 14.30 \text{ kNm}$$



Ροπή αντοχής ως προς το κέντρο βάρους:

$$M_{RD} = F_c \left( \frac{h}{2} - a \right) + F_{s2} \left( \frac{h}{2} - d_2 \right) + F_{s1} \left( \frac{h}{2} - d_1 \right) \rightarrow$$

$$M_{RD} = 31.08 \left( \frac{0.15}{2} - 0.014 \right) + 97.20 \left( \frac{0.15}{2} - 0.02 \right) + 128.28 \left( \frac{0.15}{2} - 0.02 \right) \rightarrow$$

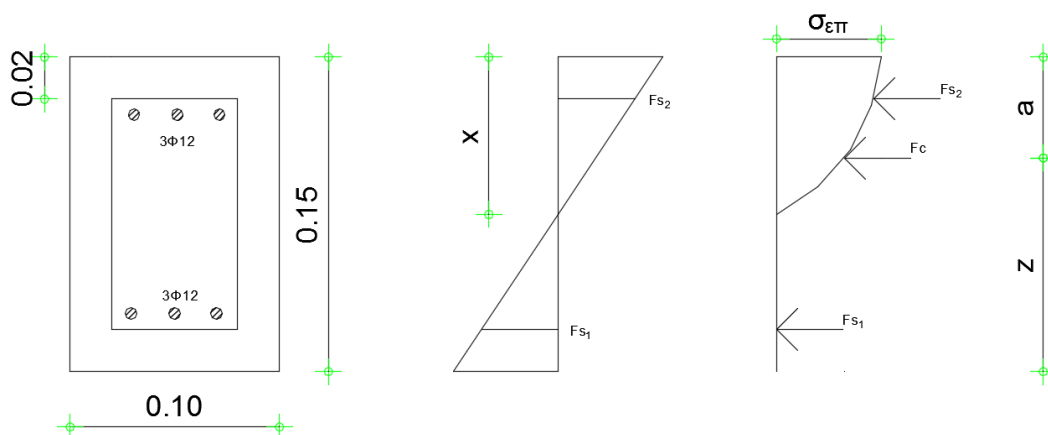
$$M_{RD} = 14.30 \text{ kNm}$$

Μέγιστο φορτίο

$$M_{max} = M_{RD} \rightarrow \frac{g_{IB} x l^2}{8} + \frac{P}{2} x a_s = M_{RD} \rightarrow \frac{b x h x \gamma_c x l^2}{8} + \frac{P}{2} x a_s =$$

$$M_{RD} \rightarrow \frac{0.10 x 0.15 x 25 x 1.60^2}{8} + \frac{P}{2} x 0.30 = 14.30 \rightarrow P = 94.53 \text{ kN}$$

ΓΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ C25/30



Εικόνα 24. Διατομή δοκού C25/30 και διαγράμματα τάσεων και παραμορφώσεων

Εξετάζεται η αμφιέρειστη δοκός ορθογωνικής διατομής  $b x h = 100 \times 150 \text{ mm}^2$  και μήκους  $l = 1.60 \text{ m}$ , που υποβάλλεται σε κάμψη 4 σημείων. Ο εφελκόμενος και ο θλιβόμενος χάλυβας είναι 3Φ12. Η απόσταση φορτίου - στήριξης ( $a_s$ ) είναι 0.30 m.

Σκυρόδεμα: Χρησιμοποιείται σκυρόδεμα C25/30

Χάλυβας: Χρησιμοποιείται χάλυβας B500c

Θεωρούμε ότι η παραμόρφωση στο άνω πέλμα της δοκού έχει εξαντληθεί και είναι  $\epsilon_c = 3.5 \text{ ‰}$ .

### ΤΑΣΕΙΣ - ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

#### Σκυρόδεμα:

Χαρακτηριστική αντοχή σκυροδέματος σε κεντρική θλίψη:  $f_{ck} = 25 \text{ MPa}$

Συντελεστής ασφαλείας σκυροδέματος στην ΟΚΑ:  $\gamma_c = 1.5$

Αντοχή σχεδιασμού:  $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{25}{1.5} = 16.67 \text{ MPa}$

Μέτρο ελαστικότητας για κατηγορία C25/30:  $E_{cm} = 31 \text{ GPa}$

#### Χάλυβας:

Χαρακτηριστική αντοχή διαρροής χάλυβα:  $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$

