



## **ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ  
(Δ.Π.Μ.Σ.):

**"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"**

### **ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΕΡΕΟΥ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΕΚΠΛΥΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΤΟΙΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**



#### **ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

**ΓΕΩΡΓΙΟΥ Φ. ΤΣΑΓΓΑΡΗ**

Διπλωματούχου Χημικού Μηχανικού Ε.Μ.Π.

**ΕΠΙΒΛΕΨΗ:**

**Σ. ΤΣΙΜΑΣ**

Καθηγητής Ε.Μ.Π.

**ΑΘΗΝΑ, Ιούλιος 2012**



# **ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ  
ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.):

**"ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ"**

## **ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΑΞΙΟΠΟΙΗΣΗΣ ΣΤΕΡΕΟΥ ΥΠΟΛΕΙΜΜΑΤΟΣ ΤΟΥ ΝΕΡΟΥ ΕΚΠΛΥΣΗΣ ΟΧΗΜΑΤΩΝ ΜΕΤΑΦΟΡΑΣ ΕΤΟΙΜΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ**

### **ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ**

ΓΕΩΡΓΙΟΥ Φ. ΤΣΑΓΓΑΡΗ

Διπλωματούχου Χημικού Μηχανικού Ε.Μ.Π.

### **ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:**

Σ. ΤΣΙΜΑΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Σ. ΤΣΙΒΙΛΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Κ. ΤΣΑΚΑΛΑΚΗΣ, Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, Ιούλιος 2012

## Πίνακας Περιεχομένων

Περίληψη.....	5
Summary.....	7
1. Θεωρητικό μέρος .....	9
1.1. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ (Πρώτες Ύλες και Ιδιότητες) .....	10
1.1.1.Ορολογία σκυροδέματος, Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 206 .....	10
1.1.2.Πρώτες ύλες Σκυροδέματος.....	11
1.1.3.Αδρανή .....	11
1.1.3.1. Κατάταξη Αδρανών .....	12
1.1.3.2. Είδη Αδρανών.....	13
1.1.3.3.Πορώδες αδρανών .....	16
1.1.3.4.Κοκκομετρική διαβάθμιση (η επί της % σύνθεση του αδρανούς σε κόκκους διαφόρων μεγεθών).....	16
1.1.3.5.Χημικά χαρακτηριστικά αδρανών.....	17
1.1.4.Τσιμέντο .....	18
1.1.4.1.Παραγωγή .....	18
1.1.4.2.Τύποι τσιμέντου .....	19
1.1.4.3.Κατηγορίες αντοχής τσιμέντων.....	20
1.1.4.4.Κατάταξη με βάση τις ιδιότητές του .....	20
1.1.4.5.Ενυδάτωση του τσιμέντου .....	21
1.1.5.Χημικά Πρόσμικτα (Admixtures).....	21
1.1.6.Πρόσθετα (additives) .....	22
1.1.7.Νερό Ανάμιξης και Νερό Συντήρησης.....	23
1.1.7.1. Νερό ανάμιξης.....	23
1.1.7.2.Νερό Συντήρησης.....	26
1.1.7.3.Δοκιμές στο νερό.....	26
1.1.8.Λόγος Νερού-Τσιμέντου .....	26
1.1.8.1.Πως ο λόγος W/C επηρεάζει τις αντοχές του σκυροδέματος.....	27
1.1.8.2.Απαιτήσεις νερού ενυδάτωσης.....	29
1.1.8.3.Απαιτήσεις νερού στο σκυρόδεμα.....	29
1.1.8.4.Μίγματα που περιέχουν πυριτική παιπάλη .....	31

1.1.8.5. Παράγοντες εκτός του λόγου w/c.....	32
1.1.8.6. Επίδραση της Ζώνης Μετάβασης .....	32
1.1.8.7. Επίδραση των δεσμών .....	33
1.1.8.8. Ρεολογικές πτυχές του λόγου w/c .....	34
1.1.8.9. Αντοχές των κονιαμάτων και του σκυροδέματος.....	36
1.1.9. Εργασιμότητα Σκυροδέματος .....	39
1.1.9.1. Σχετική Ορολογία .....	39
1.1.9.2. Ομοιομορφία Σκυροδέματος .....	41
1.1.9.3. Μέτρηση της Εργασιμότητας με Εμπειρικές Ποσοτικές Μεθόδους.....	42
1.1.9.4. Συνοχή, Διαχωρισμός και Ευστάθεια.....	50
1.1.9.5. Ποιοτικός Έλεγχος με Δοκιμές Ρεολογίας.....	50
1.1.9.6. Ρεολογία Σκυροδεμάτων Υψηλής Απόδοσης.....	51
1.1.9.7. Απώλεια Εργασιμότητας .....	52
1.1.10. Το Πορώδες του Σκυροδέματος.....	54
1.2. Ασβεστολιθικό Πληρωτικό Υλικό (Filler) .....	56
1.2.1. Ασβεστόλιθος.....	56
1.2.2. Χρήση Ασβεστολιθικού Πληρωτικού Υλικού (Filler) .....	57
1.2.3. Προδιαγραφές Ασβεστολιθικού Πληρωτικού Υλικού (Filler).....	59
1.3. Ανακύκλωση νερού Έκπλυσης οχημάτων μεταφοράς έτοιμου σκυροδέματος.....	60
1.3.1. Επαναχρησιμοποίηση Νερού Έκπλυσης-Διεθνής Εμπειρία .....	60
1.3.2. Επαναχρησιμοποίηση Νερού Έκπλυσης-Ελληνικός Χώρος .....	61
1.3.3. Χρήση ανακυκλωμένου νερού- Ανασκόπηση της Διεθνούς Έρευνας .....	62
2. Πειραματικό Μέρος .....	65
2.1. Τοποθέτηση Θέματος.....	66
2.1.1. Πειραματική διαδικασία .....	67
2.2. Χαρακτηρισμός και Προετοιμασία Πρώτων Υλών .....	68
2.2.1. Χαρακτηρισμός Λούμης .....	68
2.2.1.1. Χημική ανάλυση Λούμης.....	69
2.2.1.2. Ορυκτολογική ανάλυση λούμης .....	70
2.2.1.3. Θερμική ανάλυση λούμης.....	70
2.2.1.4. Οπτική ανάλυση λούμης.....	72
2.2.1.5. Προεργασία λούμης- κοκκομετρική κατανομή.....	73
2.2.2. Χαρακτηρισμός Τσιμέντου-Χημική και Κοκκομετρική Ανάλυση .....	75
2.2.3. Προεργασία και Ανάλυση Άμμου .....	76

2.2.3.1.Υγρή Κοσκίνιση.....	76
2.2.3.2.Ισοδύναμο Άμμου .....	77
2.3. Πειραματική Διαδικασία .....	78
2.3.1.Περιγραφή Διεξαγωγής Πειραμάτων.....	78
2.3.1.1.Κωδικοποίηση Συνθέσεων .....	79
2.3.2. Σταθερό w/c - 1 <sup>η</sup> Σειρά Συνθέσεων.....	80
2.3.3. Σταθερή Εξάπλωση - 2 <sup>η</sup> Σειρά Συνθέσεων .....	89
2.3.4. Σύγκριση Αποτελεσμάτων 1 <sup>ης</sup> και 2 <sup>ης</sup> Σειράς .....	95
2.3.5. Ποσοτικοποίηση των Ποιοτικών Συμπερασμάτων-Στατιστική Μέθοδος Taguchi .	100
2.4. Συμπεράσματα .....	103
Βιβλιογραφία .....	106

## Περίληψη

Στόχο της συγκεκριμένης μελέτης αποτελεί η αξιοποίηση της λάσπης που προκύπτει από την ανακύκλωση του νερού έκπλυσης των οχημάτων μεταφοράς νωπού σκυροδέματος σε μία μονάδα παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος. Σκοπός είναι η λάσπη (λούμη) αυτή να χρησιμοποιηθεί, είτε ως έχει, είτε μετά από ξήρανση, ως ασβεστολιθικό filler για την παραγωγή σκυροδέματος. Στο πλαίσιο των πειραμάτων, παρασκευάζονται τσιμεντοκονιάματα τα οποία διαφέρουν είτε ως προς την περιεκτικότητα σε ασβεστολιθική παιπάλη είτε ως προς την ποσότητα του νερού ανάμιξης.

Το θεωρητικό μέρος αυτής της εργασίας χωρίζεται σε τρία κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο, γίνεται μία αναφορά στο Ευρωπαϊκό πρότυπο βάσει του οποίου ορίζονται οι σχετικές με το σκυρόδεμα έννοιες, καταγράφονται οι πρώτες ύλες για την παρασκευή του, αναλύεται η επίδραση του λόγου w/c σε μία σειρά από ιδιότητες και προσδιορίζεται η σημασία της εργασιμότητας. Στο δεύτερο κεφάλαιο, αναλύεται η χρήση και η σημασία του ασβεστολιθικού πληρωτικού υλικού (limestone filler) και καταγράφονται τα πρότυπα τα οποία διέπουν τη χρήση του στη παρασκευή σκυροδέματος. Στο τρίτο κεφάλαιο γίνεται αναφορά στο περιβαλλοντικό πρόβλημα που προκύπτει από την απόρριψη στο περιβάλλον του νερού έκπλυσης των μηχανημάτων παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος (διεθνώς αλλά και στον ελλαδικό χώρο), καταγράφονται οι προσπάθειες ανακύκλωσης του νερού έκπλυσης από της μονάδες παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος και τέλος γίνεται ανασκόπηση των πειραματικών ερευνών που έχουν γίνει γύρω από το θέμα.

Το πειραματικό μέρος χωρίζεται σε τέσσερα κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται μία προσπάθεια εξήγησης των λόγων που οδήγησαν στην πραγματοποίηση αυτής της μελέτης, όπως επίσης αναφέρονται με συνοπτικό τρόπο όλα τα στάδια της πειραματικής διαδικασίας (προεργασία, προκαταρκτικές αναλύσεις, συνθέσεις κονιαμάτων). Στο δεύτερο κεφάλαιο καταγράφεται ο χαρακτηρισμός των πρώτων υλών που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή των τσιμεντοκονιαμάτων. Ο χαρακτηρισμός της λούμης έγινε με χημική (XRF), ορυκτολογική (XRD), θερμική (TG-DTG) και οπτική (SEM) ανάλυση. Το τσιμέντο που χρησιμοποιήθηκε, τύπου CEM I 42,5, χαρακτηρίστηκε με χημική ανάλυση (XRF). Η άμμος που χρησιμοποιήθηκε για τις συνθέσεις υποβλήθηκε στη δοκιμή 'ισοδύναμο άμμου'. Επίσης γίνεται καταγραφή της προεργασίας που έγινε στη λούμη ώστε να χρησιμοποιηθεί στα πειράματα (ξήρανση, αποσυσσωμάτωση) καθώς και στην προεργασία που έγινε στην άμμο που χρησιμοποιήθηκε (υγρή κοσκίνιση).

Το τρίτο κεφάλαιο του πειραματικού αφορά στην κύρια πειραματική διαδικασία. Αρχικά αναφέρονται συνοπτικά τα στάδια διεξαγωγής των πειραμάτων (ζύγιση, ανάμιξη, μέτρηση εξάπλωσης, μέτρηση αντοχών). Στη συνέχεια γίνεται η ομαδοποίηση των πειραμάτων σε 2 σειρές. Η πρώτη σειρά πειραμάτων αφορά συνθέσεις οι οποίες παρασκευάστηκαν ώστε να έχουν τον ίδιο λόγο w/c, και διαφέρουν μόνο ως προς την περιεκτικότητα σε ασβεστολιθική παιπάλη (filler άμμου και λούμη). Στη δεύτερη σειρά επαναλήφθηκαν τα πιο χαρακτηριστικά πειράματα της πρώτης με τη διαφορά ότι ο λόγος w/c άλλαξε από σύνθεση σε σύνθεση ώστε να παραμείνει σταθερή η εξάπλωση. Και για τις δύο σειρές πειραμάτων δίδονται: i) αναλυτικοί πίνακες όπου καταγράφονται οι περιεκτικότητες αλλά και οι ακριβείς ποσότητες των πρώτων υλών σε κάθε σύνθεσης, ii) πίνακες αποτελεσμάτων όπου

καταγράφονται η εξάπλωση και οι θλιπτικές και καμπτικές αντοχές για κάθε σύνθεση, iii) διαγράμματα για κάθε σειρά και iv) συγκριτικά διαγράμματα των δύο σειρών καθώς επίσης ακολουθεί και σχολιασμός αυτών. Τέλος, με χρήση της στατιστικής μεθόδου Taguchi γίνεται μία προσπάθεια ποσοτικοποίησης των ποιοτικών συμπερασμάτων που εξήχθησαν παραπάνω.

Το τελευταίο κεφάλαιο αναφέρεται στα συμπεράσματα της παρούσας μελέτης. Αποδείχθηκε, πως η περιεκτικότητα της λούμης γενικά δεν επηρεάζει τις θλιπτικές αντοχές, εάν και περιέχεται σε μικρές ποσότητες στις συνθέσεις αλλά αρκετά μεγάλες ως αιωρούμενο στερεό στο νερό (10000 και 50000 ppm). Με την αύξηση της περιεκτικότητας του filler, παρατηρούνται αυξομειώσεις των θλιπτικών αντοχών οι οποίες ερμηνεύονται εκτενώς στα αντίστοιχα κεφάλαια. Για περιεκτικότητα 20% σε filler και 10000 ppm σε λούμη παρατηρούνται οι βέλτιστες θλιπτικές αντοχές. Επίσης με αύξηση του λόγου w/c παρατηρείται μείωση των θλιπτικών αντοχών. Τέλος, οι εξαπλώσεις μειώνονται με την αύξηση της ασβεστολιθικής παιπάλης και τη μείωση του λόγου w/c.

## Summary

The aim of this study is to examine the potential uses of sludge obtained from the water used to wash out vehicles transporting fresh concrete in a ready-mix concrete plant. The purpose is to utilize the sludge, either as it is or dried, as limestone filler for concrete production. As part of the experiments, cement mortars have been produced, which differ either in content of limestone filler or in the amount of mixing water.

The theoretical part of this work is divided into three chapters. In the first chapter includes the European standard which defines the relevant concepts concrete, the raw materials for concrete production, the effect of w/c ratio on a set of properties and the determination of workability. In the second chapter, the use and the importance of the limestone filler are discussed and the standards governing its use in making concrete are recorded. The third chapter refers to the environmental problem resulting from the waste water from the washing of concrete mix equipment discharge into the environment (internationally and in Greece) and to the efforts made concerning the recycling of this water. In addition, in the same chapter the experimental investigations that have been concluded on this subject are recorded.

The experimental part is divided into four chapters. The first chapter explains the reasons for conducting this study and all stages of the experimental procedure are reported in summary form. In the second chapter the characterization of raw materials used in the manufacture of cement mortars is recorded. The characterization of sludge was chemical (XRF), mineralogical (XRD), thermal (TG-DTG) and optical (SEM). The cement used was type CEM I 42,5 and it was characterized by chemical analysis. The sand used in the compositions was submitted to the test sand equivalent. In this chapter the preparation done for sludge to be used in the experiments (drying, disaggregation) was also recorded as well as the preparation of the sand (wet sieving).

The third chapter of the experimental part deals with the main experiments. Initially, all stages of the experiments are summarized (weighing, mixing, flow table tests, measurements of strength). Then, experiments are grouped in 2 sets. The first set concerns compositions which were designed to have the same w/c ratio and differ only as to the content of limestone materials (limestone filler and sludge). At the second set the most notable experiments of the first set are repeated, the difference is that in this set every composition has different w/c ratio but the same spread. For both sets of experiments this study provides: i) detailed tables which are listing the contents and the exact amount of raw materials in each composition, ii) result tables which are listing the spread and compressive and bending strengths for each composition, iii) schematic diagrams for each set and iv) comparative diagrams of the two sets as well as comments on them. Lastly, the statistical method Taguchi was applied on the results in order to quantify the qualitative results of the research.

In the last section the conclusions of this studied are given, which demonstrated that the content of sludge generally does not affect the compressive strength. With increasing content of filler, there are variations of compressive strength which can largely be explained.



However, for 20% filler content and 10000 ppm in sludge the best set of compressive strength has been observed. Also with increase in the w/c ratio the compressive strength is decreasing. The spread decreased with increasing of limestone filler or decreased w/c ratio.

# **1. Θεωρητικό μέρος**

## 1.1. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ (Πρώτες Ύλες και Ιδιότητες)

Το σκυρόδεμα είναι ένα υλικό που χρησιμοποιείται σε ένα αρκετά εκτεταμένο εύρος διαφορετικών ποιοτήτων για το σύνολο σχεδόν των κατασκευαστικών έργων. Η σπουδαιότητα των ιδιοτήτων του σκυροδέματος στην ασφάλεια ενός δομικού έργου είναι διαφορετική και εξαρτάται από το είδος της κατασκευής, το περιβάλλον που αυτή θα εκτεθεί και την ειδική χρήση που αυτή θα έχει. Έτσι άλλες απαιτήσεις υπάρχουν για το σκυρόδεμα από το οποίο θα κατασκευαστεί ένα φράγμα άλλες για μία οικοδομή, για μία υποθαλάσσια κατασκευή, για μία γέφυρα ή για το πηγάδι μιας γεώτρησης. Οι διαφορές επίσης στις ιδιότητες του σκυροδέματος εξαρτώνται από τη μεθοδολογία παρασκευής του, την ποιότητα των πρώτων υλών και μεταβάλλονται σημαντικά σε συνάρτηση με την βασική του ιδιότητα που είναι οι αντοχές του. Κεφαλαιώδους όμως σημασίας για την πρόβλεψη όλης της μετέπειτα συμπεριφοράς και των ιδιοτήτων του σκυροδέματος είναι η εμφάνιση στην βασική του πρώτη ύλη που είναι το τσιμέντο και το οποίο σε πολύ μεγάλο βαθμό είναι υπεύθυνο για την ανθεκτικότητας της κατασκευής από το σκυρόδεμα.[1]

### 1.1.1.Ορολογία σκυροδέματος, Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 206

Το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 206 περιλαμβάνει 49 ορισμούς σχετικούς με το σκυρόδεμα. Οι πιο σημαντικοί εξ αυτών παρατίθενται παρακάτω.

- **Σκυρόδεμα** είναι το υλικό που σχηματίζεται από την ανάμειξη τσιμέντου, χονδρόκοκκων και λεπτόκοκκων αδρανών και νερού, ( με ή χωρίς την ενσωμάτωση των υλικών που χαρακτηρίζονται πρόσθετα ή βελτιωτικά), το οποίο αναπτύσσει τις ιδιότητές του με την σκλήρυνση της πάστας του τσιμέντου (τσιμέντο και νερό).
- **Φρέσκο (Νωπό) (fresh) σκυρόδεμα** είναι το σκυρόδεμα που μόλις έχει παρασκευασθεί περιέχοντας όλα τα συστατικά του και το οποίο είναι ακόμα σε πλαστική κατάσταση δυνάμενο να συμπυκνωθεί και να μορφοποιηθεί στα καλούπια.
- **Σκληρυμένο (hardened) σκυρόδεμα** είναι αυτό που βρίσκεται σε στερεά κατάσταση και έχει ήδη αναπτύξει αντοχές.
- **Επιτόπου παρασκευασμένο (site mixed) σκυρόδεμα** είναι αυτό που δημιουργείται στον τόπο της εφαρμογής.
- **Έτοιμο (ready mixed) σκυρόδεμα** είναι αυτό που έχει παρασκευασθεί σε ένα σταθερό ή κινούμενο αναμικτήρα και προσάγεται φρέσκο στον τόπο εφαρμογής του.
- **Κανονικού βάρους σκυρόδεμα** είναι αυτό που έχει μία πυκνότητα μεταξύ 2100 και 2600 Kg/m<sup>3</sup>, ενώ **ελαφροβαρές** είναι το σκυρόδεμα με πυκνότητα μεταξύ 800 και 2100 Kg/m<sup>3</sup> που προκύπτει από την χρησιμοποίηση ελαφροβαρών αδρανών και **βαρύ σκυρόδεμα** όταν η πυκνότητά του είναι μεγαλύτερη των 2600 Kg/m<sup>3</sup>.
- **Υψηλών αντοχών** είναι το σκυρόδεμα με θλιπτικές αντοχές μεγαλύτερης της τάξης C55/67 στην περίπτωση του κανονικού βάρους και του βαρέως σκυροδέματος και LC55/60 για την περίπτωση του ελαφροβαρούς σκυροδέματος.