Συντελεστής ασφαλείας χάλυβα στην ΟΚΑ:  $\gamma_s = 1.15$

Αντοχή σχεδιασμού:  $f_{yk} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1.15} = 434.78 \text{ MPa} = \sigma_y$

Μέτρο ελαστικότητας για χάλυβα B500c:  $E_s = 200 \text{ GPa}$

#### Παραμόρφωση χάλυβα:

Νόμος Hooke:  $\sigma = E \epsilon \rightarrow \epsilon_{sy} = \frac{\sigma_y}{E_s} = \frac{434.78}{200 \times 10^3} = 2.17 \times 10^{-3} = 2.17 \text{ ‰}$

1η παραδοχή: Έστω ότι και οι δύο χάλυβες έχουν διαρρεύσει

$$F_{S1} = \sigma_{s1} \times A_{s1} = \frac{434.78}{1.15} \times 3 \times \pi \times \frac{12^2}{4} = 128.28 \text{ kN}$$

$$F_{S2} = \sigma_{s2} \times A_{s2} = \frac{434.78}{1.15} \times 3 \times \pi \times \frac{12^2}{4} = 128.28 \text{ kN}$$

$$F_c = \sigma_m x(x) x b = a x f_{cd} x(x) x b = a x \frac{0.85 x f_{ck}}{\gamma_c} x(x) x b$$

$$= 0.81 x \frac{0.85 x 25}{1.5} x(x) x 0.10 = 1.1475 x kN$$

Όπου  $a$  είναι ο συντελεστής πληρώσεως, εξαρτάται από την παραμόρφωση και για  $\varepsilon_c = 3.5\%$  είναι  $a = 0.81$ .

Επειδή πρέπει να ισχύει  $\sum F = F_{s1} - F_c - F_{s2} = 0 \rightarrow 128.28 - 1.1475x - 128.28 = 0 \rightarrow x = 0$  δεν ισχύει, οπότε η παραδοχή πως και οι δύο χάλυβες έχουν διαρρέυσει δεν είναι σωστή.

2η παραδοχή: Έστω ότι ο εφελκόμενος χάλυβας έχει διαρρέυσει και ο θλιβόμενος όχι

$$F_{s1} = \sigma_{s1} x A_{s1} = \frac{500}{1.15} x 3 x \pi x \frac{12^2}{4} = 128.28 kN$$

$$F_{s2} = \sigma_{s2} x A_{s2} = (E_s x \varepsilon_{s2}) x A_{s2} = 200 x \frac{\varepsilon_{s2} (x - 20)}{x} x 3 x \pi x \frac{12^2}{4}$$

$$= 200 x 3.5 x \frac{(x - 20)}{x} x 3 x \pi x \frac{12^2}{4} = 237.50 \frac{(x - 20)}{x} kN$$

$$F_c = \sigma_m x(x) x b = a x f_{cd} x(x) x b = a x \frac{0.85 x f_{ck}}{\gamma_c} x(x) x b$$

$$= 0.81 x \frac{0.85 x 25}{1.5} x(x) x 0.10 = 1.1475 x kN$$

Επειδή πρέπει να ισχύει  $\sum F = F_{s1} - F_c - F_{s2} = 0 \rightarrow 128.28 - 1.1475x - 237.50 \frac{(x-20)}{x} = 0 \rightarrow$

$$128.28x - 1.1475x^2 - 237.50(x - 20) = 0 \rightarrow$$

$$128.28x - 1.1475x^2 - 237.50x + 4750 = 0 \rightarrow$$

$$-1.1475x^2 - 109.22x - 4750 = 0 \rightarrow$$

$$1.1475x^2 + 109.22x - 4750 = 0$$

$$\Delta = \beta^2 - 4\alpha\gamma = 109.22^2 - 4 \times 1.1475 \times (-4750) = 33731.5084$$

$$x_{1,2} = \frac{-\beta \pm \sqrt{\Delta}}{2\alpha} = \frac{-109.22 \pm \sqrt{33731.5084}}{2 \times 1.1475} = x_1 = 32.436 \text{ mm} \text{ ή } x_2 = -127.617 \text{ mm απορρίπτεται}$$

Επομένως,  $x = 0.032436\text{m}$

#### Παραμόρφωση θλιβόμενου χάλυβα

$$\frac{\varepsilon_{c2}}{x} = \frac{\varepsilon_{s2}}{x - d_2} \rightarrow \varepsilon_{s2} = \frac{x - d_2}{x} \times \varepsilon_{c2} \rightarrow \varepsilon_{s2} = \frac{0.032436 - 0.02}{0.032436} \times 3.5 \rightarrow \varepsilon_{s2} = 1.34 \text{ ‰} < \varepsilon_{sy} = 2.17 \text{ ‰}$$

Οπότε, ο θλιβόμενος χάλυβας δεν έχει διαρρέυσει.

#### Παραμόρφωση εφελκόμενου χάλυβα

$$\frac{\varepsilon_{c2}}{x} = \frac{\varepsilon_{s1}}{d - x} \rightarrow \varepsilon_{s1} = \frac{d - x}{x} \times \varepsilon_{c2} \rightarrow \varepsilon_{s1} = \frac{0.13 - 0.032436}{0.032436} \times 3.5 \rightarrow \varepsilon_{s1} = 10.53 \text{ ‰} > \varepsilon_{sy} = 2.17 \text{ ‰}$$

Οπότε, ο εφελκόμενος χάλυβας έχει διαρρέυσει.

Εφόσον ο εφελκόμενος χάλυβας έχει διαρρέυσει και ο θλιβόμενος όχι, η παραδοχή είναι σωστή.

#### ΔΥΝΑΜΕΙΣ

Δύναμη εφελκόμενου χάλυβα  $F_{s1} = 128.28 \text{ kN}$

Δύναμη σκυροδέματος  $F_c = 1.1475x = 1.1475 \times 0.032436 \rightarrow F_c = 37.22 \text{ kN}$

Δύναμη θλιβόμενου χάλυβα  $F_{s2} = 237.50 \frac{(x-20)}{x} = 237.50 \frac{(0.032436-0.02)}{0.032436} = 91.06 \text{ kN}$

$$\sum F = F_{s1} - F_c - F_{s2} = 0 \rightarrow 128.28 - 37.22 - 91.06 = 0 \rightarrow 0 = 0 \text{ Ισχύει}$$

### ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΡΙΑΚΗΣ ΡΟΠΗΣ ΚΑΙ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

$$\alpha = \zeta x = 0.416 \times 0.032436 = 0.013\text{m}$$

όπου  $\zeta$  είναι ο συντελεστής κέντρου βάρους και για παραμόρφωση ίση με 3.5 ‰ είναι  $\zeta = 0.416$

$$z = d - \alpha = 0.13 - 0.013 = 0.117\text{m}$$

Ροπή ως προς τη στάθμη του εφελκόμενου χάλυβα:

$$M_{RD} = F_c \times z + F_{s2}(d - d_2) = 37.22 \times 0.117 + 91.06 \times (0.13 - 0.02) \rightarrow$$

$$M_{RD} = 14.37 \text{ kNm}$$

Ροπή αντοχής ως προς το κέντρο βάρους:

$$M_{RD} = F_c \left( \frac{h}{2} - a \right) + F_{s2} \left( \frac{h}{2} - d_2 \right) + F_{s1} \left( \frac{h}{2} - d_1 \right) \rightarrow$$

$$M_{RD} = 37.22 \left( \frac{0.15}{2} - 0.013 \right) + 91.06 \left( \frac{0.15}{2} - 0.02 \right) + 128.28 \left( \frac{0.15}{2} - 0.02 \right) \rightarrow$$