- **Αδρανή** είναι τα υλικά που συνίσταται από άθραυστες ή θραυστές φυσικές ή τεχνητές ορυκτές ύλες κατάλληλες για χρήση στο σκυρόδεμα. Διακρίνονται σε κανονικού βάρους με πυκνότητα σωματιδίων μεταξύ 2000 και 3000 Kg/m<sup>3</sup> όταν προσδιορίζονται με το πρότυπο prEN 1097-6, σε ελαφροβαρή αδρανή όταν η πυκνότητα είναι μικρότερη των 2000 Kg/m<sup>3</sup> και σε βαριά αδρανή όταν η πυκνότητα είναι μεγαλύτερη των 3000Kg/m<sup>3</sup>.
- **Βελτιωτικό ή πρόσμικτο (admixture)** είναι το λεπτώς διαμερισμένο ανόργανο υλικό που χρησιμοποιείται στο σκυρόδεμα στοχεύοντας είτε να βελτιώσει κάποιες ιδιότητες είτε να πετύχει συγκεκριμένες ιδιότητες. Διακρίνονται στα σχεδόν αδρανή πρόσθετα και στα πρόσθετα με ποζολανικές ιδιότητες.
- **Λόγος νερού προς τσιμέντο (W/C ratio)** είναι η κατά βάρος αναλογία του δραστικού νερού προς το τσιμέντο στο φρέσκο σκυρόδεμα.
- **Χαρακτηριστική αντοχή** είναι η τιμή εκείνη της αντοχής κάτω από την οποία αναμένεται να ευρίσκονται το 5% από το σύνολο των προσδιορισμών αντοχών.[2]

### 1.1.2.Πρώτες ύλες Σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα είναι ένα τεχνητό δομικό υλικό που παρασκευάζεται με την ανάμιξη τσιμέντου, αδρανών σκύρων και νερού το οποίο στερεοποιείται με την χημική ένωση του νερού με το τσιμέντο (ενυδάτωση), εγκλωβίζοντας μέσα στην μάζα του τα αδρανή υλικά. Ο όρος αδρανή περιλαμβάνει γενικά την άμμο, το γαρμπίλι και τα σκύρα ή χαλίκια. Εκτός από τα υλικά αυτά, με το νέο Ευρωπαϊκό πρότυπο (EN 206), προβλέπεται η προσθήκη και άλλων ομάδων συστατικών (βελτιωτικά πρόσθετα-admixtures και πρόσθετα συστατικά- additions) με διαφορετική αποστολή και διαφορετικό μηχανισμό κάθε μία, τροποποιούν κατά συγκεκριμένο τρόπο μερικές από τις ιδιότητες τους.[1]

### 1.1.3.Αδρανή

Αδρανή υλικά (άμμος, χαλίκι, γαρμπίλι, σκύρα) καλούνται τα υλικά που αποτελούνται από λίθινους κόκκους, είτε φυσικούς οπότε ονομάζονται «φυσικά ή συλλεκτά» αδρανή, είτε από κόκκους που προκύπτουν από τη θραύση όγκων πετρώματος ή τη θραύση φυσικών αδρανών οπότε ονομάζονται «Θραυστά» αδρανή. Όταν λέμε αδρανή υλικά εννοούμε εκείνα που προέρχονται από τη φύση, τα λατομεία ή τα ορυχεία. Η ονομασία "αδρανή" δόθηκε στα υλικά αυτά με την έννοια ότι κατά την ανάμιξή τους με συγκολλητικά υλικά (κονίες), όπως τσιμέντο, ασβέστης, άσφαλτος κλπ, ή το νερό, τα υλικά αυτά δεν συμμετέχουν ενεργά στις διαδικασίες πήξης και σκλήρυνσης. Βέβαια αυτό δεν ανταποκρίνεται εντελώς στην πραγματικότητα, διότι η χημική αδράνεια των υλικών αυτών εξαρτάται από την ορυκτολογική τους σύσταση και τα υλικά με τα οποία έρχονται σε επαφή.

Τα αδρανή υλικά προέρχονται από τη φύση, ποτάμια, παραλίες,(φυσικά ή φερτά ή συλλεκτά), τα λατομεία και τα ορυχεία (θραυστά). Πολλές φορές δημιουργούνται από το σπάσιμο πετρωμάτων ή χονδρών φυσικών αδρανών (σπαστά). Από τα λατομεία λαμβάνονται με εξόρυξη ενώ από τα ορυχεία λαμβάνονται ως έχουν. Συνήθως είναι λίθινα, αλλά σε σπάνιες περιπτώσεις μπορεί να είναι μεταλλικά ή πλαστικά.

Οι κύριες κατηγορίες πετρωμάτων που χρησιμοποιούνται για αδρανή είναι **τα μαγματικά πετρώματα** όπως οι γρανίτες, οι διορίτες, οι γάββροι, οι ρυόλιθοι, οι ανδεσίτες, οι δακίτες και οι βασάλτες, **τα ιζηματογενή πετρώματα** όπως οι Αμμοχαλικώδεις αποθέσεις και οι ασβεστόλιθοι, **τα μεταμορφωμένα πετρώματα**, οι γνεύσιοι (ορθογνεύσιοι) και οι χαλαζίτες. Τα συνηθέστερα πετρώματα που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή αδρανών υλικών στη χώρα μας είναι τα *ασβεστολιθικά*, οι κύριοι λόγοι για την εφαρμογής τους είναι οι ικανοποιητικές μηχανικές αντοχές που παρουσιάζουν στις συνήθεις κατασκευές, το μικρό κόστος θραύσης τους και η αφθονία τους στα περισσότερα μέρη του Ελλαδικού χώρου.[3]

### 1.1.3.1. Κατάταξη Αδρανών

Τα αδρανή υλικά χωρίζονται με βάση, την **προέλευση**, την **πηγή λήψης**, **Το μέγεθος των κόκκων** και **το ειδικό βάρος**. Ανάλογα με την **προέλευσή τους** χωρίζονται σε φυσικά, τεχνητά ή βιομηχανικά και ανακυκλωμένα. Τα περισσότερα αδρανή φυσικής προέλευσης εξορύσσονται από λατομεία με τη θραύση βράχων. Τα συνηθέστερα φυσικά αδρανή είναι η άμμος (άμμος σπαστός), η αμμοκονία (άμμος θαλάσσης), ο περλίτης, το χαλίκι, η ελαφρόπετρα και ο αμιάντος. Τεχνητά ή Βιομηχανικά αδρανή είναι η σκωρία υψικαμίνων, το κουρασάνι, ο μπετονίτης και ο περλίτης. Σήμερα χρησιμοποιούνται και τεχνητά αδρανή υλικά που προέρχονται από ραδιενεργά απόβλητα. Ανακυκλωμένα είναι τα αδρανή υλικά που προέρχονται κυρίως από κατεδαφίσεις κτιρίων.

Βάσει την **πηγή λήψης**, τα αδρανή χωρίζονται σε φυσικά ή συλλεκτικά και στα αδρανή λατομείων. Συλλεκτά ονομάζονται αυτά που μαζεύονται στη φύση χωρίς να χρειαστεί η θραύση πετρωμάτων. Συνηθέστερος τύπος εναπόθεσης και συλλογής τέτοιων τριμμάτων είναι τα ποτάμια. Αδρανή Λατομείων αποτελούν τα πετρώματα που αποσπώνται από τη βραχομάζα και υπόκειται σε επεξεργασία.

Τα αδρανή υλικά ανάλογα με το **μέγεθος των κόκκων** τους, τα διακρίνουμε στις εξής βασικές κατηγορίες, παιτάλη με μέγεθος μικρότερο των 0,25 mm, άμμος με μέγεθος από 0,25, έως 7 mm και χαλίκι με μέγεθος 7 έως 70 mm.

Βάση **του ειδικού τους βάρους** τα αδρανή χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες. Αδρανή κανονικού ειδικού βάρους χαρακτηρίζονται αυτά με ειδικό βάρος από 2 έως 3 g/cm<sup>3</sup>. Ελαφροβαρή είναι αυτά τα αδρανή που παρουσιάζουν ειδικό βάρος μικρότερο από 2 g/cm<sup>3</sup> και κατατάσσονται σε κατηγορίες όπως φυσικά ελαφρά αδρανή, επεξεργασμένα δομικά ελαφρά αδρανή, παραπροϊόντα ως ελαφρά αδρανή και επεξεργασμένα μονωτικά υπέρλαφρα αδρανή. Βαρέα είναι αυτά τα αδρανή που παρουσιάζουν ειδικό βάρος μεγαλύτερο από 3g/cm<sup>3</sup>, προέρχονται από ορυκτά όπως ο βαρύτης, ο μαγνητίτης, ο αιματίτης και ο ιλμενίτης.[3]

### 1.1.3.2. Είδη Αδρανών

#### α. Λιθοτρίμματα

Είναι γενικά πετρώματα ασβεστόλιθου ή δολομίτη που έχουν συνθλιβεί και βαθμολογούνται με οθόνες σε ορισμένες τάξεις μεγέθους. Χρησιμοποιούνται ευρέως σε σκυρόδεμα και ως επίστρωση για δρόμους, μερικές φορές με πίσσα που εφαρμόζεται πάνω τους. Τα λιθοτρίμματα μπορεί επίσης να είναι κατασκευασμένα από γρανίτη και άλλα πετρώματα. Συνήθως παράγονται από την εξόρυξη κατάλληλης κατάθεσης βράχου και το σπάσιμο των πετρωμάτων που μετακινούνται προς τα κάτω στο επιθυμητό μέγεθος χρησιμοποιώντας θραυστήρες. Είναι διαφορετικά από το χαλίκι που παράγεται από τις φυσικές διαδικασίες της αποσάθρωσης και διάβρωσης, και συνήθως έχει ένα πιο στρογγυλεμένο σχήμα. Γωνιακά λιθοτρίμματα είναι το βασικό υλικό για την κατασκευή οδών πισσωμένων. Θρυμματισμένη φυσική πέτρα χρησιμοποιείται επίσης ομοίως χωρίς συνδετική ουσία για σιδηρόδρομους, έρμα σιδηροτροχιών, και το φίλτρο πέτρα. Μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί με ένα συνδετικό υλικό σε ένα σύνθετο υλικό, όπως σκυρόδεμα, ασφαλτο.

#### β. Μάρμαρο

Το Μάρμαρο είναι ένας Ασβεστόλιθος που χρησιμοποιείται στα κονιάματα ως αδρανές υλικό και που ανήκει στην κατηγορία των ανθρακικών πετρωμάτων. Γενικά με τον όρο Μάρμαρο εννοούμε ένα εμπορικό προϊόν, που είναι κατά κύριο λόγο ένα διακοσμητικό πέτρωμα. Μάρμαρο συνήθως εννοούμε το πέτρωμα, που αφού κοπεί τεμαχίζεται και λειανθεί χρησιμοποιείται στην οικοδομική ή την γλυπτική. Το Μάρμαρο έχει προέλθει από ανθρακικά πετρώματα μετά από ανακρυστάλλωση του κυριότερου συστατικού του, του ασβεστίτη ( $\text{CaCO}_3$ ). Τα χαρακτηριστικά των μαρμάρων που ενδιαφέρουν στην παραγωγή των ξηρών κονιαμάτων είναι η χημική και ορυκτολογική τους σύσταση, η αντοχή και η σκληρότητά τους και η απορροφητικότητα.

#### γ. Χαλίκι

Οι μεγάλες αποθέσεις είναι ένα κοινό χαρακτηριστικό γεωλογικό, που σχηματίστηκαν ως αποτέλεσμα της αποσάθρωσης και διάβρωσης των πετρωμάτων. Η δράση των ποταμών και των κυμάτων τείνει ώστε να γίνεται δυνατή η συσσώρευση χαλικιού σε μεγάλες ποσότητες. Αυτό μπορεί μερικές φορές να οδηγήσει σε χωμάτινες συσσωρεύσεις λόγω της συμπύεσης και να σκυροδετηθούν σε περιοχές ιζηματογενούς πετρώματος ετερογενών δραστηριοτήτων. Σε περίπτωση φυσικών αποθέσεων, το χαλίκι είναι ανεπαρκές για την ανθρώπινη χρήση και συχνά παράγεται από τα λατομεία και με σύνθλιψη από ανθεκτικά πετρώματα, όπως ο ψαμμίτης, ασβεστόλιθος, ή βασάλτη. Οι τόποι εξαγωγής χαλικιού είναι γνωστοί ως λατομεία. Η Νότια Αγγλία διαθέτει ιδιαίτερα μεγάλες συγκεντρώσεις εξαιτίας της εκτεταμένης εναπόθεσης του χαλικιού στην περιοχή κατά τη διάρκεια των παγετώνων. Το αμμοχάλικο είναι ένας βράχος που έχει ένα συγκεκριμένο εύρος μεγέθους σωματιδίων. Συγκεκριμένα, πρόκειται για οποιοδήποτε χαλαρό πέτρωμα που είναι μεγαλύτερο από 2 mm (0,079 in) σε μικρότερη διάσταση (περίπου 1 / 12 της ίντσας) και δεν υπερβαίνει τα 64

χιλιοστά (2,5 in). Η αμέσως μικρότερη κατηγορία μεγέθους στη γεωλογία είναι η άμμος, η οποία είναι > 0,0625 - 2 mm (0,0025 - 0,0787 in) σε μέγεθος. Το επόμενο μεγαλύτερο μέγεθος είναι τα πλακόστρωτα, που οποία είναι > 64 - 256 mm (2,5 έως 10,1 in). Αμμοχάλικα μπορεί να υποδιαιρούνται σε κόκκους (> 2 έως 4 mm/0.079 έως 0,16 in) και χαλίκι (> 4 έως 64 mm/0.16 σε 2,5).

#### **δ.Θραυστό πέτρωμα**

Βράχος που είναι μηχανικά σπασμένος σε μικρά κομμάτια και στη συνέχεια ταξινομημένος κατά το φιλτράρισμα μέσα από διαφορετικά μεγέθη. Είναι μια ευρεία κατηγορία χονδροειδών σωματιδίων ύλης που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή, συμπεριλαμβανομένων της άμμου, χαλικιού, λιθοτριμμάτων, σκωρίας, ανακυκλωμένου σκυροδέματος και αδρανών γεωσυνθετικών υλικών. Λόγω της σχετικά υψηλής αξίας υδραυλικής αγωγιμότητας σε σύγκριση με τα περισσότερα εδάφη, τα αδρανή υλικά χρησιμοποιούνται ευρέως σε εφαρμογές αποστράγγισης, όπως αποχετεύσεις, σηπτικά πεδία, διαρροές, και οδικές μεταφορές. Τα αδρανή υλικά χρησιμοποιούνται επίσης ως βασική ύλη κάτω από τα θεμέλια, τους δρόμους και τους σιδηροδρόμους.

#### **ε.Πυριτική άμμος**

Η πυριτική άμμος είναι μια από τις βασικότερες πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των ξηρών κονιαμάτων. Η πυριτική άμμος χρησιμοποιείται στα ξηρά κονιάματα ως αδρανές. Πρέπει να είναι απόλυτα ξηρή, καθαρή και διαβαθμισμένη σε διάφορες κοκκομετρίες, ανάλογα με το προϊόν στο οποίο πρόκειται να προστεθεί. Το ποσοστό πυριτίου (  $\text{SiO}_2$  ) που περιέχεται στην πυριτική άμμο , χαρακτηρίζει και την ποιότητά της. Η πυριτική άμμος ανήκει στην ομάδα του χαλαζία ( Quartz ) που αποτελεί το πιο διαδεδομένο ορυκτό στην Γη. Η πιο συνηθισμένη μορφή χαλαζία κρυσταλλώνεται στο τριγωνικό σύστημα. Ο χαλαζίας ανάλογα με τις προσμίξεις που περιέχει, παίρνει διάφορους χρωματισμούς και ειδικότερα ονόματα.

#### **ζ.Άμμος**

Η άμμος είναι ένα φυσικό κοκκώδες υλικό που αποτελείται από πολύ λεπτά πετρώματα και ορυκτά σωματίδια. Η σύνθεση της άμμου είναι εξαιρετικά μεταβλητή, ανάλογα με τις τοπικές πηγές βράχου και συνθήκες, αλλά τα πιο κοινά συστατικά της άμμου στις εσωτερικές ηπειρωτικές και σε μη τροπικές παράκτιες περιοχές είναι το διοξείδιο του πυριτίου (ή  $\text{SiO}_2$ ), συνήθως υπό τη μορφή χαλαζία. Δεδομένου ότι ο όρος χρησιμοποιείται από τους γεωλόγους, τα σωματίδια άμμου κυμαίνονται σε διάμετρο από 0,0625 mm με 2mm. Η επόμενη μεγαλύτερη κατηγορία μεγέθους πάνω από την άμμο είναι αμμοχάλικο, με σωματίδια που κυμαίνονται από 2 mm έως 64 mm. Η αμέσως μικρότερη κατηγορία μεγέθους στη γεωλογία είναι το filler: σωματίδια μικρότερα από 0,0625 χιλιοστά κάτω από 0,004 mm σε διάμετρο. Οι προδιαγραφές μεγέθους μεταξύ άμμου και χαλικιού έχουν παραμείνει σταθερές για περισσότερο από έναν αιώνα. Σύμφωνα με το ISO 14688 η άμμος χωρίζεται σε μεσαίας κοκκομετρίας και χονδρόκοκκη με μεγέθη 0,063mm έως 0,2 mm και

0,63mm έως 2,0mm αντίστοιχα. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, η άμμος συνήθως χωρίζεται σε πέντε υποκατηγορίες ανάλογα με το μέγεθος: πολύ ψιλή άμμος (1 / 16 - 1/8 mm διάμετρο), ψιλή άμμος (1/8 mm - 1/4 mm), μεσαία άμμος (1/4 mm - 1/2 mm) , χοντρή άμμος (1/2 mm - 1 mm), και πολύ χοντρή άμμος (1 mm - 2 mm). Αυτά τα μεγέθη με βάση την κλίμακα Φ (Krumbein), όπου το μέγεθος της βάσης είναι  $\Phi = -\log_2$  του μεγέθους σε mm. Σε αυτή την κλίμακα, η άμμος κυμαίνεται μεταξύ -1Φ έως 4Φ, με υποδιαίρεσεις σε ακέραιους αριθμούς.

**Παιπάλη** ή **filler** χαρακτηρίζεται το λεπτόκοκκο υλικό που διέρχεται από το κόσκινο τετραγωνικής οπής Νο 200 (0,074 mm). Η παιπάλη μπορεί να είναι άργιλος ή σκόνη από το ίδιο υλικό. Βρίσκεται είτε προσκολλημένη στους κόκκους του υλικού εμποδίζοντας την πρόσφυση των αδρανών με το κονιάμα, είτε σχηματίζοντας συσσωματώματα δημιουργώντας αδύνατα σημεία στην μάζα του σκυροδέματος, ή ακόμη διασκορπισμένη ομοιόμορφα μέσα στην μάζα του αδρανούς. Η παιπάλη έχει γενικά την ιδιότητα να αυξάνει την αναγκαία ποσότητα του νερού στο σκυρόδεμα και να ελαττώνει αντίστοιχα την αντοχή του. Παράλληλα συντελεί στην αύξηση της πλαστικότητας του μείγματος αδρανών - κονιάματος. Για τον παραπάνω λόγο, σύμφωνα με τον Κ.Τ.Σ. για τα αδρανή που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα το μέγιστο επιτρεπτό ποσοστό παιπάλης δεν πρέπει να υπερβαίνει το 16% για την άμμο και το 1% για τα χονδρόκοκκα υλικά (σκύρα, γαρμπίλι, ρυζάκι ). Ειδικότερα για άοπλα σκυροδέματα το ποσοστό παιπάλης στη άμμο μπορεί να φτάσει το 20%. Η παιπάλη της φυσικής άμμου δεν πρέπει να υπερβαίνει το 5%. Στο ασφαλτικό σκυρόδεμα και για την στρώση κυκλοφορίας το ποσοστό παιπάλης των αδρανών πρέπει να βρίσκεται μεταξύ 5 - 12 % . Μεγάλο ποσοστό παιπάλης δίδει στο ασφαλτικό σκυρόδεμα μεγάλη πλαστικότητα. Επειδή η παιπάλη έχει την ιδιότητα να προσκολλάται πάνω στο χονδρόκοκκο υλικό, ο διαχωρισμός της από αυτό με τον συνήθη τρόπο κοσκινίσματος είναι αρκετά δύσκολος και όχι πλήρης. Γι' αυτό και ο προσδιορισμός της γίνεται με πλύσιμο. Η πείρα έχει αποδείξει ότι στα θραυστά κυρίως αδρανή ένα ποσοστό της παιπάλης είναι απαραίτητο, γιατί βελτιώνει τη ρευστότητα και την πλαστικότητα του μίγματος, συντελεί στην καλύτερη διασπορά νερού και τσιμέντου, κλείνει τους τριχοειδείς πόρους και αυξάνει το μέτρο ελαστικότητας και την αντοχή. Το ποσοστό εξαρτάται από το σχήμα των κόκκων, την κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών και την ποσότητα και το είδος του τσιμέντου. Ακριβέστερα ως παιπάλη ορίζεται το διερχόμενο από το κόσκινο Νο 200 (75μm) και ως άμμος το διερχόμενο σε ποσοστό τουλάχιστον 95% από το κόσκινο Νο 4.