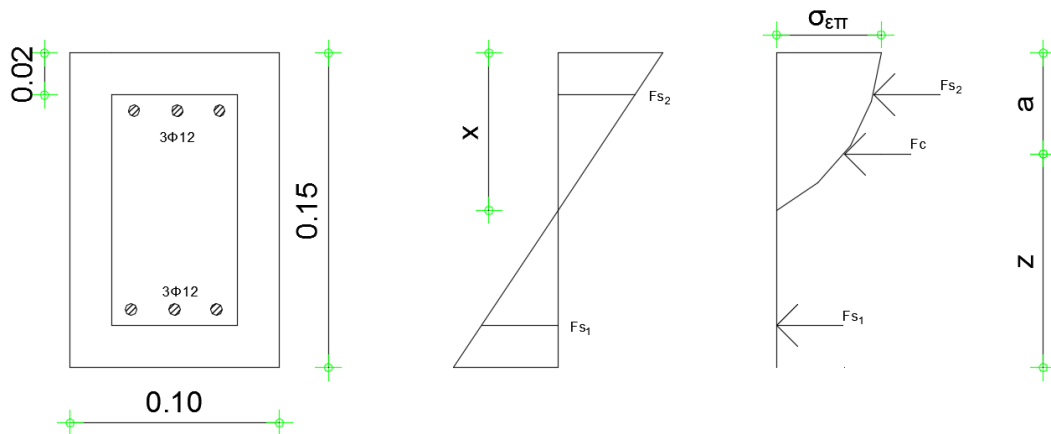
$$M_{RD} = 14.37 \text{ kNm}$$

Μέγιστο φορτίο

$$M_{max} = M_{RD} \rightarrow \frac{g_{IB} x l^2}{8} + \frac{P}{2} x a_s = M_{RD} \rightarrow \frac{b x h x \gamma_c x l^2}{8} + \frac{P}{2} x a_s =$$

$$M_{RD} \rightarrow \frac{0.10 \times 0.15 \times 25 \times 1.60^2}{8} + \frac{P}{2} \times 0.30 = 14.37 \rightarrow P = 95 \text{ kN}$$

ΓΙΑ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ C25/30



Εικόνα 25. Διατομή δοκού C35/45 και διαγράμματα τάσεων και παραμορφώσεων

Εξετάζεται η αμφιέρειστη δοκός ορθογωνικής διατομής  $b \times h = 100 \times 150 \text{ mm}^2$  και μήκους  $l = 1.60 \text{ m}$ , που υποβάλλεται σε κάμψη 4 σημείων. Ο εφελκόμενος και ο θλιβόμενος χάλυβας είναι 3Φ12. Η απόσταση φορτίου - στήριξης ( $a_s$ ) είναι 0.30 m.

Σκυρόδεμα: Χρησιμοποιείται σκυρόδεμα C35/45

Χάλυβας: Χρησιμοποιείται χάλυβας B500c

Θεωρούμε ότι η παραμόρφωση στο άνω πέλμα της δοκού έχει εξαντληθεί και είναι  $\epsilon_c = 3.5 \%$ .

### ΤΑΣΕΙΣ - ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΥΛΙΚΩΝ

#### Σκυρόδεμα:

Χαρακτηριστική αντοχή σκυροδέματος σε κεντρική θλίψη:  $f_{ck} = 35 \text{ MPa}$

Συντελεστής ασφαλείας σκυροδέματος στην ΟΚΑ:  $\gamma_c = 1.5$

Αντοχή σχεδιασμού:  $f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{35}{1.5} = 23.33 \text{ MPa}$

Μέτρο ελαστικότητας για κατηγορία C35/45:  $E_{cm} = 34 \text{ GPa}$

#### Χάλυβας:

Χαρακτηριστική αντοχή διαρροής χάλυβα:  $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$

Συντελεστής ασφαλείας χάλυβα στην ΟΚΑ:  $\gamma_s = 1.15$

$$\text{Αντοχή σχεδιασμού: } f_{yk} = \frac{f_{yk}}{\gamma_s} = \frac{500}{1.15} = 434.78 \text{ MPa} = \sigma_y$$

Μέτρο ελαστικότητας για χάλυβα B500c:  $E_s = 200 \text{ GPa}$

Παραμόρφωση χάλυβα:

$$\text{Νόμος Hooke: } \sigma = E \epsilon \rightarrow \epsilon_{sy} = \frac{\sigma_y}{E_s} = \frac{434.78}{200 \times 10^3} = 2.17 \times 10^{-3} = 2.17\%$$

1η παραδοχή: Έστω ότι και οι δύο χάλυβες έχουν διαρρεύσει

$$F_{s1} = \sigma_{s1} \times A_{s1} = \frac{434.78}{1.15} \times 3 \times \pi \times \frac{12^2}{4} = 128.28 \text{ kN}$$

$$F_{s2} = \sigma_{s2} \times A_{s2} = \frac{434.78}{1.15} \times 3 \times \pi \times \frac{12^2}{4} = 128.28 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} F_c &= \sigma_m \times (x) \times b = a \times f_{cd} \times (x) \times b = a \times \frac{0.85 \times f_{ck}}{\gamma_c} \times (x) \times b \\ &= 0.81 \times \frac{0.85 \times 35}{1.5} \times (x) \times 0.10 = 1.6065 \times kN \end{aligned}$$

Όπου  $a$  είναι ο συντελεστής πληρώσεως, εξαρτάται από την παραμόρφωση και για  $\epsilon_c = 3.5\%$  είναι  $a = 0.81$ .

Επειδή πρέπει να ισχύει  $\sum F = F_{s1} - F_c - F_{s2} = 0 \rightarrow 128.28 - 1.6065x - 128.28 = 0 \rightarrow X = 0$  δεν ισχύει, οπότε η παραδοχή πως και οι δύο χάλυβες έχουν διαρρεύσει δεν είναι σωστή.

2η παραδοχή: Έστω ότι ο εφελκόμενος χάλυβας έχει διαρρεύσει και ο θλιβόμενος όχι

$$F_{S1} = \sigma_{s1} \times A_{s1} = \frac{500}{1.15} \times 3 \times \pi \times \frac{12^2}{4} = 128.28 \text{ kN}$$

$$\begin{aligned} F_{S2} &= \sigma_{s2} \times A_{s2} = (E_s \times \varepsilon_{s2}) \times A_{s2} = 200 \times \frac{\varepsilon_{s2} (x - 20)}{x} \times 3 \times \pi \times \frac{12^2}{4} \\ &= 200 \times 3.5 \times \frac{(x - 20)}{x} \times 3 \times \pi \times \frac{12^2}{4} = 237.50 \frac{(x - 20)}{x} \text{ kN} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_c &= \sigma_m \times (x) \times b = a \times f_{cd} \times (x) \times b = a \times \frac{0.85 \times f_{ck}}{\gamma_c} \times (x) \times b \\ &= 0.81 \times \frac{0.85 \times 35}{1.5} \times (x) \times 0.10 = 1.6065 \times x \text{ kN} \end{aligned}$$

Επειδή πρέπει να ισχύει  $\sum F = F_{s1} - F_c - F_{s2} = 0 \rightarrow 128.28 - 1.6065 \times x - 237.50 \frac{(x-20)}{x} = 0 \rightarrow$

$$128.28x - 1.6065x^2 - 237.50(x - 20) = 0 \rightarrow$$

$$128.28x - 1.6065x^2 - 237.50x + 4750 = 0 \rightarrow$$

$$-1.6065x^2 - 109.22x - 4750 = 0 \rightarrow$$

$$1.6065x^2 + 109.22x - 4750 = 0$$

$$\Delta = \beta^2 - 4\alpha\gamma = 109.22^2 - 4 \times 1.6065 \times (-4750) = 42452.5084$$

$$\begin{aligned} x_{1,2} &= \frac{-\beta \pm \sqrt{\Delta}}{2\alpha} = \frac{-109.22 \pm \sqrt{42452.5084}}{2 \times 1.6065} = x_1 = 30.134 \text{ mm} \text{ ή } x_2 \\ &= -98.120 \text{ mm απορρίπτεται} \end{aligned}$$

Επομένως,  $x = 0.030134\text{m}$

#### Παραμόρφωση θλιβόμενου χάλυβα

$$\begin{aligned} \frac{\varepsilon_{c2}}{x} = \frac{\varepsilon_{s2}}{x - d_2} \rightarrow \varepsilon_{s2} &= \frac{x - d_2}{x} \times \varepsilon_{c2} \rightarrow \varepsilon_{s2} = \frac{0.030134 - 0.02}{0.030134} \times 3.5 \rightarrow \varepsilon_{s2} = 1.18 \text{ ‰} < \varepsilon_{sy} = \\ &2.17 \text{ ‰} \end{aligned}$$

Οπότε, ο θλιβόμενος χάλυβας δεν έχει διαρρέυσει.



### Παραμόρφωση εφελκόμενου χάλυβα

$$\frac{\varepsilon_{c2}}{x} = \frac{\varepsilon_{s1}}{d-x} \rightarrow \varepsilon_{s1} = \frac{d-x}{x} \times \varepsilon_{c2} \rightarrow \varepsilon_{s1} = \frac{0.13 - 0.030134}{0.030134} \times 3.5 \rightarrow \varepsilon_{s1} = 11.60 \% >$$
$$\varepsilon_{sy} = 2.17 \text{ ‰}$$

Οπότε, ο εφελκόμενος χάλυβας έχει διαρρεύσει.

Εφόσον ο εφελκόμενος χάλυβας έχει διαρρεύσει και ο θλιβόμενος όχι, η παραδοχή είναι σωστή.