Η **δοκιμή του ισοδύναμου άμμου** ( sand equivalent ) εκτελείται στο εργαστήριο ή το εργοτάξιο επί όλων των αδρανών υλικών που προορίζονται για κατασκευή υποβάσεων, βάσεων και ασφαλτικών επιστρώσεων οδών, όπως και για την παρασκευή σκυροδεμάτων. Η δοκιμή αυτή γίνεται για να διαπιστωθεί η παρουσία επιβλαβών ποσοτήτων αργίλου στα αδρανή υλικά. Η παρουσία αργίλου στα αδρανή είναι ανεπιθύμητη γιατί προκαλεί διόγκωση μετά από κορεσμό του αδρανούς με νερό και περιβάλλει τους κόκκους του αδρανούς με αποτέλεσμα να λειτουργεί ως λιπαντικό. Η δοκιμή γίνεται σε δείγμα υλικού διερχόμενο από το κόσκινο Νο 4 (άμμος ) και υπολογίζεται η κατ' όγκο σχέση της ποσότητας της αργίλου προς την ποσότητα των κόκκων της άμμου.



Η δοκιμή **μπλε του μεθυλενίου** χρησιμοποιείται για τη διακρίβωση της παρουσίας αργλικών ορυκτών στα αδρανή. Τα αργλικά ορυκτά είναι υδρόφιλα και διογκώνονται ανάλογα με την περιεκτικότητά τους σε νερό. Η διογκωση αυτή έχει καταστρεπτικές συνέπειες στα ασφαλτομίγματα καθώς και στο σκυρόδεμα. Η δοκιμή βασίζεται στην αρχή της προσρόφησης επί της ενεργής επιφάνειας των αργλικών ορυκτών των μορίων του μπλε του μεθυλενίου. Κατά τη δοκιμή μετράται η ποσότητα του μπλε του μεθυλενίου που χρειάζεται για τη μοριακή επικάλυψη όλων των αργλικών συστατικών των αδρανών.[3]

### **1.1.3.3.Πορώδες αδρανών**

Το πορώδες των αδρανών είναι μία σημαντική ιδιότητα που είναι σε αντίστροφη αναλογία με την αντοχή και την ανθεκτικότητά τους. Η τιμή του προσδιορίζεται με την μέτρηση της υδατοαπορροφητικότητάς τους. Η δοκιμή προσδιορισμού της υδατοαπορροφητικότητας σύμφωνα με το πρότυπο ΕΛΟΤ EN12620 παρουσιάζει διαφορές σε σχέση με την αντίστοιχη του ASTM (Κ.Τ.Σ.'97). Έτσι για τον προσδιορισμό της υδατοαπορροφητικότητας των λεπτόκοκκων υλικών, κατά EN, πρέπει προηγουμένως να έχει πλυθεί το υλικό στο κόσκινο των 0,063mm, και μετά γίνεται η δοκιμή, ενώ στο ASTM συμμετέχει και η παιπάλη στον υπολογισμό της υδατοαπορροφητικότητας του υλικού. Αντίστοιχα για τον υπολογισμό της υδατοαπορροφητικότητας των χονδρόκοκκων υλικών το μεν ASTM προδιαγράφει ότι το υλικό σου είναι σε κορεσμένη και επιφανειακά ξηρή κατάσταση όταν φαίνεται ένα φιλμ νερού πάνω στον κόκκο ενώ αντιθέτως στο EN όταν δεν υπάρχει αυτό το φιλμ.[3]

### **1.1.3.4.Κοκκομετρική διαβάθμιση (η επί της % σύνθεση του αδρανούς σε κόκκους διαφόρων μεγεθών)**

Τα αδρανή ανάλογα με το μέγεθος τους κατατάσσονται σε 4 βασικές κατηγορίες α) Άμμος (0-4 mm ) και β) Ρυζάκι (4- 8mm) γ) γαρμπίλι (8-16 mm) και δ) Χαλίκι (16-31,5mm). Το πρότυπο ΕΛΟΤ EN12620 καθιερώνει εκτός των βασικών κόσκινων της σειράς DIN, την οποία υιοθετεί, και ενδιάμεσα κοσκινά, σειρές 2, ενώ καταργεί τα Αμερικάνικα κόσκινα και ορίζει την παιπάλη ως το διερχόμενο ποσοστό στο κόσκινο 0,063 αντί 0,075mm. Στο πρότυπο αυτό η ονομασία των αδρανών εξαρτάται από την περιοχή των διερχομένων από τα κόσκινα, κατατάσσοντας τα σε βασικές κατηγορίες (λεπτόκοκκο, χονδρόκοκκο), με την παρατήρηση ότι το 99% των κοκκομετριών θα είναι μέσα στα όρια για το D, d, d/2, όπου D είναι το μεγαλύτερο και d το μικρότερο χρησιμοποιούμενο κόσκινο για την περιγραφή του μεγέθους ενός αδρανούς με τον λόγο D/d όχι μικρότερο του 1,4, ενώ καθορίζει και όρια ανοχών σαν ποσοστά στα ενδιάμεσα κοσκινά ή την παιπάλη. Η άμμος καθορίζεται σαν διερχόμενη 100% από το κόσκινο ανοίγματος οπής 2 D και 85-99% από το D=4mm, ενώ στην κοκκομετρία του προστίθεται ένα επιπλέον κόσκινο των 0,125 mm. Καλά διαβαθμισμένα αδρανή με διαστάσεις κόκκων που καλύπτουν όλο το φάσμα παρουσιάζουν λίγα κενά, απαιτούν μικρότερη ποσότητα συνδετικού ιστού και παρουσιάζουν καλύτερη συνεκτικότητα και εργασιμότητα. Ο ΚΤΣ καθόρισε τις υποζώνες των διαγραμμάτων ορίζοντας ότι για το σπλισμένο σκυρόδεμα η κοκκομετρική καμπύλη πρέπει να βρίσκεται στην υποζώνη Δ.Η υποζώνη Ζ του σχήματος αφορά μόνο άοπλο σκυρόδεμα. Γενικά οι καμπύλες κάτω από την υποζώνη Δ αντιστοιχούν σε αρκετά χονδρόκοκα αδρανή με

χαμηλή εργασιμότητα ενώ οι καμπύλες πάνω από την υποζώνη Ε αντιστοιχούν σε αδρανή λεπτόκοκκα που απαιτούν μεγάλη ποσότητα νερού και δίνουν σκυροδέματα με μεγάλη πιθανότητα ρηγματώσης. Προσοχή δίνεται στην ύπαρξη παιπάλης (μέγεθος κόκκου <από 0,075mm) στην άμμο, που δεν πρέπει να υπερβαίνει το 16% στα θραυστά αδρανή ενώ στα φυσικά το 5%. Για το πρότυπο ΕΛΟΤ EN12620 δεν υπάρχει συγκεκριμένο όριο όπως στον Κ.Τ.Σ.'97, αλλά ανάλογα με το ποσοστό που η παιπάλη συμμετέχει στα αδρανή εντάσσεται σε συγκεκριμένη κατηγορία βάσει του πίνακα 11 του προτύπου με άνω όρια όπως φαίνονται σε αυτόν. Έτσι στα φυσικά αδρανή το άνω όριο παραμένει στο 16%, ενώ στα χονδρόκοκκα αδρανή είναι 4%. Καθοριστική σημασία έχουν τα όρια που θα τεθούν από τον καταναλωτή αναλόγως των απαιτήσεων του έργου. Επίσης η δοκιμή του ισοδυνάμου της άμμου που ανάλογα με το περιβάλλον του έργου πρέπει να μην δίνει τιμή που να είναι μικρότερη από 65 και σε εξαιρετικές περιπτώσεις να είναι μεγαλύτερη του 75, μετρά την καθαρότητα της άμμου που επηρεάζει την αντοχή του σκυροδέματος και τη συνάφειά του με τον σιδηροπλισμό. Παρόλο που δεν έχει ακόμα καθοριστεί συγκεκριμένο κάτω όριο ή κατηγοριοποίηση από το πρότυπο ΕΛΟΤ EN12620 για την δοκιμή του ισοδυνάμου άμμου, αυτή χρησιμοποιείται και από το εν λόγω πρότυπο για τον προσδιορισμό της καθαρότητας της άμμου, χωρίς τα αποτελέσματα που προκύπτουν να είναι άμεσα συγκρίσιμα με το ισοδύναμο άμμου που γινόταν κατά ASTM λόγω της διαφοράς στα χρησιμοποιούμενα κόσκινα. Επιπλέον στο καινούργιο πρότυπο η καθαρότητα της άμμου ελέγχεται με την δοκιμή του Μπλε του μεθυλενίου, που δεν υπήρχε στο προηγούμενο πρότυπο.[3]

#### 1.1.3.5.Χημικά χαρακτηριστικά αδρανών

**Τα Χημικά χαρακτηριστικά** δεν πρέπει να επηρεάζουν δυσμενώς την πήξη, τη σκλήρυνση, την αντοχή, τη σταθερότητα του όγκου και την προστασία του οπλισμού από την διάβρωση. Οι ενώσεις που αναφέρονται παρακάτω θεωρούνται επιβλαβείς.

**α) Ενώσεις Θείου** (ανυδρίτης γύψος) προκαλεί διόγκωση. Η περιεκτικότητα σε  $SO_3$  πρέπει να είναι < 1%

**β) Ενώσεις Σιδήρου** προκαλεί διόγκωση και κηλίδες.

**γ) Νιτρικά άλατα και αλογόνα** προκαλούν διάβρωση. Η περιεκτικότητα σε Cl πρέπει να είναι < 0,2%.

**δ) Ενώσεις του μολύβδου ή του ψευδαργύρου.** Προκαλούν επιτάχυνση ή επιβράδυνση με μείωση της αντοχής.

**ε) Χλωριούχοι ή φωσφορικές ενώσεις.** Επιδρούν στον χρόνο πήξης

**στ) Πυριτικοί άργιλοι** (ασβεστίου, νατρίου, καλίου).

**ζ) Αποσαθρώσιμα συστατικά** (αργιλικό σχιστόλιθοι). Προκαλούν μείωση αντοχής.

**η) Οργανικά.** Προκαλούν μείωση αντοχής και καθυστέρηση στην πήξη.

**θ) Γαιάνθρακες ή λιγνίτες.** Προκαλούν μείωση αντοχής. Η περιεκτικότητα τους πρέπει να είναι < 1%.

**ι) Κερατόλιθοι** (ε.β. <2,35 ) να μην υπερβαίνουν το 5%.

Στα φυσικά αδρανή από θάλασσα η περιεκτικότητα σε άνυδρο χλωριούχο ασβέστιο πρέπει να είναι <1% του βάρους του τσιμέντου. Επίσης η δυνατότητα βλαπτικότητας των αδρανών

κατά την αλκαλοπυριτική αντίδραση (με χημική μέθοδο ή με πρίσματα) πρέπει να εξετάζεται πριν τη χρήση τους στο σκυρόδεμα. Επίσης οι προδιαγραφές συνιστούν να αποφεύγονται πετρώματα με συστατικά που περιέχουν οπάλιο, ανδεσίτη, ρούλιθο και δολομίτες γιατί προκαλούν διόγκωση και ζεόλιθους λόγω αντίδρασης με τα αλκάλια του τσιμέντου. Επίσης απαιτείται το ποσοστό των εύθρυπτων και μαλακών κόκκων να μην υπερβαίνει το ποσοστό 3% και οι σβώλοι αργίλου το 0,25%. [3]

#### 1.1.4.Τσιμέντο

Το τσιμέντο που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του σκυροδέματος είναι βιομηχανικό κοκκώδες υλικό με υδραυλικές ιδιότητες. Δηλαδή σκληραίνει όταν αναμιγνύεται με το νερό σχηματίζοντας προϊόντα αδιάλυτα στο νερό. Είναι γνωστό ότι το τσιμέντο αποτελεί από αρχαιοτάτων χρόνων εξαιρετη υδραυλική κονία με εξαιρετικές ιδιότητες. Χρησιμοποιείται ευρύτατα και σήμερα σε πολλές πρακτικές εφαρμογές εκτός από την βιομηχανοποιημένη διαδικασία παραγωγής σκυροδέματος. Εκτός από υψηλή υδραυλικότητα συνδυάζει και υψηλές αντοχές.

##### 1.1.4.1.Παραγωγή

Το τσιμέντο, σε αντίθεση με άλλες κονίες, είναι βιομηχανικό προϊόν που παρασκευάζεται από τη σύγχρονη όπτηση **ασβεστόλιθου** και **αργίλου**. Στην **Εικόνα 1.1** απεικονίζεται η ροή παραγωγής τσιμέντου Πόρτλαντ.

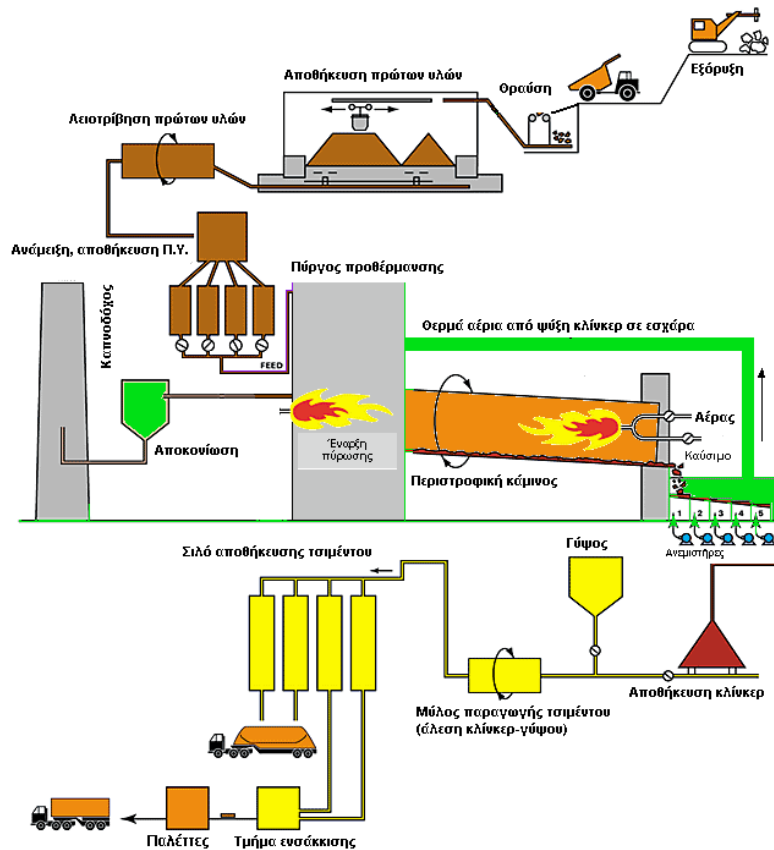
**α)** Εξόρυξη ασβεστολιθικών πετρωμάτων και αργιλικών εδαφών χωριστά. Τα πετρώματα αυτά περνούν από σπαστήρες, ώστε να τεμαχιστούν και να αποκτήσουν διάμετρο μερικών εκατοστών.

**β)** Μετά την έξοδο τους από τους σπαστήρες γίνεται ανάμειξη των δύο υλικών (**προομοιογενοποίηση**).

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

**δ)** Το μείγμα εισάγεται στο επάνω άκρο κυλινδρικής καμίνου, η οποία περιστρέφεται αργά γύρω από τον άξονα της. Η θερμότητα παράγεται από καυστήρα πετρελαίου, τοποθετούμενη στο κάτω άκρο της. Η θερμοκρασία μέσα στην κάμινο είναι περίπου 600 °C στο επάνω άκρο και φτάνει στους 1500 °C στο κάτω άκρο, που είναι και το σημείο εξόδου των προϊόντων. Τα προϊόντα της σέψησης ονομάζεται διεθνώς **klinker**. Έχουν διάμετρο λίγων εκατοστών, χρώμα μαυροπράσινο.

**ε)** Τα προϊόντα αυτά της έψησης αλέθονται και αποκτούν τη γνωστή μορφή του τσιμέντου. Το υλικό αυτό, όπως προκύπτει από την άλεση των klinker, χωρίς καμιά προσθήκη ή τροποποίηση, ονομάζεται **“τσιμέντο Πόρτλαντ”**.



Σχήμα 1.1. Αναλυτικό διάγραμμα ροής διεργασιών παραγωγής τσιμέντου Πόρτλαντ.

#### 1.1.4.2. Τύποι τσιμέντου

Κάθε χώρα παγκοσμίως παρασκευάζει τσιμέντο, χρησιμοποιώντας τις πηγές πρώτων υλών που διαθέτει. Έτσι ανάλογα με τις υπάρχουσες και χρησιμοποιούμενες πρώτες ύλες δημιουργήθηκαν οι διάφοροι τύποι τσιμέντων που παράγονται παγκοσμίως, όπως το καθαρό ή αμιγές τσιμέντο, το τσιμέντο με ποζολάνη, την ιπτάμενη τέφρα, σκωρία υψικαμίνου, πυριτική παιπάλη, ασβεστόλιθο κλπ. Παρακάτω (πίνακας 1.1) παρουσιάζονται οι βασικοί τύποι τσιμέντου:

Πίνακας 1.1 Βασικοί τύποι τσιμέντου.

ΤΥΠΟΣ	ΠΕΡΙΓΡΑΦΗ
CEM I	Τσιμέντο Πόρτλαντ
CEM II	Σύνθετο Τσιμέντο Πόρτλαντ
CEM III	Σκωριοτσιμέντο
CEM IV	Ποζολανικό Τσιμέντο
CEM V	Σύνθετο Τσιμέντο

**Τσιμέντο Τύπου I (CEM I), Πόρτλαντ αμιγή:** χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από συνάλεση Κλίνκερ και γύψου.

**Τσιμέντο Τύπου II (CEM II), Σύνθετα τσιμέντα Πόρτλαντ:** χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από την συνάλεση Κλίνκερ - Πόρτλαντ, γύψου και ποζολάνης, φυσικής ή τεχνητής προέλευσης σε ποσοστά από 6-35% κατά μέγιστο.

**Τσιμέντο Τύπου ΠΙ (CEM III), Σκωριακά τσιμέντα ή σκωριοτσιμέντα:** χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από την συνάλεση Κλίνκερ, γύψου και σκωρίας μόνο σε ποσοστά από 36-95% κατά μέγιστο.

**Τσιμέντο Τύπου IV (CEM IV), Ποζολανικά τσιμέντα:** χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από τη συνάλεση Κλίνκερ -Πόρτλαντ, γύψου και ποζολάνης που μπορεί να είναι φυσική ή ψημένη, ιπτάμενη τέφρα πυριτική ή ασβεστούχα και πυριτική παιπάλη. Δεν μπορεί να περιέχει σκωρία.

**Τσιμέντο Τύπου V (CEM V), Σύνθετα τσιμέντα:** χαρακτηρίζονται τα τσιμέντα που προέρχονται από την συνάλεση Κλίνκερ, γύψου, σκωρίας και σε ίσο ποσοστό ποζολάνης, φυσική ή ψημένη ή πυριτική ιπτάμενη τέφρα σε ποσοστά από 36-50% κατά μέγιστο. Δεν μπορεί να περιέχει πυριτική παιπάλη.

#### 1.1.4.3.Κατηγορίες αντοχής τσιμέντων

Από άποψη αντοχής τα τσιμέντα κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες, 35, 45 και 55.

Οι αριθμοί παριστάνουν την αντοχή των τσιμέντων σε MPa όπως προσδιορίζεται συμβατικά σύμφωνα με τον κανονισμό. Έτσι, ένα τσιμέντο: **I /35** σημαίνει ότι είναι τύπου I και συμβατικής αντοχής 35 MPa. Ο ρυθμός αυξήσεως της αντοχής του τσιμέντου επιτυγχάνεται συνήθως με αύξηση της λεπτότητας (Blaine). Ένα λεπτόκοκκο τσιμέντο (Blaine=4000 cm<sup>2</sup>/g) έχει γρηγορότερο ρυθμό αυξήσεως της αντοχής από ένα χονδροαλεσμένο τσιμέντο (Blaine=2500-3000 cm<sup>2</sup>/g).

#### 1.1.4.4.Κατάταξη με βάση τις ιδιότητές του

Δύο από τις ιδιότητες του τσιμέντου, η **ταχύτητα πήξης** και η **αντοχή σε θλίψη**, αποτελούν βασικά κριτήρια για την κατάταξη των τσιμέντων σε διάφορες κατηγορίες.

Με βάση την **ταχύτητα πήξης** τα τσιμέντα διακρίνονται:

- Τσιμέντα ταχείας πήξης ή αργλικά, στα οποία η πήξη συμπληρώνεται σε διάστημα μικρότερο της μισής ώρας. Είναι πλουσιότερα σε οξείδιο του αργιλίου (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).
- Συνήθη τσιμέντα, με χρόνο πήξης που κυμαίνεται μεταξύ 6-8 ωρών.
- Τσιμέντα βραδείας πήξης ή πυριτικά, στα οποία η πήξη αρχίζει μετά τις 8 ώρες. Είναι πλουσιότερα σε οξείδιο του πυριτίου (SiO<sub>2</sub>).