### ΔΥΝΑΜΕΙΣ

Δύναμη εφελκόμενου χάλυβα  $F_{s1} = 128.28 \text{ kN}$

Δύναμη σκυροδέματος  $F_c = 0.918x = 1.6065x \cdot 0.030134 \rightarrow F_c = 48.41 \text{ kN}$

Δύναμη θλιβόμενου χάλυβα  $F_{s2} = 237.50 \frac{(x-20)}{x} = 237.50 \frac{(0.030134-0.02)}{0.030134} = 79.87 \text{ kN}$

$$\sum F = F_{s1} - F_c - F_{s2} = 0 \rightarrow 128.28 - 48.41 - 79.87 = 0 \rightarrow 0 = 0 \text{ Ισχύει}$$

### ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΟΡΙΑΚΗΣ ΡΟΠΗΣ ΚΑΙ ΜΕΓΙΣΤΟΥ ΦΟΡΤΙΟΥ

$$\alpha = \zeta x = 0.416 \times 0.030134 = 0.013 \text{ m}$$

όπου  $\zeta$  είναι ο συντελεστής κέντρου βάρους και για παραμόρφωση ίση με 3.5 ‰ είναι  $\zeta = 0.416$

$$z = d - \alpha = 0.13 - 0.013 = 0.117 \text{ m}$$

Ροπή ως προς τη στάθμη του εφελκόμενου χάλυβα:

$$M_{RD} = F_c \times z + F_{s2}(d - d_2) = 48.41 \times 0.117 + 79.87 \times (0.13 - 0.02) \rightarrow$$

$$M_{RD} = 14.45 \text{ kNm}$$

Ροπή αντοχής ως προς το κέντρο βάρους:

$$M_{RD} = F_c \left( \frac{h}{2} - a \right) + F_{s2} \left( \frac{h}{2} - d_2 \right) + F_{s1} \left( \frac{h}{2} - d_1 \right) \rightarrow$$

$$M_{RD} = 48.41 \left( \frac{0.15}{2} - 0.013 \right) + 79.87 \left( \frac{0.15}{2} - 0.02 \right) + 128.28 \left( \frac{0.15}{2} - 0.02 \right) \rightarrow$$

$$M_{RD} = 14.45 \text{ kNm}$$

Μέγιστο φορτίο

$$M_{max} = M_{RD} \rightarrow \frac{g_{IB} x l^2}{8} + \frac{P}{2} x a_s = M_{RD} \rightarrow \frac{b x h x \gamma_c x l^2}{8} + \frac{P}{2} x a_s =$$

$$M_{RD} \rightarrow \frac{0.10 x 0.15 x 25 x 1.60^2}{8} + \frac{P}{2} x 0.30 = 14.45 \rightarrow P = 95.53 \text{ kN}$$

#### 4.5 Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τους τρεις τύπους σκυροδέματος

	C20/25	C25/30	C35/45
<b>Ροπή Αντοχής (kNm)</b>	14.30	14.37	14.45
<b>Μέγιστο φορτίο (kN)</b>	94.53	95	95.5

*Πίνακας 19. Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τους τρεις τύπους σκυροδέματος*

## ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Σχηματικό διάγραμμα παρασκευής τσιμέντου (Πηγή: Βιβλίο Τεχνολογία του Σκυροδέματος - Χρίστου Μ. Οικονόμου - Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ - 4Μ" ΕΠΕ - ΤεΚΔΟΤΙΚΗ) ΣΕΛ. 15

Εικόνα 2: Απαιτήσεις μηχανικές και φυσικές οριζόμενες ως χαρακτηριστικές τιμες (Πηγή:<http://www.hcia.gr/el/cement-concrete/cement/codes-standards/>) ΣΕΛ. 17

Εικόνα 3: Συνοπτικός πίνακας ιδιοτήτων ελαφρών σκυροδεμάτων τσιμέντου (Πηγή: Βιβλίο Τεχνολογία του Σκυροδέματος - Χρίστου Μ. Οικονόμου - Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ - 4Μ" ΕΠΕ - ΤεΚΔΟΤΙΚΗ) ΣΕΛ. 25

Εικόνα 4: Γενικές ιδιότητες ελαφρών σκυροδεμάτων (Πηγή: Βιβλίο Τεχνολογία του Σκυροδέματος - Χρίστου Μ. Οικονόμου - Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ - 4Μ" ΕΠΕ - ΤεΚΔΟΤΙΚΗ) ΣΕΛ. 25