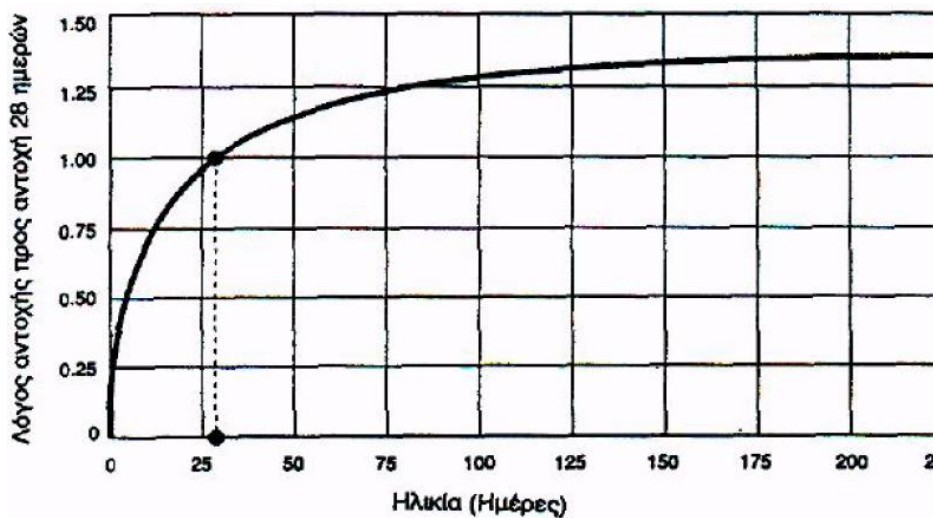
Με βάση την **αντοχή σε θλίψη** τα τσιμέντα κατατάσσονται:

- Κοινό τσιμέντο. Η αντοχή σε θλίψη του δοκιμίου είναι τουλάχιστον 275 kg/cm<sup>2</sup>

- Τσιμέντο υψηλής αντοχής. Η αντοχή σε θλίψη του δοκιμίου είναι τουλάχιστον 400 kg/cm<sup>2</sup>.
- Τσιμέντο ειδικής παραγγελίας υψηλής αντοχής. Η αντοχή των τσιμεντών αυτών καθορίζεται με ειδική παραγγελία.

#### 1.1.4.5.Ενυδάτωση του τσιμέντου

Η πήξη και η σκλήρυνση του σκυροδέματος οφείλονται αποκλειστικά στη χημική δράση μεταξύ τσιμέντου και νερού. Τα συστατικά του τσιμέντου ενώνονται με το νερό ύστερα από μία σειρά περίπλοκων χημικών αντιδράσεων που διαρκούν επί χρόνια. Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται **ενυδάτωση** του τσιμέντου. Με την ανάμιξη του τσιμέντου με το νερό δημιουργείται μια γκριζοπράσινη πολτώδης μάζα, η τσιμεντοκονία. Για ένα ορισμένο χρονικό διάστημα, το μείγμα δεν φαίνεται να παρουσιάζει καμιά μεταβολή. Αργότερα όμως φαίνεται ότι αρχίζει να πήζει προοδευτικά έως ότου στερεοποιηθεί τελείως. Το φαινόμενο αυτό καλείται **πήξη της τσιμεντοκονίας** και οι χαρακτηριστικές στιγμές αλλαγής της φυσικής καταστάσεως ονομάζονται αρχή και τέλος της πήξεως. Κατά το χρονικό διάστημα ως την αρχή της πήξεως, η πάστα τσιμέντου επιδέχεται κατεργασία και μεταφορά. Γι αυτό και ο κανονισμός ορίζει ότι η αρχή της πήξεως για τα κοινά τσιμέντα δεν πρέπει να εμφανίζεται νωρίτερα από μία ώρα από τη στιγμή ανάμιξης των δύο υλικών και το τέλος της πήξεως αργότερα από 8 ώρες. Στην περίπτωση του σκυροδέματος ο χρόνος ως την αρχή της πήξεως γίνεται δύο έως τέσσερις φορές μεγαλύτερος.[2]



Εικόνα 1.2. Ανάπτυξη της αντοχής του τσιμεντοπολτού με το χρόνο.

#### 1.1.5.Χημικά Πρόσμικτα (Admixtures)

Τα χημικά πρόσμικτα είναι υλικά που προστίθενται, σε μικρές ποσότητες σε σχέση με τη μάζα του τσιμέντου, κατά τη διάρκεια της αναμίξεως του σκυροδέματος με σκοπό να τροποποιήσουν τις ιδιότητες κυρίως του νωπού αλλά και του σκληρυμένου σκυροδέματος. Ανάλογα με την κύρια δράση τους τα υλικά αυτά κατατάσσονται στις ακόλουθες κατηγορίες:

- Ρευστοποιητικά. Στηρίζονται στη μείωση της επιφανειακής τάσεως του νερού και των δυνάμεων συνοχής μεταξύ των κόκκων του τσιμέντου, με αποτέλεσμα, όσο διαρκεί η δράση τους, να αυξάνουν την ρευστότητα του σκυροδέματος. Τελευταία εξέλιξη στον τομέα αυτό είναι οι υπερρευστοποιητές που δημιουργούν μια πολύ μεγάλη ρευστότητα χωρίς αύξηση νερού. Τα υλικά αυτά λύνουν το πρόβλημα της εργασιμότητας και κατ' επέκταση της αντλισιμότητας και διάστρωσης του σκυροδέματος, χωρίς την επιζήμια αύξηση του νερού ανάμιξης. Έχουν επιπλέον και επιβραδυντική δράση.
- Αερακτικά. Είναι υλικά που προκαλούν την ανάπτυξη μικρών φυσαλίδων μέσα στο σκυρόδεμα μεταξύ 0,02 και 0,2 mm και αυξάνουν τον περιεχόμενο αέρα σε 6-8%. Έχουν επιπλέον και ρευστοποιητική δράση.
- Επιβραδυντικά. Στηρίζονται στην απομόνωση των ταχύπικτων αργλικών ενώσεων και κυρίως του αργλικού τριασβεστίου. Η δράση αυτή διαρκεί περίπου 1 με 2 ώρες και έτσι το σκυρόδεμα μπορεί να μεταφερθεί στον τόπο διάστρωσης του. Για το λόγο αυτόν τέτοια υλικά χρησιμοποιούνται κατά κανόνα στο έτοιμο σκυρόδεμα.
- Επιταχυντικά. Έχουν αντίθετη δράση από τα επιβραδυντικά, διευκολύνουν την ενυδάτωση του αργλικού τριασβεστίου και των πυριτικών ενώσεων.

Εκτός από τα παραπάνω υπάρχουν και άλλα πρόσμικτα όπως, τα στεγανωτικά, τα αντιπαγετικά, τα διογκωτικά και τα αντιδιαβρωτικά.

Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό κανονισμό EN 206, η ολική ποσότητα των προσμίκτων δεν πρέπει να ξεπερνά τη μέγιστη δόση που συνίσταται από τον κατασκευαστή και σε κάθε περίπτωση να μην ξεπερνά τα 50 g/kg.[1]

### 1.1.6.Πρόσθετα (additives)

Τα πρόσθετα είναι τα λεπτομερώς διαμερισμένα ανόργανα υλικά που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα στοχεύοντας είτε να βελτιώσουν κάποιες ιδιότητες του είτε να πετύχουν συγκεκριμένες ιδιότητες. Το πρότυπο EN 206 αναφέρεται σε δύο κατηγορίες προσθέτων, τα σχεδόν αδρανή πρόσθετα (τύπου I, όπου υπάγονται τα φύλλερ αδρανών με προδιαγραφές σύμφωνες με το pr-EN 12620 και τα χρώματα) και τα πρόσθετα που έχουν ποζολανικές ή λανθάνουσες υδραυλικές ιδιότητες. Τα τελευταία (τύπου II) διακρίνονται σε πέντε κατηγορίες:

1. Υλικά με υδραυλικές ιδιότητες. Περιλαμβάνονται λεπτόκοκκα υλικά με υαλώδη πυριτική φάση η οποία έχει σημαντικά τροποποιηθεί από την παρουσία σε αξιοσημείωτες ποσότητες ιόντων ασβεστίου, μαγνησίου και αργίλου. Τα υλικά της κατηγορίας αυτής απαιτούν μικρές ποσότητες τσιμέντου Πόρτλαντ ή άλλων διεργετών για να επιταχύνουν την ενυδάτωση τους. Η ταχέως ψυχθείσα σκωρία

υψικαμίνων και μερικές υψηλού ασβεστίου (>20% CaO), οι ιπτάμενες τέφρες ανήκουν σε αυτήν την κατηγορία.

2. Υλικά με ποζολανικές και υδραυλικές ιδιότητες. Περιλαμβάνονται υλικά με μίγμα αργιλοπυριτικής και πυριτικής υαλώδους φάσης που περιέχουν μεγάλες ποσότητες μαγνησίου. Στην κατηγορία αυτή που τα υλικά μετέχουν και των δύο ιδιοτήτων ανήκουν οι υψηλού ασβεστίου ιπτάμενες τέφρες με περιεκτικότητα 10-20% σε CaO.
3. Οι κανονικές ποζολανες. Στις οποίες υπάγονται υλικά που συνίσταται από πυριτική υαλώδη φάση τροποποιημένη με αργίλιο και σίδηρο. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι χαμηλού ασβεστίου ιπτάμενες τέφρες.
4. Υλικά με ισχυρώς ποζολανικές ιδιότητες. Σε αυτή περιλαμβάνονται λεπτόκοκκα υλικά με μεγάλη ειδική επιφάνεια που συνίσταται από SiO<sub>2</sub> σε μη κρυσταλλική φάση. Τα υλικά αυτά, στα οποία ανήκει και η πυριτική παιπάλη, έχουν μεγάλη ποζολανική δραστηριότητα.
5. Υλικά μικρής δραστηριότητας, όπως είναι η σκωρία υψικαμίνων που ψύχθηκε με αργό ρυθμό ή οι τέφρες βάσης (bottom ashes). Τα υλικά αυτά πρέπει να αλεσθούν σε πολύ μεγάλη λεπτότητα για να αποκτήσουν αποδεκτές ιδιότητες (κυρίως αντοχές) όταν συνεργάζονται με το τσιμέντο.[1]

### 1.1.7.Νερό Ανάμιξης και Νερό Συντήρησης

Η ποιότητα του νερού είναι σημαντική επειδή οι τυχών προσμίξεις μπορεί να επηρεάσουν την πήξη του τσιμέντου, μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά τις αντοχές του σκυροδέματος ή να προκαλέσουν εμφάνιση κηλίδων στην επιφάνειά του και μπορεί επίσης να οδηγήσουν σε διάβρωση του οπλισμού. Για τους παραπάνω λόγους, η καταλληλότητα του νερού ανάμιξης και συντήρησης θα πρέπει να εξετάζεται προσεκτικά. Πρέπει να γίνεται σαφής διάκριση μεταξύ των επιπτώσεων του νερού ανάμιξης και της επίδρασης σκληρών νερών στο σκληρυμένο σκυρόδεμα, και αυτό διότι ορισμένες φορές ο δεύτερος τύπος νερού μπορεί να είναι αβλαβής ή ακόμα και ευεργετικός αν χρησιμοποιείται στην ανάμιξη.[5]

#### 1.1.7.1. Νερό ανάμιξης

Σε πολλές προδιαγραφές οι απαιτήσεις για το νερό ανάμιξης καλύπτονται από τους κανόνες που ισχύουν για το πόσιμο νερό.

Τέτοια είδη νερών περιέχουν σπάνια πάνω από 2000 διαλυμένα μέρη στερεών ανά εκατομμύριο (ppm), και κατά κανόνα κάτω από 1000 ppm. Για μία τιμή λόγου νερό προς τσιμέντο 0,5 κατά μάζα, η αντίστοιχη περιεκτικότητα στερεών στο νερό θα πρέπει να είναι ίση με το 0,055 της μάζας του τσιμέντου, και επομένως η επίδραση των κοινών στερεών (θεωρούμε τα αδρανή) θα είναι μικρή. Εάν η περιεκτικότητα σε λάσπη, υπερβαίνει τα 2000 ppm, είναι δυνατόν αυτή η περιεκτικότητα να μειωθεί με την αποθήκευση του νερού σε μία δεξαμενή πριν τη χρήση όπου τα στερεά καθιζάνουν. Ωστόσο, το νερό έκπλυσης των μηχανημάτων ανάμιξης (μπετονιέρες) κρίνεται ικανοποιητικό ως νερό ανάμιξης (επειδή τα στερεά που περιέχει είναι κατάλληλα ως συστατικά σκυροδέματος), με την προϋπόθεση ότι



πληρούνται αρχικά κάποιες συνθήκες. Το πρότυπο ASTM C 94-05 επιτρέπει τη χρήση του νερού έκπλυσης, με την προϋπόθεση ότι διαφορετικού τύπου τσιμέντα και πρόσμικτα δεν πρέπει να προστίθενται.

Το κριτήριο για τη καταλληλότητα του νερού δεν είναι απόλυτα, το πόσιμο νερό μπορεί να είναι ακατάλληλο ως νερό ανάμιξης εάν παρουσιάζει υψηλή περιεκτικότητα σε νάτριο και κάλιο, ώστε να υπάρχει κίνδυνος αντίδρασης μεταξύ αλκαλίων και αδρανών.

Ενώ η χρήση του πόσιμου νερού είναι γενικά ασφαλής, νερά που δεν είναι κατάλληλα για πόση μπορεί συχνά να κρίνονται ικανοποιητικά για την παρασκευή σκυροδέματος. Κατά κανόνα ένα νερό με pH από 6 έως 8, το οποίο δεν έχει αλμυρή ή υφάλμυρη γεύση, είναι κατάλληλο για χρήση, ωστόσο, ένα νερό με δυσάρεστη μυρωδιά ή σκούρο χρώμα δεν σημαίνει απαραίτητα ότι περιέχει ουσίες επιβλαβείς για το σκυρόδεμα. Τα φυσικά νερά, τα οποία είναι ελαφρώς όξινα είναι αβλαβή, αλλά τα νερά που περιέχουν χουμικά ή άλλα οργανικά οξέα μπορεί να επηρεάσουν αρνητικά την διαδικασία σκλήρυνσης του σκυροδέματος, όπως το νερό υψηλής αλκαλικότητας, και πρέπει να ελέγχονται πριν την χρήση τους.

Στα παραπάνω μπορούν να γίνουν ορισμένα πρόσθετα σχόλια. Η παρουσία άλγης στο νερό ανάμιξης μπορεί να οδηγήσει στον εγκλωβισμό αέρα με αποτέλεσμα την απώλεια αντοχών. Η σκληρότητα του νερού δεν επηρεάζει την αποτελεσματικότητα των αερακτικών πρόσμικτων.

Μερικές φορές μπορεί να είναι δύσκολη η εύρεση επαρκών ποσοτήτων πόσιμου νερού και μόνο το υφάλμυρο νερό είναι διαθέσιμο, το οποίο περιέχει χλωριόντια και θειικά άλατα. Όσο αφορά την περιεκτικότητα χλωριόντων, ένα γενικό όριο των 500 mg συνίσταται από το πρότυπο BS 3148: 1980, αλλά τα όρια που προτείνονται από τα πρότυπα BS EN 1008: 2002 και ASTM C 1602-06 ποικίλουν ανάλογα με τη χρήση του σκυροδέματος. Στον **Πίνακα 1.2** συγκρίνονται τα όρια για τα χλωριόντια, τα αλκάλια και τα θειικά για διάφορα πρότυπα. Μέθοδοι που επιτρέπουν τη μέτρηση στερεών στο νερό περιγράφονται από το πρότυπο ASTM C 1603-05a.

**Πίνακας 1.2.** Όρια προσμίξεων σε νερό ανάμιξης, mg ανά λίτρο (ppm).

Προσμίξεις	BS 3148: 1980	BS EN 1008: 2002	ASTM C 1602/C 1602M-06
Χλωριόντια:			
προεντεταμένο σκυρόδεμα		500	500
οπλισμένο σκυρόδεμα	500	1000	1000
άοπλο σκυρόδεμα		4500	
Θειικά	1000(SO <sub>3</sub> )	2000(SO <sub>3</sub> )	3000(SO <sub>4</sub> )
Αλκάλια	1000	1500	600

Ενίοτε ενδιαφέρει η χρήση του θαλασσινού νερού ως νερού ανάμιξης. Το θαλασσινό νερό έχει συνήθως μία αλατότητα περίπου 3,5% (το 75% των διαλυμένων στερεών είναι NaCl και το υπόλοιπο 15% είναι MgCl<sub>2</sub> και MgSO<sub>4</sub>). Αυτού του είδους τα νερά οδηγούν σε μία ελαφριά αύξηση των πρωίμων αντοχών αλλά και σε μείωση των ύστερων αντοχών, η

πτώση των αντοχών συνήθως δεν είναι μεγαλύτερη από 15% και για αυτό θεωρούνται ανεκτές. Οι επιδράσεις στο χρόνο πήξης δεν έχουν πλήρως αποσαφηνιστεί αλλά είναι ανεκτές εάν το θαλασσινό νερό που χρησιμοποιείται δεν επιδρά υπερβολικά αρνητικά για τις αντοχές. Δοκιμές αντοχών και χρόνου πήξης απαιτούνται από τα Αγγλικά και τα Αμερικανικά πρότυπα.

Το θαλασσινό νερό (ή όποιο νερό περιέχει μεγάλες ποσότητες χλωριόντων) τείνει να προκαλέσει υγρασία και εξάνθηση αλάτων. Τέτοιου είδους νερά δεν πρέπει να χρησιμοποιούνται όταν είναι σημαντική η εμφάνιση του σκυροδέματος ή όταν ακολουθεί επίχριση με σοβά.

Στην περίπτωση του οπλισμένου σκυροδέματος, η χρήση του θαλασσινού νερού στην ανάμιξη αυξάνει τον κίνδυνο διάβρωσης του οπλισμού, κυρίως σε τροπικές χώρες. Η διάβρωση παρατηρείται κυρίως σε κατασκευές που εκτίθενται σε υγρό αέρα, όταν ο οπλισμός είναι εκτεθειμένος στο περιβάλλον ή το σκυρόδεμα δεν είναι αρκετά πυκνό, έτσι ώστε να εξυπηρετείται η διαβρωτική δράση των αλάτων με την παρουσία υγρασίας. Από την άλλη πλευρά όταν το οπλισμένο σκυρόδεμα βρίσκεται μονίμως σε επαφή με το νερό, είτε θαλασσινό είτε πόσιμο, η χρήση θαλασσινού νερού στη ανάμιξη φαίνεται ότι δεν έχει παρενέργειες. Ωστόσο, στην πράξη, γενικά η χρήση θαλασσινού νερού στην ανάμιξη δεν ενδείκνυται.

Σε σχέση με το σύνολο των ακαθαρσιών στο νερό, είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι μία άλλη πιθανή πηγή είναι η επιφανειακή υγρασία των αδρανών, η οποία μπορεί να αντιπροσωπεύει ένα σημαντικό ποσοστό του συνολικού νερού ανάμιξης.

Οι Ελληνικές μονάδες παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος είναι αναγκασμένες να πληρούν τις προδιαγραφές του ελληνικού προτύπου όσο αφορά το νερό ανάμιξης. Έτσι στην περίπτωση της χρήσης ανακυκλωμένου νερού στην ανάμιξη είναι υποχρεωτική η κατεργασία του νερού αυτού ώστε να μην μεταβάλλονται οι ιδιότητές του στην παραγωγή, ακόμη και αν αυτό δεν θεωρείται αναγκαίο από τα Ευρωπαϊκά και τα Αμερικανικά πρότυπα. Οι περιορισμοί του Ελληνικού Προτύπου (ELOT 345) καθώς και των EN1008 και ASTM 1602 που αναφέρονται στο νερό ανάμιξης σκυροδέματος παρουσιάζονται στον **Πίνακα 1.3**. [5,7]

**Πινάκας 1.3.** Προδιαγραφές προτύπων για το νερό ανάμιξης σκυροδέματος

Πρότυπο	pH	Τελική περιεκτικότητα σε ανόργανα στερεά (ppm)	Περιεκτικότητα σε $SO_4^{2-}$ (ppm)	Περιεκτικότητα $Cl^-$ (ppm)
EN 1008	>4	-	<2000	<500
ASTM 1602	-	50 000	<3000	<500
ELOT 345	6-9	3000	<1014	<1214

### 1.1.7.2.Νερό Συντήρησης

Γενικά, το νερό που καλύπτει της προδιαγραφές της ανάμιξης είναι κατάλληλο και για την διαδικασία της συντήρησης. Ωστόσο, ο σίδηρος και τα οργανικά υλικά μπορούν να προκαλέσουν εμφάνιση κηλίδων, ιδιαιτέρως εάν το νερό ρέει έξω από το σκυρόδεμα και εξατμίζεται γρήγορα. Σε ορισμένες περιπτώσεις, Ο αποχρωματισμός είναι άνευ σημασίας, καθώς και κάθε νερό κατάλληλο για ανάμιξη ή ακόμα και ελαφρώς κατώτερης ποιότητας, είναι αποδεκτό για συντήρηση. Ωστόσο, είναι σημαντικό το νερό συντήρησης να είναι απαλλαγμένο από ουσίες που αντιδρούν επιβλαβώς για το σκληρυμένο σκυρόδεμα. Για παράδειγμα, το σκυρόδεμα δέχεται επίθεση από νερό που περιέχει ελεύθερο CO<sub>2</sub>. Το τρεχούμενο καθαρό νερό, που σχηματίζεται από το λιώσιμο των πάγων ή από τη συμπύκνωση, περιέχει ελάχιστη ποσότητα CO<sub>2</sub>, διαλύει Ca(OH)<sub>2</sub> και προκαλεί επιφανειακή διάβρωση. Η συντήρηση με θαλασσινό νερό μπορεί να οδηγήσει σε διάβρωση του οπλισμού.[5]

### 1.1.7.3.Δοκιμές στο νερό

Ένας απλός τρόπος για τον προσδιορισμό της καταλληλότητας του νερού ανάμιξης είναι η σύγκριση του χρόνου πήξης του τσιμέντου και των αντοχών κυβικών κονιακών δοκιμών που έχουν παρασκευαστεί πρώτα με το προς μελέτη νερό και ύστερα με απιονισμένο νερό, όπως ορίζεται από το πρότυπο BS EN 1008: 2002, που απαιτεί ο αρχικός χρόνος πήξης να μην είναι μικρότερος από 1 ώρα και να είναι εντός του 25% του αποτελέσματος με απιονισμένο νερό, ο τελικός χρόνος πήξης δεν πρέπει να υπερβαίνει τις 12 ώρες και πρέπει επίσης να βρίσκεται εντός του ορίου 25%. Οι μέσες αντοχές πρέπει να είναι τουλάχιστον 90% των αντοχών των δοκιμών που έχουν παρασκευαστεί με απιονισμένο νερό. Αυτές οι απαιτήσεις μπορούν να συγκριθούν με το πρότυπο BS 3146: 1980, το οποίο προτείνει για το χρόνο πήξης μία ανοχή 30 λεπτών, σε σχέση με αυτά που ορίζει το πρώτο πρότυπο, και για τις αντοχές μία ανοχή περίπου 10%. Το πρότυπο ASTM C 1602-06 απαιτεί ο χρόνος πήξης να κυμαίνεται από 1 ώρα έως 1,5 το πολύ και όσο αφορά τις αντοχές πρέπει να είναι τουλάχιστον το 90% των αντοχών των δοκιμών που έχουν παρασκευασθεί με απιονισμένο νερό.

Το αν θα εμφανιστούν ή όχι κηλίδες λόγω των προσμίξεων του νερού συντήρησης δεν μπορεί να καθοριστεί βάση της χημικής ανάλυσης. Το ενδεχόμενο να εμφανιστούν πρέπει να ελέγχεται με δοκιμές απόδοσης που περιέχουν προσομοίωση και εξάτμιση.[5]

### 1.1.8.Λόγος Νερού-Τσιμέντου

Ο λόγος **νερού-τσιμέντου (w/c)** είναι μία από τις παλιότερες παραμέτρους που χρησιμοποιούνται στην τεχνολογία τσιμέντου. Ακόμη και αυτοί που έχουν στοιχειώδεις γνώσεις, πάνω στην τεχνολογία σκυροδέματος, αντιλαμβάνονται την εξάρτηση των θλιπτικών αντοχών από τον λόγο w/c, έτσι γίνεται αντιληπτή η **σημαντικότερη επίδραση του w/c πάνω στις αντοχές**. Η αντοχή σε θλίψη σε μία συγκεκριμένη ηλικία του δείγματος, συνήθως στις εικοσιοκτώ ημέρες, είναι, παραδοσιακά, το κριτήριο για την αποδοχή ή όχι του σκυροδέματος. Η μάζα του νερού μπορεί να προσδιοριστεί, αποφασίζοντας εκ των προτέρων το είδος του νερού που χρησιμοποιείται στην ανάμιξη.

Η τιμή του **λόγου w/c** λαμβάνεται **συναρτήσεως της μάζας**. Η μάζα είναι ένας ξεκάθαρος όρος διότι το τσιμέντο εισάγεται στην μπετονιέρα βάση του βάρους του. Το είδος του

νερού ενδιαφέρει διότι, το νερό που προστίθεται στην μπετονιέρα πρέπει να είναι διαθέσιμο για την ενυδάτωση του τσιμέντου. Έτσι αποκλείεται η απορρόφηση νερού από τα αδρανή υλικά της πάστας, εάν η ποσότητά τους είναι μικρότερη από το κορεσμένο και επιφανειακά ξηρό υλικό. Αλλά αν υπάρχει ελεύθερο νερό στην επιφάνεια των αδρανών, δηλαδή νερό που υπερβαίνει την απαιτούμενη ποσότητα για την κορεσμένη και επιφανειακά ξηρή κατάσταση, τότε είναι υπό συζήτηση αν αυτή η επιπλέον ποσότητα πρέπει να συνυπολογίζεται στη μάζα του νερού, βάση της οποίας υπολογίζεται η τιμή του λόγου  $w/c$ . [6]

### 1.1.8.1. Πως ο λόγος W/C επηρεάζει τις αντοχές του σκυροδέματος

Πιθανότατα η πρώτη διατύπωση αναφορικά με την εξάρτηση των θλιπτικών αντοχών του σκυροδέματος και των μη στερεών συστατικών του σκυροδέματος έγινε από το Feret [9] στη Γαλλία το 1892. Είχε αντιληφθεί ότι η παρουσία ποσότητας νερού και φυσαλίδων αέρα, κατά την διεργασία άλεσης, δημιουργούσαν αρνητικές επιπτώσεις στις αντοχές του σκυροδέματος και βασιζόμενος στην πειραματική του εργασία καθιέρωσε τη συναρτησιακή σχέση :

$$f'_c = kC^2 / (C + W + A)^2 \quad (1)$$

Όπου C, W και A οι όγκοι του τσιμέντου, του νερού και του εγκλωβισμένου αέρα αντίστοιχα, στην μονάδα όγκου σκυροδέματος ( $1m^3$ ). Ως  $f'$  συμβολίζεται η θλιπτική αντοχή κονιάματος που προσδιορίζεται με δοκιμές αντοχών, δοκιμών συγκεκριμένου σχήματος, συγκεκριμένου μεγέθους και καθορισμένης ηλικίας. Ο Feret ανακάλυψε ότι ο εκθέτης 2 δίνει την καλύτερη προσαρμογή, και προσδιόρισε την τιμή του συντελεστή  $k$  πειραματικά.

Αναδιατυπώνοντας την παραπάνω σχέση, με την εισαγωγή του όρου W/C, μπορούμε να την εκφράσουμε ως εξής:

$$f'_c = kC / [1 + W/C + A/C]^2 \quad (2)$$

Εάν και μπορεί να θεωρηθεί ασυνήθιστη η ενασχόληση με τους όρους της ογκομετρικής αναλογίας, ωστόσο αυτή είναι η μόνη επιστημονικά προσέγγιση. Οι συνήθεις ογκομετρικές αναλογίες των συστατικών σε  $1 m^3$  σκυροδέματος είναι,  $C=0,1$ ,  $A=0,01$  έως  $0,02$  και  $W=0,2$ . Επομένως  $W/C=2$  και  $A/C=0,1$ . Έτσι απαλείφοντας τον όρο  $A/C$  η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$f'_c = k / [1 + W/C]^2 \quad (3)$$

Στην πράξη, οι ποσότητες των συστατικών του σκυροδέματος είναι ζυγισμένες κατά βάρος και όχι κατ' όγκο (πιθανότατα με εξαίρεση το νερό), και για αυτόν το λόγο συνήθως οι μηχανικοί δουλεύουν σύμφωνα με τις αναλογίες μάζας, όπου η μάζες του τσιμέντου και του νερού συμβολίζονται ως  $c$  και  $w$  αντίστοιχα. Με την χρήση της μάζας μπορούμε να γράψουμε τη σχέση ως εξής:

$$f'_c = k / [1 + 3,15w/c]^2 \quad (4)$$

Στην παραπάνω σχέση, λαμβάνεται ως παραδοχή ότι το ειδικό βάρος του νερού είναι 1, ενώ το σύνθητες ειδικό βάρος του τσιμέντου Πόρτλαντ είναι 3,15, και χρησιμοποιείται ο διεθνής όρο του λόγου νερό προς τσιμέντο συναρτήσει της μάζας  $w/c$ .

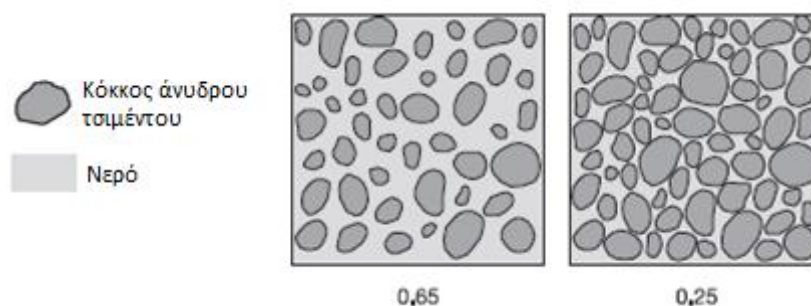
Μία άλλη συναρτησιακή σχέση μεταξύ των θλιπτικών αντοχών και του λόγου  $W/C$  αναπτύχθηκε από τον Abrams[10] στις Η.Π.Α., και έχει ως εξής:

$$f'_c = A/B^{w/c} \quad (5)$$

Όπου το  $W/C$  εκφρασμένο συναρτήσει του όγκου, όπου τα  $A$  και  $B$  είναι σταθερές που εξαρτώνται από τις συνθήκες, όπως η χρήση του τσιμέντου, η ωρίμανση και η ηλικία στην οποία διεξάγονται οι θλιπτικές δοκιμές.

Η ερευνητική προσπάθεια τόσο του Feret όσο και του Abrams αποτέλεσε μία σημαντική συμβολή στην κατανόηση, κυρίως, της χρήσης του σκυροδέματος. Ωστόσο τα είδη που χρησιμοποίησαν στις έρευνες τους, είχαν αρκετές διαφορές με τα σύγχρονα τσιμέντα, και ακόμη πιο σημαντικό είναι το γεγονός ότι τα σύγχρονα τσιμέντα περιέχουν πρόσθετα συστατικά. Επίσης τα τσιμέντα τους είχαν αλεστεί με υποδεέστερο τρόπο από ότι τα σύγχρονα ενώ η χημική τους σύσταση ήταν πολύ διαφορετική. Οι Feret και Abrams δεν χρησιμοποιούσαν ρευστοποιητές, για την ακρίβεια, δεν χρησιμοποιούσαν καθόλου πρόσθετα συστατικά. Για αυτόν το λόγο, η αρχική αντίδραση των τσιμέντων τους ήταν χαμηλή, έτσι ώστε η εργασιμότητα του σκυροδέματος εξαρτάτο σχεδόν αποκλειστικά και μόνο από την περιεκτικότητα νερού στο μίγμα.

Σε όλες τις περιπτώσεις, τα σκυροδέματα που χρησιμοποιήθηκαν από τους Feret και Abrams θα έπρεπε να παρουσιάζουν επαρκή εργασιμότητα ώστε να επιτευχθεί πλήρης συμπύκνωση. Η απόλυτη ανάγκη για επαρκή εργασιμότητα πρέπει πάντα να βρίσκεται σε πρώτη προτεραιότητα από τους παρασκευαστές σκυροδέματος. Επειδή το τσιμέντο ήταν ένα ακριβό συστατικό, το περιεχόμενο τσιμέντο των μιγμάτων που παρασκευάστηκαν ήταν σε σχετικά μικρές ποσότητες, έτσι ώστε η υψηλή περιεκτικότητα νερού να συνεπάγεται υψηλό λόγο  $w/c$ .



**Εικόνα.1.3** Διαγραμματική απεικόνιση πάστας φρέσκου τσιμέντου, με λόγο  $w/c$  0,65 και 0,25 αντίστοιχα. Οι αναλογίες των περιοχών του νερού και του τσιμέντου είναι ίσες με τους λόγους  $W/C$  κατ' όγκο.

Οι τυπικές τιμές το λόγου w/c που εφαρμόστηκαν για τη παρασκευή σκυροδέματος από τους Feret και Abrams κυμαίνονταν από 0,6 έως 1 κατά μάζα. Μία οπτική εκτίμηση της διαφοράς της απόστασης των σωματιδίων του τσιμέντου για λόγο w/c 0.65 και για λόγο 0,25 απεικονίζεται στην **Εικόνα 1.3**. [6]

#### 1.1.8.2. Απαιτήσεις νερού ενυδάτωσης

Στις αρχές του 20<sup>ου</sup> αιώνα, οι γνώσεις γύρω από την ενυδάτωση του τσιμέντου αφορούσαν κυρίως τα όσα καθιερώθηκαν από τον Le Chatelier, και δεν ήταν παρά μόνο στα μέσα του ίδιου αιώνα όταν ο Powers και οι συνεργάτες του καθιέρωσαν ποσοτικά δεδομένα για το νερό ενυδάτωσης και τους όγκους του τσιμέντου, του νερού και των προϊόντων ενυδάτωσης. Αν και τα ευρήματα του Powers ισχύουν έως σήμερα, παραδόξως κάποιοι μηχανικοί εξακολουθούν να μην είναι απολύτως ξεκάθαροι όσο αφορά το νερό που χρησιμοποιείται για την ενυδάτωση του τσιμέντου και το νερό εκείνο που είναι απαραίτητο για την πρόοδο της διαδικασίας.

Πηγή της σύγχυσης αυτής αποτελεί το γεγονός ότι για την πλήρη ενυδάτωση 1 gr C<sub>3</sub>S ή C<sub>2</sub>S απαιτούνται 0,22 gr νερό. Ο όγκος των προϊόντων ενυδάτωσης του τσιμέντου Portland, ωστόσο, είναι μεγαλύτερος από το άθροισμα των όγκων του τσιμέντου και του νερού που συμμετέχουν στην αντίδραση. Συγκεκριμένα, η ενυδατωμένη πάστα τσιμέντου αποτελείται κατά 30% v/v από πολύ μικρούς πόρους, γνωστοί και ως πόροι γέλης (gel pores). Οι πόροι γέλης πρέπει να παραμένουν πληρωμένοι με νερό.

Επομένως, ένα μίγμα με λόγο w/c 0,22 δεν μπορεί να ενυδατωθεί πλήρως. Πράγματι ένας λόγος w/c μεγαλύτερος από περίπου 0,42 είναι απαραίτητος για να είναι δυνατή η πλήρης ενυδάτωση. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι απαιτείται όγκος περίπου 1,2 ml για να καλύψει το προϊόν ενυδάτωσης 1ml άνυδρου τσιμέντου. Με άλλα λόγια ο ελάχιστος λόγος W/C κατ' όγκο για την πλήρη ενυδάτωση είναι 1,2. Αυτός ο λόγος είναι ισοδύναμος με ένα λόγο w/c κατά μάζα περίπου 0,42.

Με άλλα λόγια, η ελάχιστη μάζα του νερού που είναι απαραίτητη για την πλήρη ενυδάτωση είναι δύο φορές η μάζα που απαιτείται στοιχειομετρικά για το σχηματισμό ένυδρων ασβεστοπυριτικών ενώσεων. Μία άλλη επιπλοκή προκύπτει από το γεγονός ότι το νερό μέσα στους πόρους γέλης, το οποίο προσροφάτε στην επιφάνεια γέλης, έχει μεγαλύτερη πυκνότητα από το ελεύθερο νερό, περίπου 1,1.

Ορισμένοι μηχανικοί είναι αρκετά επιμελής διότι ένας λόγος w/c μικρότερος από 0,42 σημαίνει ότι κάποια ποσότητα τσιμέντου δεν θα ενυδατωθεί. Άλλοι πάλι είναι δυσαρεστημένοι με έναν λόγο 0,42, ή μεγαλύτερο, διότι κάποια τριχοειδή κενά παρουσιάζονται πάντα στην πάστα τσιμέντου. [6]

#### 1.1.8.3. Απαιτήσεις νερού στο σκυρόδεμα

Αναλύοντας περαιτέρω την εργαστηριακή μελέτη των Feret και Abrams και λαμβάνοντας υπόψη την απουσία ρευστοποιητών στις συγκεκριμένες συνθέσεις, γίνεται αντιληπτό ότι ο λόγος w/c στα εν λόγο μίγματα έπρεπε να είναι κατά πολύ μεγαλύτερος από 0,42 και ο λόγος W/C κατά πολύ μεγαλύτερος από 1,3. Επομένως στην εξίσωση 3, ο όρος W/C μπορεί να υποδιαιρεθεί σε δύο μέρη. Ο ένας όρος είναι ο  $W_h/C$ , όπου ως  $W_h$  συμβολίζεται ο όγκος του νερού που είναι απαραίτητος για να είναι δυνατή η πλήρης ενυδάτωση και ο

άλλος όρος είναι ο  $W_p/C$ , όπου ως  $W_p$  συμβολίζεται ο όγκος του επιπλέον νερού για την επίτευξη επαρκούς εργασιμότητας, το οποίο ονομάζεται και **νερό εργασιμότητας**. Επομένως η σχέση 3 μπορεί να γραφτεί και ως εξής:

$$f'_c = k / [1 + (W_h + W_p) / C]^2 \quad (6)$$

Λαμβάνοντας υπόψη ότι  $W_h/C = 0,42 * 3,15 = 1,32$ , η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$f'_c = k / [2,32 + W_p / C]^2 \quad (7)$$

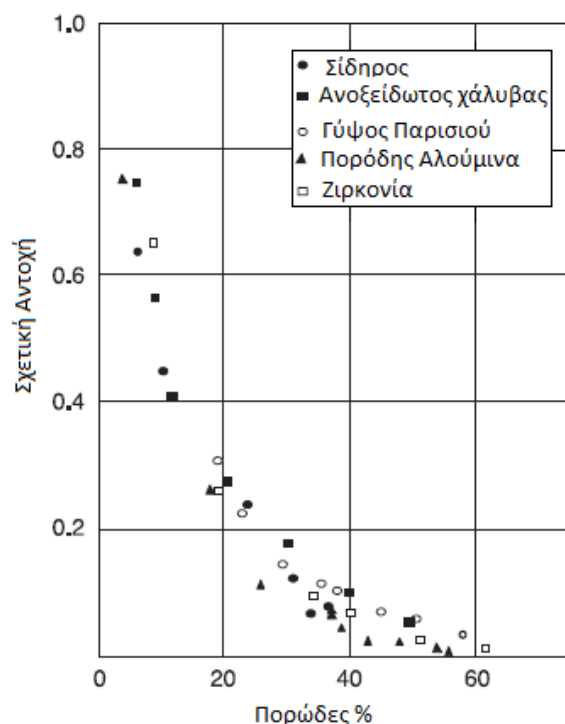
Η οποία, όσο αφορά τις αναλογίες κατά μάζα και έναν διαφορετικό συντελεστή  $k'$  γράφεται:

$$f'_c = k' / [0,74 + w_p / c]^2 \quad (8)$$

Διαχωρίζοντας το νερό που δεν λαμβάνει μέρος στον σχηματισμό της ενυδατωμένης πάστας τσιμέντου, είτε είναι χημικά ενωμένο είτε προσροφημένο, η σχέση 7 συνδέει την αντοχή του τσιμέντου με το πορώδες του συνολικού όγκου της ενυδατωμένης πάστας τσιμέντου. Έτσι η εξίσωση 7 αντιπροσωπεύει την εξάρτηση μεταξύ των θλιπτικών αντοχών του σκυροδέματος και του πορώδους της ενυδατωμένης πάστας τσιμέντου. Αυτόν το βασικό κανόνα του λόγου νερού προς τσιμέντο, οι μηχανικοί τον εφήρμοζαν στις κατασκευές σχεδόν για 75 χρόνια τον περασμένο αιώνα. Ρητή αναφορά στο πορώδες ως παράγοντας που καθορίζει τις αντοχές του σκυροδέματος έγινε από τους Sandstedt, Ledbetter και Gallaway [11] το 1973.

Η επίδραση του πορώδους της ένυδρης πάστας τσιμέντου συγκλίνει με τη γνωστή αύξηση των αντοχών, καθώς προχωρά η ενυδάτωση. Η συνέχιση της διαδικασίας ενυδάτωσης έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση του όγκου των στερεών σε σχέση με τον αρχικό όγκο που καταλάμβανε το μη ενυδατωμένο τσιμέντο. Η πρόοδος της ενυδάτωσης οδηγεί στη μείωση του πορώδους.