Εικόνα 5: Γραμμικός συντελεστής θερμικής διαστολής σκυροδεμάτων με αδρανή από διάφορες προελεύσεις (Πηγή: Βιβλίο Τεχνολογία του Σκυροδέματος - Χρίστου Μ. Οικονόμου - Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ - 4Μ" ΕΠΕ - ΤεΚΔΟΤΙΚΗ) ΣΕΛ. 28

Εικόνα 6: Ιδιότητες του ξυλομπετόν (Πηγή: Βιβλίο Τεχνολογία του Σκυροδέματος - Χρίστου Μ. Οικονόμου - Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ - 4Μ" ΕΠΕ - ΤεΚΔΟΤΙΚΗ) ΣΕΛ. 30

Εικόνα 7: Σχηματική παράσταση εξιδρώσεως (Πηγή: Βιβλίο Τεχνολογία του Σκυροδέματος - Χρίστου Μ. Οικονόμου - Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ - 4Μ" ΕΠΕ - ΤεΚΔΟΤΙΚΗ) ΣΕΛ. 44

Εικόνα 8: Ενδεικτική καμπύλη τάσεων - παραμορφώσεων σκυροδέματος (Πηγή: Βιβλίο Τεχνολογία του Σκυροδέματος - Χρίστου Μ. Οικονόμου - Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ - 4Μ" ΕΠΕ - ΤεΚΔΟΤΙΚΗ) ΣΕΛ. 47

Εικόνα 9: Διάγραμμα μεταβολής συντελεστή ωρίμανσης, συναρτήσεως του ποσοστού αντοχής 70% ΣΕΛ. 66

Εικόνα 10: Διάγραμμα μεταβολής συντελεστή ωρίμανσης, συναρτήσεως του ποσοστού αντοχής 73% ΣΕΛ. 67

Εικόνα 11: Διάγραμμα μεταβολής συντελεστή ωρίμανσης, συναρτήσεως του ποσοστού αντοχής 76% ΣΕΛ. 68

Εικόνα 12: Κόλουρος Κώνος ΣΕΛ. 68

Εικόνα 13: Κύβος ΣΕΛ. 69

Εικόνα 14: Κύλινδρος ΣΕΛ. 69

Εικόνα 15: Μηχανή θλίψης ΣΕΛ. 84

Εικόνα 16: Ινοπλισμένη δοκός C20/25 ΣΕΛ. 87

Εικόνα 17: Διάγραμμα φορτίου - βέλους κάμψης για C20/25 ΣΕΛ. 89

Εικόνα 18: Ινοπλισμένη δοκός C25/30 ΣΕΛ. 91

Εικόνα 19: Διάγραμμα φορτίου - βέλους κάμψης για C25/30 ΣΕΛ. 93

Εικόνα 20: Ινοπλισμένη δοκός C35/45 ΣΕΛ. 94

Εικόνα 21: Διάγραμμα φορτίου - βέλους κάμψης για C35/45 ΣΕΛ. 96

Εικόνα 22: Μηχανή κάμψης ΣΕΛ. 98

Εικόνα 23: Διατομή δοκού C20/25 και διαγράμματα τάσεων και παραμορφώσεων ΣΕΛ. 101

Εικόνα 24: Διατομή δοκού C25/30 και διαγράμματα τάσεων και παραμορφώσεων ΣΕΛ. 105

Εικόνα 25: Διατομή δοκού C35/45 και διαγράμματα τάσεων και παραμορφώσεων ΣΕΛ. 110

## **ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ**

Πίνακας 1: Κατηγορίες αντοχής σκυροδέματος ΣΕΛ. 52

Πίνακας 2: Κατηγορίες καθίζησης σκυροδέματος ΣΕΛ. 52

Πίνακας 3: Κιλά που απαιτούνται για την παρασκευή ποσότητας σκυροδέματος που ισοδυναμούν με όγκο δύο κόλourων κώνων, δύο κύβων και δύο κυλίνδρων ΣΕΛ. 61

Πίνακας 4: Απαιτούμενες ποσοτικές αντοχές σκυροδέματος για ξεκαλούπωμα και μέσες θερμοκρασίες σε °C ΣΕΛ. 65

Πίνακας 5: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τους τρεις τύπους σκυροδέματος ΣΕΛ. 71

Πίνακας 6: Ελάχιστο πλήθος δειγμάτων που λαμβάνεται ανά παρτίδα (Πηγή: Εργαστηριακές Ασκήσεις Οπλισμένου Σκυροδέματος - Κωνσταντίνος Δημάκος) ΣΕΛ. 73