Μία άλλη οπτική, όσο αφορά το πορώδες, είναι η επίδραση του εγκλωβισμένου αέρα στις αντοχές του σκυροδέματος. Είναι γνωστό, για σταθερό λόγο  $w/c$ , ότι για αύξηση του περιεχόμενου αέρα κατά 1%, οι αντοχές μειώνονται, αντίστοιχα, περίπου 5%. Αυτή η εξάρτηση μεταξύ του περιεχόμενου αέρα και των αντοχών δεν παρουσιάζεται μόνο στο σκυρόδεμα. Αυτό το στοιχείο τονίστηκε από τον Neville το 1981 στην τρίτη έκδοση του βιβλίου του 'Ιδιότητες Σκυροδέματος', όπου φαίνεται ότι η ίδια καμπύλη εκφράζει τη σχέση μεταξύ της σχετικής αντοχής και του πορώδους διαφορετικών υλικών όπως το σκυρόδεμα, το σίδηρο, τον ανοξείδωτο χάλυβα, τον γύψο Παρισιού, της πορώδους αλούμινας και της ζirkονίας (**διάγραμμα Εικόνας 1.4**). [6]



**Εικόνα 1.4.** Σχέση μεταξύ πορώδους και σχετικών αντοχών διαφόρων υλικών.

#### 1.1.8.4. Μίγματα που περιέχουν πυριτική παιπάλη

Μέχρι τώρα, όσο αφορά της ενυδατωμένης πάστας τσιμέντου, έχουμε αναφερθεί μόνο στο τσιμέντο Πόρτλαντ. Ο Rao [12] διεξήγαγε πειράματα με κονιάματα που είχαν διαφορετικές περιεκτικότητες σε πυριτική παιπάλη και τα αποτελέσματα οδήγησαν στο ότι οι θλιπτικές αντοχές δεν ακολουθούν την κλασική έκφραση που συσχετίζει τις αντοχές με τον λόγο w/c. Αυτή η παρατήρηση δεν προκαλεί έκπληξη διότι οι χημικές αντιδράσεις της πυριτικής παιπάλης δεν εξελίσσονται με τον ίδιο ρυθμό που εξελίσσονται οι αντιδράσεις στο τσιμέντο Πόρτλαντ. Κατά συνέπεια, σε πολύ μικρές ηλικίες, η πυριτική παιπάλη μπορεί να θεωρηθεί ως αδρανές πολύ λεπτό υλικό και όχι ως συνδετικό.

Η κατάσταση είναι πολύπλοκη, ωστόσο, λόγω των φυσικών φαινομένων της πυριτικής παιπάλης, δεδομένου ότι επηρεάζει τη στοίβαξη των σωματιδίων, επηρεάζει τις δυνάμεις που ελέγχουν την εγγύτητα των μορίων του τσιμέντου κατά την έναρξη της διαδικασίας ενυδάτωσης. Επιπροσθέτως, τα πολύ λεπτά σωματίδια της πυριτικής παιπάλης λειτουργούν ως κέντρα συμπύκνωσης για την ενυδάτωση του τσιμέντου.

Επιπλέον, ο χημικός ρόλος της πυριτικής παιπάλης κατά τη διαδικασία της ενυδάτωσης διέπεται από την διαθεσιμότητα των  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , που προέρχονται από την ενυδάτωση των  $\text{C}_2\text{S}$  και  $\text{C}_3\text{S}$  του τσιμέντου Πόρτλαντ. Επομένως, πάνω από ένα ορισμένο όριο περιεκτικότητας στα συνδετικά υλικά, η πυριτική παιπάλη δεν μπορεί να συμμετέχει σε μεγάλο ποσοστό στις χημικές αντιδράσεις. Έτσι αυτή η επιπλέον ποσότητα πυριτικής παιπάλης που δεν αντιδρά λειτουργεί περισσότερο σαν αδρανές υλικό πληρώσεως και όχι ως συνδετικό υλικό.[6]



#### 1.1.8.5. Παράγοντες εκτός του λόγου w/c

Στην μέχρι τώρα κουβέντα, συνδέθηκε ο λόγος W/C με το πορώδες, στοιχειοθετώντας τον κανόνα του λόγου νερό προς τσιμέντο, αλλά το φαινόμενο δεν αναλύθηκε σε βάθος από φυσικής σκοπιάς. Σε κάθε περίπτωση, πρέπει να επισημανθεί ότι μόνο πόροι μεγαλύτεροι από ένα συγκεκριμένο ελάχιστο μέγεθος επηρεάζουν τις αντοχές. Έτσι γίνεται αντιληπτή η ανάγκη επεξήγησης της έννοιας της κατανομής μεγέθους πόρων. Γίνεται καταληπτό ότι περισσότερα κενά οδηγούν σε μείωση των αντοχών, ωστόσο οι αντοχές πρέπει να συνδέονται με τους δεσμούς, φυσικούς ή χημικούς, που γίνονται στη μάζα του τσιμέντου. Πως όμως μπορεί να επιτευχθεί μία καλή σύνδεση του λόγου νερό προς τσιμέντο με τον ρόλο των δεσμών;

Ένα δεύτερο ερώτημα που προκύπτει είναι η εγκυρότητα του κανόνα του λόγου νερό προς τσιμέντο για το εύρος τιμών w/c μεταξύ 0,42 και 0,22, δεδομένου ότι για αυτές τις τιμές w/c, όλα τα αρχικά πληρωμένα με νερό κενά θα έχουν πληρωθεί από τα προϊόντα της ενυδάτωσης του τσιμέντου όταν θα έχει επιτευχθεί η μέγιστη δυνατή ενυδάτωση.

Ένα τρίτο ερώτημα αφορά τις τυχόν διαφορές μεταξύ των αντοχών της ενυδατωμένης καθαρής πάστας τσιμέντου και των αντοχών της ενυδατωμένης πάστας τσιμέντου και του κονιάματος που βρίσκονται στο ίδιο μίγμα.

Για μία επιτυχή προσπάθεια απάντησης του πρώτου ερωτήματος, πρέπει να επιστρέψουμε στη έννοια του νερού εργασιμότητας. Η ανάγκη παρουσίας νερού εργασιμότητας σε μίγματα τσιμέντων Πόρτλαντ, χωρίς χημικά πρόσμικτα, προκύπτει από την παρουσία ηλεκτρικών φορτίων πάνω στη επιφάνεια των μη ενυδατωμένων σωματιδίων τσιμέντου. Αυτό το ανεπιθύμητο φαινόμενο προκαλεί την κροκίδωση των σωματιδίων του τσιμέντου, η οποία έχει αρνητική επίδραση στην εργασιμότητα και εμποδίζει στα πρώτα στάδια της ενυδάτωσης.

Σε αντίθεση με την κατάσταση που επικρατούσε πριν από μισό αιώνα, είναι πλέον δυνατή η πλήρης αποδόμηση μόρια τσιμέντου τσιμέντου (deflocculation) με την εισαγωγή υπερρευστοποιητών (High-rang water-reducing admixtures) στο μίγμα. Αυτά ειδικά οργανικά μόρια είναι πολύ αποτελεσματικά στην εξουδετέρωση των ηλεκτρικών φορτίων πάνω στην επιφάνεια των σωματιδίων του τσιμέντου, είτε μέσω ηλεκτροστατικής διαδικασίας (όπως στην περίπτωση των πολυναφθαλενίων, των πολυμελαμινών και των λιγνοσουλφιδίων), είτε με τη δημιουργία στερικού εμποδίου (όπως στην περίπτωση των πολυκαρβοξυλικών και των πολυακρυλικών). Οι υπερρευστοποιητές επιδρούν ώστε να απελευθερωθεί το νερό που σε αντίθετη περίπτωση θα ήταν παγιδευμένο στα συσσωματώματα των μορίων του τσιμέντου. Κατά συνέπεια, με τη χρήση υπερρευστοποιητών μια μικρότερη ποσότητα του νερού ανάμιξης παρέχει την απαιτούμενη εργασιμότητα. Με αυτόν τον τρόπο, μπορεί να παραχθεί εργάσιμο σκυρόδεμα με λόγο w/c πολύ χαμηλό, μέχρι και τιμή 0,22, χωρίς καθόλου πρόσθετη ποσότητα νερού εργασιμότητας.[6]

#### 1.1.8.6. Επίδραση της Ζώνης Μετάβασης

Μία μελέτη των σκυροδεμάτων με υψηλούς λόγους w/c, λόγους παρόμοιους με αυτούς που παρουσίαζαν οι συνθέσεις των Feret και Abrams, αποκαλύπτει ότι το πορώδες της

ενυδατωμένης πάστας τσιμέντου στην περιοχή των αδρανών, κυρίως των χονδρόκοκκων, είναι μεγαλύτερο από το πορώδες της πάστας σε περιοχές μακριά από αυτά. Η περιοχή κοντά στη διεπιφάνεια αδρανών και πάστας ονομάζεται ζώνη μετάβασης ή ζώνη διεπιφάνειας. Το ενυδατωμένο τσιμέντο, σε αυτές τις περιοχές, έχει διαμορφωθεί από τη διαδικασία της διαλυτοποίησης των ενώσεων τσιμέντου και από την επακόλουθη καθίζηση. Ένα τέτοιο ενυδατωμένο τσιμέντο στη βιβλιογραφία πολλές φορές το συναντούμε και ως προϊόν εξωτερικής ενυδάτωσης.

Από την άλλη πλευρά, μακριά από τη ζώνη διεπιφάνειας, η ενυδάτωση που λαμβάνει χώρα οφείλεται σε μεγάλο βαθμό στην διάχυση των μορίων του νερού στο ενυδατωμένο τσιμέντο. Τα αποτελέσματα αυτής της ενυδάτωσης πολλές φορές αναφέρονται και ως προϊόντα εξωτερικής ενυδάτωσης. Θα πρέπει να σημειωθεί, εν παρόδω, ότι ζώνη μετάβασης δεν υπάρχει στην καθαρή ενυδατωμένη πάστα τσιμέντου και παρουσιάζεται σε πολύ μικρό βαθμό στα κονιάματα.

Η έκταση της ζώνης μετάβασης έχει ευρεθεί ότι εξαρτάται από τον λόγο  $w/c$  του μίγματος. Για πολύ χαμηλές τιμές του λόγου  $w/c$  η ζώνη μετάβασης απουσιάζει διότι η ποσότητα νερού που πληρώνει τα κενά είναι μικρή και έτσι δεν επιτρέπεται η διαλυτοποίηση και η καθίζηση. Κατά συνέπεια, η ενυδάτωση εξαρτάται μόνο από τη διάχυση. Μία ερμηνεία αυτού του φαινομένου είναι πως, για πολύ χαμηλές τιμές του λόγου  $w/c$ , η επίδραση του  $w/c$  στις αντοχές δεν οφείλεται στην παρουσία των τριχοειδών πόρων που δημιουργούνται κατά την ενυδάτωση, αλλά στην ποιότητα της ενυδατωμένης πάστας τσιμέντου. Οι δύο πιθανοί τρόποι επίδρασης του λόγου  $w/c$ , ωστόσο, συνδέονται στενά όπως θα αποδειχθεί παρακάτω.[6]

#### **1.1.8.7. Επίδραση των δεσμών**

Βάση των όσον προαναφέρθηκαν, είναι δυνατή η σύνδεση του θέματος των δεσμών στην πάστα με τις αντοχές σε θλίψη. Από τα προηγούμενα, έχει αποδειχθεί ότι οι δεσμοί, όπως και το πορώδες, επηρεάζουν τις αντοχές. Οι ανάπτυξη δεσμών είναι πιο δύσκολη σε μίγματα με υψηλό λόγο  $w/c$  όπως φαίνεται στη εικόνα 1. Στην εικόνα αυτή φαίνεται ότι σε έναν λόγο  $w/c$  ίσο με 0,65 τα προϊόντα της ενυδάτωσης πρέπει να επεκταθούν σε μεγάλη απόσταση για να δημιουργήσουν, μεταξύ των μορίων, δεσμούς που δίνουν στο ενυδατωμένο σκυρόδεμα τις επιθυμητές αντοχές. Έτσι μία υψηλή τιμή του λόγου  $w/c$  επηρεάζει άμεσα την ανάπτυξη δεσμών, τόσο με την επιβράδυνση της αύξησης των αντοχών όσο και κατά απόλυτη τιμή.

Αν και έχουμε αναφέρει την επίδραση του πορώδους στις αντοχές, ξεχωριστά από την επίδραση των δεσμών, αυτές οι δύο επιδράσεις δεν είναι διακριτές. Το υψηλότερο πορώδες συνεπάγεται ασθενέστερους δεσμούς λόγω των μεγάλων αποστάσεων που απαιτούνται για την ανάπτυξη αυτών. Έτσι οι δεσμοί είναι ο βασικός παράγοντας που επηρεάζει τις αντοχές.

Πιστεύεται ότι η έννοια των δεσμών ως βασικός παράγοντας που επηρεάζει τις αντοχές, με τον λόγο  $w/c$  να επηρεάζει τη σταθερότητα των δεσμών, αποτελεί μία σημαντική

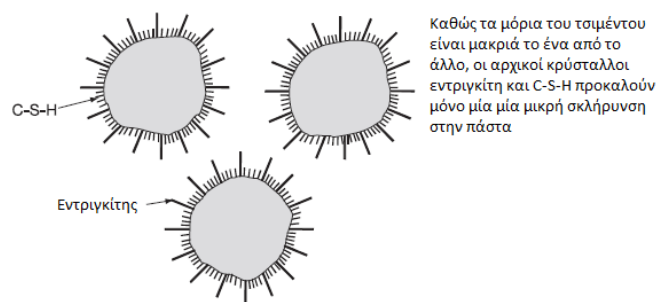
συνεισφορά για την κατανόηση των αντοχών στο σκυρόδεμα σε πρακτικό επίπεδο. Με την διατύπωση της παραπάνω πρότασης αποσαφηνίζεται πλήρως η σημασία του κανόνα του λόγου νερό προς τσιμέντο.

Σε μία προσπάθεια εμβάθυνσης της έννοιας των δεσμών και του ρόλου τους αναφορικά με τις αντοχές θα μπορούσαμε να πούμε ότι, οι δεσμοί είναι παράγοντες πρόσφυσης και συνοχής ή ότι η ποιότητα των δεσμών θα μπορούσε να αποτρέψει τη δημιουργία μικρορηγματώσεων κατά τα πρώτα στάδια της σκλήρυνσης ή ακόμα ότι η ποιότητά τους μπορεί να οριστεί ως η απουσία της διαφορικής παραμόρφωσης που οφείλεται σε συρρίκνωση. Μία εναλλακτική και πιο πλήρης διατύπωση είναι πως η ποιότητα των δεσμών μπορεί να επηρεαστεί δυσμενώς από διαφοροποιήσεις του μέτρου ελαστικότητας, του λόγου Poisson's και του συντελεστή θερμικής διαστολής μεταξύ της ενυδατωμένης πάστας τσιμέντου και των αδρανών. Αυτές οι παρατηρήσεις πρέπει να μελετηθούν περαιτέρω ώστε να επιβεβαιωθούν και να αποτελέσουν εργαλεία στα χέρια των μηχανικών.[6]

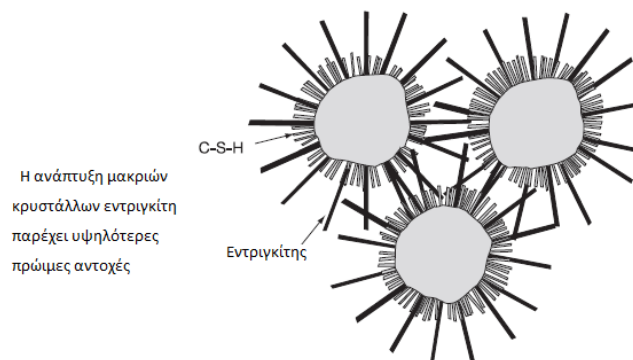
#### 1.1.8.8. Ρεολογικές πτυχές του λόγου w/c

Παραπάνω αναλύθηκε το πώς η τιμή του w/c επηρεάζει την ανάπτυξη των δεσμών. Η ανάπτυξη δεσμών αμέσως μετά την ανάμιξη έχει άμεση επίδραση στην εργασιμότητα του μίγματος. Η παραδοσιακή προσέγγιση για την επίτευξη επαρκούς εργασιμότητας είναι η προσθήκη νερού εργασιμότητας, δηλαδή, η δημιουργία μεγάλων κενών μεταξύ των μορίων του μη ενυδατωμένου τσιμέντου.

Ταυτόχρονα, για την επίτευξη ταχύτητας στην κατασκευή απαιτείται η ανάπτυξη πρώιμων αντοχών. Αυτή η συνθήκη μπορεί να ικανοποιηθεί με τη χρήση τσιμέντων με τέτοια χημική σύσταση όπου κάποιοι κρύσταλλοι αναπτύσσονται γρήγορα. Αυτοί οι γρήγορα αναπτυσσόμενοι κρύσταλλοι είναι το προϊόν της ενυδάτωσης του  $C_3A$ , και ονομάζονται εττριγκίτες. Οι εττριγκίτες δεν μειώνουν την εργασιμότητα διότι τα μόρια του τσιμέντου βρίσκονται σε σχετικά μεγάλες αποστάσεις μεταξύ τους. Η ανάπτυξη κρυστάλλων σε τσιμέντο που έχει υψηλή περιεκτικότητα σε  $C_3A$  στο μίγμα και με υψηλή τιμή λόγου w/c φαίνεται στην **Εικόνα 1.5**.



(a) Πρώιμη ενυδάτωση- λανθάνουσα περίοδος



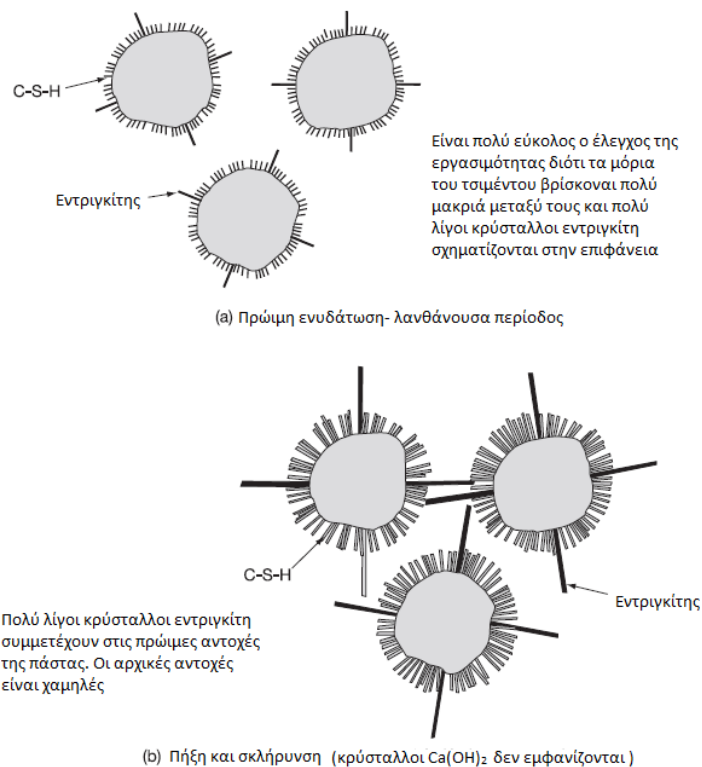
(b) Πήξη και σκλήρυνση (κρύσταλλοι  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  δεν εμφανίζονται)

**Εικόνα 1.5.** Σχηματική αναπαράσταση ενυδάτωσης πάστας με υψηλό λόγο  $w/c$  όπου περιέχεται τσιμέντο Πόρτλαντ με υψηλή περιεκτικότητα σε  $\text{C}_3\text{A}$ .

Μίγματα τσιμέντου υψηλής περιεκτικότητας σε  $\text{C}_3\text{A}$  και χαμηλού λόγου  $w/c$  δεν ικανοποιούν τις ανάγκες της σύγχρονης δόμησης. Αυτό διότι η ταχεία ανάπτυξη των ένυδρων ενώσεων μεταξύ των μικρών διαστημάτων των μορίων του τσιμέντου οδηγεί σε ταχεία απώλεια της εργασιμότητας. Ωστόσο στη μελέτη των συγκεκριμένων μιγμάτων με τη χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης δεν έχουν παρατηρηθεί <<βελόνες>> εντρινγκίτη. Επίσης κρύσταλλοι C-S-H εμφανίζονται αραιά.

Στα τέλη του 20<sup>ου</sup> αιώνα, και ως απάντηση στην ανάγκη ανάπτυξης πρώιμων αντοχών, τα τσιμέντα που παράγονταν είχαν μεγάλη περιεκτικότητα σε  $\text{C}_3\text{S}$ , όπως και  $\text{C}_3\text{A}$ , καθώς επίσης και υψηλό βαθμό καθαρότητας. Τα τσιμέντα αυτού του είδους παρουσιάζουν πολλά μειονεκτήματα, πέραν από τη πολύ γρήγορη απώλεια της εργασιμότητας. Τα βασικά μειονεκτήματα είναι η ανάπτυξη υψηλής πρώιμης θερμότητας ενυδάτωσης, η αυξημένη συρρίκνωση, η αύξηση του φαινομένου ερπυσμού (που μπορεί κατά περίπτωση να είναι ή να μην είναι επιβλαβές), μεγαλύτερος κίνδυνος επίδρασης των θειικών ιόντων, καθυστέρηση του σχηματισμού εντρινγκίτη (αν το σκυρόδεμα υποβάλλεται σε ωρίμανση με ατμό) και ενδεχομένως αύξηση του φαινομένου ενανθράκωσης.