Πίνακας 7: Κριτήρια συμμόρφωσης εξωτερικού ελέγχου (ταυτοποίησης) για θλιπτική αντοχή για το εργοστασιακό σκυρόδεμα με πιστοποίηση ελέγχου παραγωγής (Πηγή: Εργαστηριακές Ασκήσεις Οπλισμένου Σκυροδέματος - Κωνσταντίνος Δημάκος) ΣΕΛ. 74

Πίνακας 8: Κριτήρια συμμόρφωσης εξωτερικού ελέγχου για θλιπτική αντοχή για το εργοστασιακό σκυρόδεμα χωρίς πιστοποίηση ελέγχου παραγωγής (Πηγή: Εργαστηριακές Ασκήσεις Οπλισμένου Σκυροδέματος - Κωνσταντίνος Δημάκος) ΣΕΛ. 75

Πίνακας 9: Κριτήρια συμμόρφωσης εξωτερικού ελέγχου για θλιπτική αντοχή για το εργοταξιακό σκυρόδεμα τις τρεις πρώτες ημέρες διάσρωσης (Πηγή: Εργαστηριακές Ασκήσεις Οπλισμένου Σκυροδέματος - Κωνσταντίνος Δημάκος) ΣΕΛ. 76

Πίνακας 10: Κριτήρια συμμόρφωσης εξωτερικού ελέγχου για θλιπτική αντοχή για το εργοταξιακό σκυρόδεμα μετά την τρίτη ημέρα διάσρωσης (Πηγή: Εργαστηριακές Ασκήσεις Οπλισμένου Σκυροδέματος - Κωνσταντίνος Δημάκος) ΣΕΛ. 76

Πίνακας 11: Αποτελέσματα δοκιμής αξονικής θλίψης για σκυρόδεμα C20/25 ΣΕΛ. 77

Πίνακας 12: Αποτελέσματα δοκιμής αξονικής θλίψης για σκυρόδεμα C25/30 ΣΕΛ. 79

Πίνακας 13: Αποτελέσματα δοκιμής αξονικής θλίψης για σκυρόδεμα C35/45 ΣΕΛ. 82

Πίνακας 14: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για του τρεις τύπους σκυροδέματος ΣΕΛ. 85

Πίνακας 15: Αποτελέσματα μηχανής κάμψης για ινοπλισμένη δοκό C20/25 ΣΕΛ. 89

Πίνακας 16: Αποτελέσματα μηχανής κάμψης για ινοπλισμένη δοκό C25/30 ΣΕΛ. 92

Πίνακας 17: Αποτελέσματα μηχανής κάμψης για ινοπλισμένη δοκό C35/45 ΣΕΛ. 96

Πίνακας 18: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τους τρεις τύπους σκυροδέματος ΣΕΛ. 99

Πίνακας 19: Συγκεντρωτικά αποτελέσματα για τους τρεις τύπους σκυροδέματος ΣΕΛ. 114

## **ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ**

- Τεχνολογία του Σκυροδέματος - Χρίστου Μ. Οικονόμου - Εκδόσεις ΣΕΛΚΑ - 4Μ" ΕΠΕ - ΤεΚΔΟΤΙΚΗ
- Δομικά Υλικά - Αθανάσιος Χ. Τριανταφύλλου - Πάτρα 2013 - 10η Έκδοση
- Σκυρόδεμα - P. KumarMehta - PauloJ. M. Monteiro - Εκδόσεις Κλειδάριθμος
- <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%91%CE%B4%CF%81%CE%B1%CE%BD%CE%AE%CF%85%CE%BB%CE%B9%CE%BA%CE%AC>
- <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CE%BA%CF%85%CF%81%CF%8C%CE%B4%CE%B5%CE%BC%CE%B1>
- <https://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A4%CF%83%CE%B9%CE%BC%CE%AD%CE%BD%CF%84%CE%BF>
- <http://www.hcia.gr/el/cement-concrete/cement/codes-standards/>
- [http://www.totalstation.gr/images/stories/virtuemart/product/\\_\\_\\_\\_\\_4b447618ac3cd.jpg](http://www.totalstation.gr/images/stories/virtuemart/product/_____4b447618ac3cd.jpg)
- <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRoMdbU--f7wxzpBRY7XF1mkSaLGF19TvqZeoLdaBiK6gGAqicf5z5FmS1goWUOshfCzos&usqp=CAU>