Για χαμηλές τιμές του  $w/c$ , η υψηλή περιεκτικότητα σε  $\text{C}_3\text{A}$  είναι περιττή, και αυτό διότι η ταχεία ανάπτυξη των αντοχών εξασφαλίζεται από τα προϊόντα ενυδάτωσης των  $\text{C}_3\text{S}$  και  $\text{C}_2\text{S}$  που είναι το C-S-H, με ταυτόχρονη επικάλυψη γειτονικών μορίων τσιμέντου. Η επίτευξη ικανοποιητικής εργασιμότητας σε χαμηλές τιμές του λόγου  $w/c$ , απαιτεί ωστόσο την προσθήκη στο μίγμα HRWR (High range water reducers). Η χρήση τσιμέντου με μικρή περιεκτικότητα σε  $\text{C}_3\text{A}$  έχει ως αποτέλεσμα σκυρόδεμα με μικρό πορώδες και μειώνει τον κίνδυνο επίδρασης από θειικά ιόντα. Θα πρέπει να τονιστεί ότι τσιμέντα με χαμηλή περιεκτικότητα σε  $\text{C}_3\text{A}$  δεν συμπεριφέρονται ικανοποιητικά σε υψηλές τιμές του λόγου  $w/c$  αν απαιτούνται υψηλά ποσοστά πρώιμων αντοχών, σχηματική αναπαράσταση των εν λόγω τσιμέντων φαίνεται στην **Εικόνα 1.6**.



**Εικόνα 6.** Μειονεκτήματα τσιμέντου Πόρτλαντ με χαμηλή περιεκτικότητα σε  $\text{C}_3\text{A}$  σε μίγματα με υψηλό λόγο w/c.

Με άλλα λόγια τα τσιμέντα με υψηλή περιεκτικότητα σε  $\text{C}_3\text{A}$  και  $\text{C}_3\text{S}$  είναι επιθυμητά σε μίγματα με υψηλούς λόγους w/c, αλλά η χρήση τους μπορεί να συνεπάγεται μειονεκτήματα όσο αφορά την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Από την άλλη για μίγματα με χαμηλό λόγο w/c είναι προτιμότερο να χρησιμοποιούνται τσιμέντα με χαμηλή περιεκτικότητα σε  $\text{C}_3\text{A}$  και  $\text{C}_3\text{S}$  με τη παράλληλη χρήση υπερρυστοποιητών, οι οποίοι όμως θα πρέπει να μπορούν να ενσωματωθούν στο μίγμα.[6]

#### 1.1.8.9.Αντοχές των κονιαμάτων και του σκυροδέματος

Βάση των παραπάνω, οι αντοχές συσχετίστηκαν με τις ιδιότητες της ενυδατωμένης πάστας τσιμέντου, επίσης όμως έχει γίνει αναφορά στην επίδραση της ζώνης μετάβασης στις ιδιότητες της ενυδατωμένης πάστας τσιμέντου σε σκυροδέματα με τιμή λόγου w/c μεγαλύτερη από 0,4. Έτσι επανέρχεται το ερώτημα εάν και κατά πόσο επιδρούν τα αδρανή πάνω στις αντοχές. Με άλλα λόγια, μπορεί η εξάρτηση μεταξύ του λόγου w/c και των αντοχών που έχει διατυπωθεί μέχρι τώρα για την ενυδατωμένη πάστα τσιμέντου να επιβεβαιωθεί και για τα αδρανή;

Για την παραγωγή σκυροδέματος χρησιμοποιείται μία πολύ μεγάλη ποικιλία αδρανών, γενικότερα, οι αντοχές των αδρανών δεν εξετάζονται. Η υπόθεση, ότι οι θλιπτικές αντοχές των αδρανών δεν επηρεάζουν την αντοχή του σκυροδέματος, μπορεί να γίνει υπό τον όρο ότι, οι συνολικές αντοχές των αδρανών είναι υψηλότερες από τις αντοχές της ενυδατωμένης πάστας τσιμέντου και επίσης υψηλότερες από τις αντοχές που αναπτύσσονται στη διεπιφάνεια αδρανών-πάστας τσιμέντου. Βεβαίως οι αντοχές των

αδρανών δεν μπορούν να μετρηθούν απευθείας, αλλά υποδεικνύονται από τον τρόπο αστοχίας των δοκιμών σε δοκιμές θλιπτικών αντοχών. Εάν η αστοχία παρατηρηθεί να συμβαίνει κυρίως στη διεπιφάνεια αδρανών-πάστας, τότε ο δεσμός τους είναι ασθενέστερος από τις αντοχές της ενυδατωμένης πάστας τσιμέντου και επίσης ασθενέστερος από την αντοχή των αδρανών. Έτσι η προσεκτική εξέταση ενός δοκιμίου, μετά την υποβολή του σε δοκιμή θλίψης μπορεί να οδηγήσει σε χρήσιμα συμπεράσματα. Βεβαίως η συγκεκριμένη διαδικασία αποτελεί μία ποιοτική προσπάθεια αξιολόγησης, διότι τα ακριβή φορτία που ασκούνται σε πραγματικές συνθήκες μηχανικής καταπόνησης δεν λαμβάνονται υπόψη.

Η προηγούμενη συζήτηση θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι οδηγεί στο συμπέρασμα πως οι αντοχές του σκυροδέματος εξαρτώνται αποκλειστικά από τις αντοχές της ενυδατωμένης πάστας τσιμέντου. Εάν αυτός ο ισχυρισμός ευσταθεί θα πρέπει οι αντοχές της ενυδατωμένης πάστας τσιμέντου, συγκεκριμένης τιμής λόγου w/c, να είναι ίσες με τις αντοχές του σκυροδέματος που περιέχουν αυτήν την ενυδατωμένη πάστα τσιμέντου. Η ισχύς της παραπάνω προτάσεως δεν έχει αποδειχθεί πλήρως. Ένας λόγος αυτής της <<αβεβαιότητας>> είναι ότι η παρασκευή δοκιμών αποτελούμενα αμιγώς από πάστα τσιμέντου είναι πάρα πολύ δύσκολη (εκτός και αν πρόκειται για πολύ μικρού μεγέθους δοκίμια) λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας κατά την ενυδάτωση. Επίσης τα δοκίμια σκυροδέματος απαιτείται να έχουν μέγεθος απόλυτο πολλαπλάσιο του μεγέθους του μεγαλύτερου αδρανούς π.χ. το πρότυπο ASTM ορίζει μία αναλογία 3 προς 1.

Γενικότερα, έχει γίνει αποδεκτό εδώ και αρκετό καιρό, προκειμένου να χαρακτηρισθούν οι αντοχές ενός συγκεκριμένου τύπου τσιμέντου, εκτελούνται δοκιμές σε δοκίμια κονιάματος ή σκυροδέματος που περιέχουν το προς μελέτη τσιμέντο και όχι σε πάστες τσιμέντου.

Σε αυτή τη παράγραφο εξετάζονται οι αντοχές των κονιαμάτων συγκρινόμενες με τις αντοχές των σκυροδεμάτων με ίδιες τιμές w/c. Μεγάλο ενδιαφέρον παρουσιάζει το σχόλιο του Struble[13] με την έννοια ότι στοιχεία που να αποδεικνύουν τις αντοχές της πάστας και τον βαθμό ενυδάτωσης της πάστας τσιμέντου, ώστε να μπορέσει να κάνει μία σωστή πρόβλεψη των αντοχών του σκυροδέματος, ' γενικά έλειπαν '. Επίσης όπως αναφέρθηκε από τον Gaynor [14], το ASTM στην επιτροπή C1 εξέφρασε την άποψη ότι ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί στην αξιοποίηση αποτελεσμάτων αυτής της μεθόδου ( ASTM C 190 για την μέτρηση της αντοχής των κονιαμάτων) για την πρόβλεψη των αντοχών των κονιαμάτων. Ο Gaynor ακόμη υποστηρίζει ότι οι τσιμεντοβιομηχανίες είναι απρόθυμες να εξετάσουν οποιοδήποτε ενδεχόμενο οι αντοχές των κονιαμάτων να έχουν κάποια σχέση με τις αντοχές του σκυροδέματος. Παρ' όλα αυτά, ο Gaynor καταλήγει στην δημοσίευσή του λέγοντας ότι υπάρχει συσχετισμός μεταξύ των δοκιμών σε κονιάματα και στις επιδόσεις του τσιμέντου στο σκυρόδεμα. Πρέπει να επισημανθεί ότι ο όρος <<επίδοση>> δεν έχει ακριβώς την ίδια έννοια με τον όρο αντοχή.

Από την άλλη μεριά, ο Weaver[15] και οι συνεργάτες του, που είναι κατασκευαστές τσιμέντου, λένε αναφορικά με τη μελέτη τους ότι δεν προκύπτει κανένας συσχετισμός αντοχών από οποιοδήποτε δοκίμιο κονιάματος με αντοχές σκυροδέματος 28 ημερών, ακόμη και σε δοκίμια με πρότυπες αναλογίες μίξης. Μία εξήγηση αυτής της δήλωσης

δόθηκε από τον Neville. Με την χρήση χημικών πρόσμικτων και διαφορετικών τσιμεντοειδών υλικών, αυτή η σχέση μπορεί να είναι πιο προβληματική.

Υπάρχει επίσης μία διαφορά μεταξύ των κονιαμάτων και του σκυροδέματος. Ο σχετικός όγκος της ενυδατωμένης πάστας τσιμέντου είναι στο σκυρόδεμα μικρότερος από τον όγκο της ενυδατωμένης πάστας τσιμέντου στα κονιάματα. Αυτό σημαίνει ότι ο όγκος των κενών στο σκυρόδεμα, δηλαδή το πορώδες, είναι μικρότερος από ότι στα κονιάματα. Ως εκ τούτου θα μπορούσε, θεωρητικά, να αναμένει κανείς ότι οι αντοχές που εμφανίζει το σκυρόδεμα είναι υψηλότερες. Έτσι, η συνολική περιεκτικότητα των αδρανών στο μίγμα θα πρέπει να επηρεάζει τις αντοχές. Δυστυχώς όμως δεν υπάρχουν αρκετά αποδεικτικά στοιχεία που να επιβεβαιώνουν τον παραπάνω ισχυρισμό, και αν υπάρχουν κάποια αυτά είναι αρκετά ασαφή.

Το ζητούμενο της ερευνητικής προσπάθειας σε αυτήν την κατεύθυνση δεν είναι η εύρεση ισοδυναμίας μεταξύ των αντοχών κονιαμάτων και σκυροδέματος. Και αυτό διότι τα δοκίμια που χρησιμοποιούνται για τα δύο υλικά έχουν διαφορετικό μέγεθος και σχήμα, ως γνωστόν το σχήμα και το μέγεθος επηρεάζουν τις αντοχές κατά την υποβολή δοκιμών σε δοκιμές προσδιορισμού θλιπτικών αντοχών. Τα χαρακτηριστικά των δοκιμών δεν επηρεάζουν τις εγγενείς αντοχές, ωστόσο οι εγγενείς αντοχές είναι μία <<άπιαστη>> έννοια.

Είναι επίσης χρήσιμο να αναφερθεί ότι τα χαρακτηριστικά των δοκιμών επηρεάζουν την άνοδο της θερμοκρασίας στα κονιάματα και στο σκυρόδεμα που προκαλείται από τις εξώθερμες αντιδράσεις της ενυδάτωσης του τσιμέντου. Για την αποφυγή της επίδρασης της θερμοκρασίας, όλες οι δοκιμές μπορούν να διεξάγονται σε ισόθερμες συνθήκες. Τέτοιες δοκιμές έχουν πραγματοποιηθεί από τους Carino και Tank[16]. Στα πειράματά τους καθόρισαν σταθερές τιμές, με στόχο την ανάπτυξη αντοχών, θερμοκρασίας αναφοράς στους 23 °C και  $k_r$  εκφρασμένο σε (μέρες)<sup>-1</sup>. Η παράμετρος αυτή χρησιμοποιείται στην εξίσωση σχετικών αντοχών, δηλαδή το λόγο της αντοχής  $S$  σε ισοδύναμη ηλικία ( $t_e$ ) για μία συγκεκριμένη θερμοκρασία αναφοράς, προς τη θλιπτική αντοχή σε πεπερασμένη ηλικία  $S_u$ . Χρησιμοποιείται το σύμβολο  $t_{or}$  για την ηλικία κατά την έναρξη της ανάπτυξης αντοχών σε θερμοκρασία αναφοράς. Οι σχετικές αντοχές εκφράζονται ως:

$$S/S_u = k_r * (t_e - t_{or}) / [1 + k_r * (t_e - t_{or})] \quad (9)$$

Οι Carino και Tank χρησιμοποίησαν επτά διαφορετικά μίγματα κονιαμάτων και σκυροδέματος, με λόγους  $w/c$  0,45 και 0,6. Επίσης για την παρασκευή αυτών των μιγμάτων χρησιμοποίησαν τσιμέντα Πόρτλαντ τύπου I, τύπου II και τύπου III, ξεχωριστά το καθένα, και τσιμέντο τύπου I μαζί με ιπτάμενη τέφρα, σκωρία υψικαμίνων, επιταχυντές και επιβραδυντές. Η σημασία αυτής της μελέτης είναι, λαμβάνοντας υπόψη τα αποτελέσματα όλων των δοκιμών και για τους δύο λόγους  $w/c$ , ότι οι δύο ερευνητές κατέληξαν σε μία γραμμική σχέση μεταξύ των τιμών σταθερού ρυθμού για την ανάπτυξη αντοχών, για  $k_r$  σκυροδέματος και κονιάματος αντίστοιχα. Όμως η τιμή του  $k_r$  στο σκυρόδεμα είναι περίπου 18% μεγαλύτερη από αυτή στα κονιάματα. Αυτό σημαίνει, για την ανάπτυξη ισοδύναμων

αντοχών μακροπρόθεσμα, ότι ο αρχικός ρυθμός ανάπτυξης αντοχών στο σκυροδέμα είναι υψηλότερος σε σχέση με τα κονιάματα.

Ο στόχος της ερευνητικής προσπάθειας των Carino και Tank ήταν να καταστεί δυνατή μία εκτίμηση της ανάπτυξης των σχετικών αντοχών του σκυροδέματος σε διάφορες θερμοκρασίες, μέσω δοκιμών σε κονιάματα με ίδιο w/c. Το συμπέρασμα που μπορούμε να εξαγάγουμε από την εργασία τους είναι ότι η ανάπτυξη σχετικών αντοχών εξαρτάται από το w/c ( 0,45 ή 0,6). Τα ευρήματα αυτά υποδηλώνουν ότι η παρουσία χονδρόκοκκων αδρανών δεν επηρεάζει τον ρυθμό ανάπτυξης αντοχών. Ωστόσο, μπορεί να υπάρχει επίδραση των χονδρόκοκκων αδρανών στις τιμές των αντοχών, αλλά αυτό δεν μπορεί να αποδειχθεί από τις δοκιμές των Carino και Tank.

Παρεμπιπτόντως, μπορεί να αναφερθεί ότι κάποιες περιορισμένες δοκιμές από τον Koliás[17] έχουν δείξει συσχέτιση μεταξύ του πορώδους της πάσας τσιμέντου και των αντοχών των κονιαμάτων, και μεταξύ του πορώδους της πάσας τσιμέντου και των αντοχών του σκυροδέματος. Ωστόσο οι δύο αυτές συσχετίσεις δεν ταυτίζονται.[6]

### **1.1.9.Εργασιμότητα Σκυροδέματος**

Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι με τη διαθέσιμη τεχνολογία, τα μίγματα σκυροδέματος μπορεί να παρουσιάζουν σχεδόν οποιοδήποτε εργασιμότητα και παράλληλα μπορούν να διατηρούν τις δυνατότητες ανάπτυξης ενός εύρους φάσματος, ιδιοτήτων σκλήρυνσης που απαιτούνται για μία κατασκευή. Μία τέτοια τεχνολογία μπορεί να απαιτεί τη χρήση ειδικών προϊόντων, όπως πρόσθετων αδρανών υλικών, συμπληρωματικών τσιμεντοειδών υλικών και πρόσμικτων.[4]

#### **1.1.9.1. Σχετική Ορολογία**

Βάση του προτύπου ASTM C 125 , σχετικό με τα σκυροδέμα και τα αδρανή του, ως εργασιμότητα του σκυροδέματος ορίζεται 'αυτή η ιδιότητα που καθορίζει την προσπάθεια που απαιτείται ώστε μία ποσότητα νωπού σκυροδέματος να μπορέσει χρησιμοποιηθεί με ελάχιστη απώλεια της ομοιογένειάς της'. Το Αμερικάνικο Ινστιτούτο σκυροδέματος (ACI) ορίζει την εργασιμότητα ως αυτήν την ιδιότητα του νωπού σκυροδέματος ή των κονιαμάτων που καθορίζει την ευκολία με την οποία μπορούν να αναμιχθούν οι πρώτες ύλες με αποτέλεσμα την ομογενοποίησή τους. Η εργασιμότητα συνεπάγεται συμβατότητα, συνοχή, καλό φινίρισμα, σκληρότητα, και αντλησιμότητα. Οι προδιαγραφές κάθε έργου συνήθως περιέχουν οδηγίες σχετικές με την μέγιστη εργασιμότητα , βάση της περιεκτικότητας νερού, του μέγιστου λόγου νερό προς τσιμέντο w/c, των τιμών κάθισης (όπως μετράται σύμφωνα με τις δοκιμές του προτύπου ASTM για υδραυλικό σκυροδέμα) και μερικές φορές βάση της ελάχιστης περιεκτικότητας τσιμέντου. Αυτές οι καθορισμένες ιδιότητες του νωπού σκυροδέματος ενδεχομένως να μην περιγράφουν πλήρως την επιθυμητή εργασιμότητα για έναν κατασκευαστή σε πραγματικές συνθήκες. Τα αναμίγματα σκυροδέματος δοσομετρούνται ώστε να παρέχουν καλύτερη εργασιμότητα, εν συνεχεία, προκύπτει η ανάγκη, από τους κατασκευαστές και τους παραγωγούς σκυροδέματος, καθορισμού μίας μεθόδου ώστε να κατορθώνεται υψηλότερη



εργασιμότητα βάση συγκεκριμένων κριτηρίων, που στοιχειοθετούνται από τους μηχανικούς σχεδιασμού. Η περιγραφή των σημαντικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος γίνεται με τέσσερεις βασικούς όρους, την εργασιμότητα (η οποία ορίστηκε παραπάνω), τη ρεολογία, τη συνεκτικότητα και το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα [self-consolidating concrete (SCC)]. Η ρεολογία ορίζεται ως η επιστήμη που ασχολείται με την παραμόρφωση και την ροή της ύλης ή την ικανότητα αυτής να ρέει ή να παραμορφώνεται. Ως προς το σκυρόδεμα, υπάρχει μια σχέση μεταξύ της διατμητικής τάσης και του ρυθμού της διάτμησης συν τη διατμητική τάση, όταν ο ρυθμός της είναι 0. Μία άλλη προσέγγιση στο θέμα είναι ο χαρακτηρισμός των ρεολογικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος με χρήση του ορίου ελαστικότητας και του πλαστικού ιξώδους. Αυτές οι ιδιότητες πλέον μετρούνται, σε εργαστηριακές συνθήκες, με μεγάλα ροόμετρα. Η ρεολογία του σκυροδέματος, όπως και η κάθιση, εξαρτάται από το χρόνο, καθώς μετράται από το χρόνο της αρχικής ανάμιξης έως την ώρα της δοκιμής.

Η σπουδαιότητα της ρεολογίας και των μετρήσεων αυτής είναι έγκειται στο ότι μπορεί να τροφοδοτεί με απολύτως χρήσιμα δεδομένα και συμπεράσματα, εργαστηριακών μελετών σχετικά με την εργασιμότητα, την βιομηχανία παραγωγής σκυροδέματος. Πληροφορίες σχετικά με τη συμπεριφορά του νωπού σκυροδέματος σχετικές με την δόνηση και την ρεολογία κατά την ενοποίηση μπορούν να βρεθούν στην έκθεση ACI 309.1R του Αμερικανικού Ινστιτούτου σκυροδέματος. Δυστυχώς αξιόπιστες δοκιμές, με τις οποίες να μπορούν να μετρηθούν οι ρεολογικές ιδιότητες του σκυροδέματος, δεν έχουν αναπτυχθεί. Αυτό που έχει αποδειχθεί είναι μια αρκετά σαφή σχέση μεταξύ της κάθισης και της ροής με τον καθορισμό της απόδοσης κόπωσης. Οι ανάπτυξη σχετικών εργαστηριακών δοκιμών και η καλύτερη κατανόηση των πληροφοριών που παρέχονται από τα αποτελέσματα, ρεολογικών δοκιμών και της μελέτη της σύστασης του σκυροδέματος, αποτελούν τους σημερινούς στόχους της έρευνας.

Η συνεκτικότητα είναι ένας όρος που σχετίζονται με το νωπό σκυρόδεμα. Οι ορισμοί του ASTM και του ACI, σχετικά με την συνεκτικότητα, είναι κατ' ουσία πανομοιότυποι. Το πρότυπο ASTM 116R ορίζει την συνεκτικότητα ως τη σχετική κινητικότητα ή την ικανότητα του νωπού σκυροδέματος ή κονιάματος να ρέει. Οι συνήθεις μετρήσεις είναι η κάθιση για το σκυρόδεμα και η εξάπλωση για τα κονιάματα ή τα ενέματα. Η λέξη συνεκτικότητα έχει πολλαπλή έννοια αλλά δύο ερμηνείες της είναι απαραίτητες στον ορισμό των ιδιοτήτων του σκυροδέματος. Η ροή των νωπών μιγμάτων, όπως μετράται με τις δοκιμές κάθισης, και η διακύμανσή της, από δοκίμιο σε δοκίμιο, είναι δύο σημαντικές ιδιότητες για τον επιτυχή σχεδιασμό μίας κατασκευής. Στην πράξη, όταν επιτευχθεί μία ικανοποιητική εργασιμότητα, η ποιότητα του σκυροδέματος εξαρτάται από τον έλεγχο της διακύμανσης των τιμών κάθισης, διατηρώντας ομοιόμορφη τη συνεκτικότητα.

Το 1991 ο Tattersall πρότεινε τον διαχωρισμό της σχετικής με την εργασιμότητα ορολογίας σε τρεις τάξεις.

Κλάση 1: Ποιοτική, πρέπει να χρησιμοποιείται με γενικό περιγραφικό τρόπο, χωρίς καμία προσπάθεια να ποσοτικοποιηθεί, π.χ. εργασιμότητα, ρευστότητα, συνεκτικότητα, σταθερότητα, ικανότητα άντλησης.

Κλάση 2: Η ποσοτική εμπειρική, χρησιμοποιείται ως μια απλή ποσοτική δήλωση της συμπεριφοράς σε ένα συγκεκριμένο σύνολο συνθηκών, π.χ. κάθιση, εξάπλωση.

Κλάση 3: Ποσοτική θεμελιώδη, χρησιμοποιείται αυστηρά σύμφωνα με τους ορισμούς του BS 5168: Λεξικό όρων ρεολογίας, π.χ. ιξώδες, κινητικότητα, ρευστότητα, βαθμός απόδοσης.

Ένας τέτοιος διαχωρισμός είναι χρήσιμος στο μέτρο που εκθέτει με σαφήνεια τα όρια πολλών όρων σχετικά με την εργασιμότητα.[4,19]

#### **1.1.9.2. Ομοιομορφία Σκυροδέματος**

Στα αναμίγματα σκυροδέματος, οι αναλογίες πρέπει πάντα να αναπτύσσονται, με τέτοιο τρόπο, ώστε στο τελικό σκληρυμένο σκυρόδεμα να επιτυγχάνονται αυτές οι φυσικές ιδιότητες που απαιτούνται για να είναι σε θέση μία κατασκευή να αντέξει την έκθεση στις αναμενόμενες περιβαλλοντικές συνθήκες. Εξίσου σημαντικό, για το νωπό σκυρόδεμα, είναι η προσεκτική μελέτη της εργασιμότητας και άλλων ιδιοτήτων απαραίτητων για την επιτυχή ανάμιξη, μεταφορά, συνεκτικότητα, διάσπρωση και έγκαιρη ολοκλήρωση της διαδικασίας. Μετά την ανάπτυξη των αναμιγμάτων και τον ορισμό των αναγκαίων χαρακτηριστικών που επηρεάζουν την εργασιμότητα, είναι πολύ σημαντικό οι ποσότητες των συστατικών να βρίσκονται σε σχετική ομοιομορφία.

Η τυχόν ανομοιομορφία μπορεί να γίνει εύκολα εμφανής τόσο στη φάση του νωπού όσο και στη φάση του σκληρυμένου σκυροδέματος. Για τον προσδιορισμό της ανομοιομορφίας υπάρχουν δύο διακριτές μετρήσεις, η μέτρηση της διακύμανσης της ομοιομορφίας στην ίδια παρτίδα δοκιμίων και η μέτρηση της διακύμανσης ομοιομορφίας από παρτίδα σε παρτίδα. Η δειγματοληψία, στη μέθοδο της διακύμανσης της ανομοιομορφίας στην ίδια παρτίδα, γίνεται με λήψη δειγμάτων από τον αναμεικτήρα, στην αρχή, στη μέση και στο τέλος της παρτίδας. Οι διακυμάνσεις αυτές μπορούν να αποδοθούν στην ύπαρξη σκληρυμένου τσιμέντου στον αναμεικτήρα, σε φθορά των λεπίδων του αναμεικτήρα, σε ανεπαρκή ή υπερβολικό χρόνο ανάμιξης, σε χαμηλή ταχύτητα, σε ακατάλληλη ακολουθία φόρτωσης των υλικών στον αναμεικτήρα ή σε ενδεχόμενη υπερφόρτωση του αναμεικτήρα.

Οι διακυμάνσεις ομοιομορφίας, μελετούμενες από παρτίδα σε παρτίδα, μπορούν να αποδοθούν στις διαφοροποιήσεις στις συνολικές συνθήκες υγρασίας των αδρανών, στην κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών, στην έλλειψη ακρίβειας κατά τη ζύγιση ή σε ελαττώματα του εξοπλισμού ογκομετρικής δοσομέτρησης και φυσικά σε λόγους που οφείλονται οι διακυμάνσεις μεταξύ της ίδιας παρτίδας. Βάση των αναλογιών, τα αναμίγματα σκυροδέματος μπορούν να διαχωριστούν σε δύο κατηγορίες, αυτά με σχετικά υψηλούς λόγους νερό προς τσιμέντο w/c και αυτά με χαμηλούς. Η χρήση ακατάλληλου υλικού όπως επίσης και ο λανθασμένος χειρισμός εξοπλισμού, μπορεί να οδηγήσει σε ένα οριακό ανάμιγμα που διαχωρίζονται τα συστατικά του. Η ομοιομορφία και η μεταφορά του σκυροδέματος πρέπει πάντα να εξετάζεται, επειδή όσο μεγαλύτερη είναι η ομοιομορφία κατά την παραγωγή, τη μεταφορά και εφαρμογή του σκυροδέματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα να επιτευχθούν οι επιθυμητές ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος.[4]

### 1.1.9.3. Μέτρηση της Εργασιμότητας με Εμπειρικές Ποσοτικές Μεθόδους

Πολλές δοκιμές έχουν επινοηθεί και χρησιμοποιούνται εδώ και πολλά χρόνια για τον προσδιορισμό ποσοτικών εμπειρικών τιμών της κλάσης 2 που προαναφέρθηκε. Δίνουν μια μόνο μέτρηση, και γι' αυτό συχνά αναφέρονται και ως δοκιμές «μοναδικού σημείου», για να διακρίνονται από τις «δοκιμές δύο σημείων», οι οποίες δίνουν δύο μετρήσεις.

Ήδη από το 1947, είκοσι εννέα δοκιμές μοναδικού σημείου είχαν περιγραφεί ως οι πιο σημαντικές από εκείνες που είχαν αναπτυχθεί έως εκείνη τη στιγμή (Glanville et al., 1947). Μια πρόσφατη σειρά από δεκαέξι δοκιμές μοναδικού σημείου είναι διαθέσιμη για τρέχουσα χρήση (RILEM, 2002). Λίγες, εάν υπάρχουν, από τις δοκιμές που περιγράφονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν ώστε να συμβάλουν στις προσπάθειες αύξησης της εργασιμότητας σε πρακτικό επίπεδο. Πράγματι, πολλά έχουν αναπτυχθεί τις δύο τελευταίες δεκαετίες, ώστε να ικανοποιηθεί η ανάγκη για σκυρόδεμα αυξημένης εργασιμότητας, όπως το πιο πρόσφατο παράδειγμα του αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος.

Τέσσερα είδη δοκιμών συμπεριλαμβάνονται στις πρόσφατες Βρετανικές προδιαγραφές, η κάθιση, ο παράγοντας συμπύκνωσης, ο έλεγχος της εργασιμότητας ( με τη συσκευή Vebe) και η εξάπλωση, αυτές οι μέθοδοι θα αναπτυχθούν παρακάτω μαζί με τις δοκιμές εξάπλωσης εξαιτίας κάθισης και τις δοκιμές συνεκτικότητας, που αντικατέστησαν τις δοκιμές του παράγοντα συμπύκνωσης στα τελευταία ευρωπαϊκά πρότυπα. Οι δοκιμές αυτές παρουσιάζονται και περιγράφονται στις εικόνες 7-12. Ο πίνακας 4 δίνει τις αρχές λειτουργίας των μεθόδων αυτών και ορισμένες παρατηρήσεις σχετικά με τη χρήση τους.

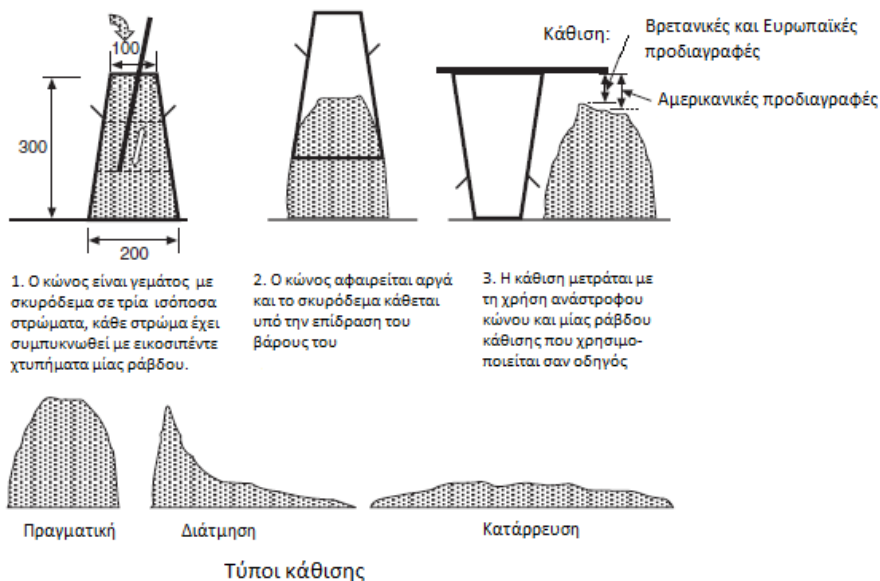
Η δοκιμή κάθισης (**εικόνα 1.7**), είναι μια απλή διαδικασία, γρήγορη και φθηνή, χρησιμοποιείται ευρέως σε όλες τις κατηγορίες σκυροδέματος υψηλών και μεσαίων εργασιμοτήτων. Ορισμένα από τα μειονεκτήματα της μεθόδου αναφέρονται επίσης στον **Πίνακα 1.4**. Υπάρχουν βέβαια και κάποιες διαφοροποιήσεις της εφαρμογής της μεθόδου σε διάφορες χώρες που προκύπτουν από ασυμφωνία μεταξύ Ευρωπαϊκών και Αμερικανικών προτύπων.

Πρώτον, οι Ευρωπαϊκές και Αγγλικές προδιαγραφές διευκρινίζουν ότι η κάθιση θα πρέπει να μετράται στο υψηλότερο σημείο του σκυροδέματος, ενώ το Αμερικανικό πρότυπο καθορίζει ότι η μέτρηση πρέπει να γίνεται στο εκτοπισμένο αρχικό κέντρο της άνω επιφάνειας του σκυροδέματος (όπως φαίνεται στην **Εικόνα 1.7**). Προφανώς, η ίδια δοκιμή στο ίδιο σκυρόδεμα μπορεί να δώσει διαφορετικές τιμές ανάλογα με το σημείο που γίνεται η μέτρηση.

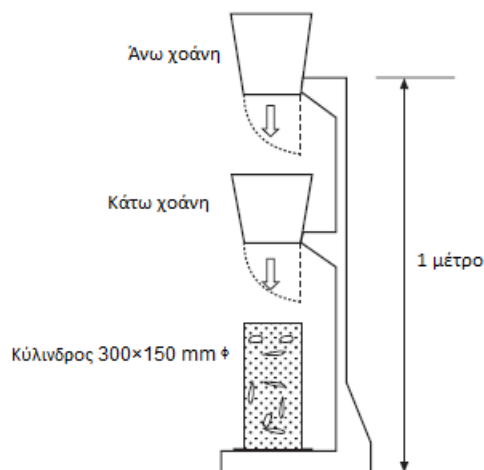
Δεύτερον, βάση του Βρετανικού προτύπου καταγράφονται μόνο οι τιμές της πραγματικής κάθισης και δεν καταγράφονται οι τιμές της διάτμησης ή της κατάρρευσης (**Εικόνα 1.7**). Το Αμερικανικό πρότυπο περιλαμβάνει ένα παρόμοιο περιορισμό για τη διατμητική κάθιση, αλλά επιτρέπει μετρήσεις της κατάρρευσης (συχνά αναφέρονται τιμές των 250 mm και άνω).

Πίνακας 1.4. Συνηθισμένες δοκιμές ενός σημείου για τον προσδιορισμό της εργασιμότητας.

Δοκιμή	Αρχή μεθόδου	Σχόλια
Κάθιση (Εικόνα 1.7)	Μετρά την ιδιότητα ροής του σκυροδέματος υπό το βάρος του μετά από πρότυπη συμπίκνωση	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Κατάλληλη για σκυροδέματα υψηλής και μεσαίας εργασιμότητας</li> <li>• Ευαίσθητη σε μικρές αλλαγές στην περιεκτικότητα νερού</li> <li>• Πολύ απλή, κατάλληλη για επιτόπου χρήση</li> <li>• Η επιτυχία της εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον χειριστή</li> </ul>
Παράγοντας συμπίκνωσης (Εικόνα 1.8)	Μετρά την ποσότητα ενός καθορισμένου μεγέθους της εργασίας (ύψος πτώσης) στη συμπίκνωση	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Κατάλληλη για μίγματα χαμηλής, μεσαίας και υψηλής εργασιμότητας</li> <li>• Αρκετά απλή, απαιτεί βαθμονόμηση</li> <li>• Μικρότερη εξάρτηση από την δεξιότητα του χειριστή από ότι η κάθιση</li> </ul>
Μέθοδος Vebe (Εικόνα 1.9)	Μετρά την ποσότητα της εργασίας (χρόνοι για σταθερές δονήσεις) για πλήρη συμπίκνωση	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Κατάλληλη για μίγματα με χαμηλές και πολύ χαμηλές εργασιμότητες</li> <li>• Μεγαλύτερη συσχέτιση με τις συνθήκες διάστρωσης του σκυροδέματος από ότι η κάθιση</li> <li>• Μερικές φορές είναι δύσκολο να καθορισθεί το τελικό σημείο</li> </ul>
Τράπεζα εξάπλωσης (Εικόνα 1.10)	Μετρά την επίδραση ενός ποσού της εργασίας (εξογκώματα) στην εξάπλωση	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Κατάλληλη για μίγματα με υψηλές και πολύ υψηλές εργασιμότητες</li> <li>• Δίνει μία ένδειξη της τάσης που έχει το μίγμα να διαχωριστεί</li> <li>• Αρκετά απλή, εξαρτάται από τη δεξιότητα του χειριστή</li> </ul>
Εξάπλωση εξαιτίας κάθισης (Εικόνα 1.11)	Όπως και στην κάθιση, μετρά την ιδιότητα ροής του σκυροδέματος υπό το βάρος του μετά από αυτοσυμπύκνωση.	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Εφαρμόζεται σε αυτοσυμπυκνούμενα σκυροδέματα</li> <li>• Πολύ απλή, κατάλληλη για επί τόπου χρήση</li> <li>• Εξαρτάται σε μικρό βαθμό από τη δεξιότητα του χειριστή</li> </ul>
Βαθμός συνεκτικότητας (Εικόνα 1.12)	Μετρά την επίδραση ενός ποσού εργασίας (πτώση του σκυροδέματος από την άκρη του δοχείου) πάνω στην συμπίκνωση	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Μια εναλλακτική της δοκιμής παράγοντα συμπίκνωσης</li> <li>• Απλή, κατάλληλη για επί τόπου χρήση</li> <li>• Πιθανόν να εξαρτάται από τη δεξιότητα του χειριστή</li> </ul>



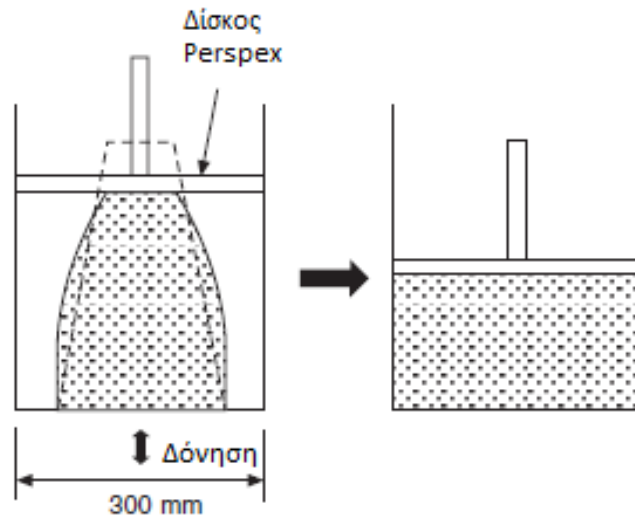
Εικόνα 1.7. Δοκιμή κάθισης (BS 1881 PART 102: 1983; BS EN 12350-2: 2000; ASTM C 143-90a).



- Το σκυρόδεμα φορτώνεται στην άνω χοάνη
- Η καταπακτή ανοίγει, και το σκυρόδεμα πέφτει στην κάτω χοάνη
- Η καταπακτή της κάτω χοάνης ανοίγει, και το σκυρόδεμα πέφτει στον κύλινδρο
- Ο κύλινδρος με το σκυρόδεμα ζυγίζεται, για να δώσει το εν μέρει συμπυκνωμένο βάρος του σκυροδέματος
- Ο κύλινδρος γεμίζει με πλήρως συμπυκνωμένο σκυρόδεμα
- Ο κύλινδρος και το σκυρόδεμα ζυγίζεται, για να δώσει το βάρος του πλήρους συμπυκνωμένου σκυροδέματος

$$\text{Παράγοντας συμπίκνωσης} = \frac{\text{βάρος του μερικώς συμπυκνωμένου σκυροδέματος}}{\text{βάρος του πλήρους συμπυκνωμένου σκυροδέματος}}$$

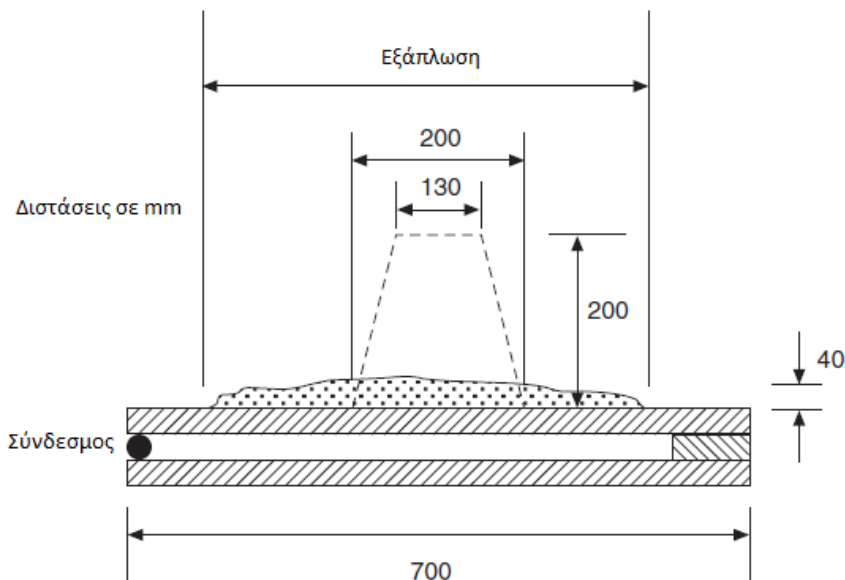
Εικόνα 1.8. Δοκιμή παράγοντα συμπίκνωσης (BS 1881 Part 103: 1993).



1. Η δοκιμή κάθισης γίνεται σε άκαμπτο δοχείο
2. Ένας δίσκος από καθαρό Πλεξιγκλάς, ελεύθερος να κινείται κατακόρυφα, χαμηλώνει ώστε να εφάπτεται της άνω επιφάνεια του σκυροδέματος
3. Δόνηση, με σταθερό ρυθμό, εφαρμόζεται από μία δονητική τράπεζα

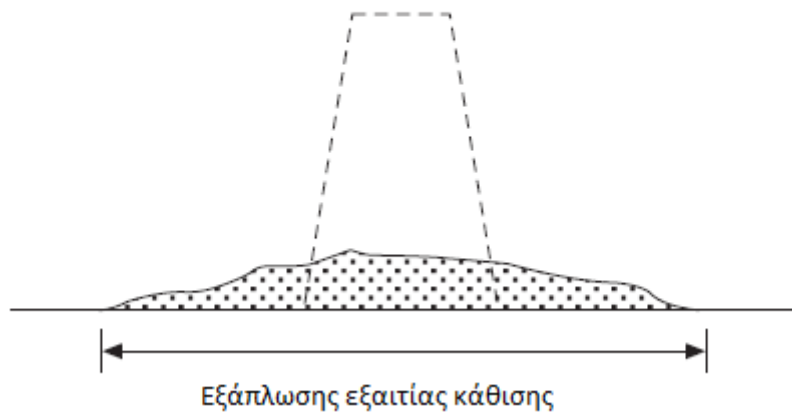
Ο βαθμός Vebe είναι ο χρόνος (σε δευτερόλεπτα) ώστε η περιοχή του δοχείου κάτω από το δίσκο να περιέχει μόνο σκυρόδεμα και καθόλου αέρα.

**Εικόνα 1.9.** Δοκιμή Vebe (BS 1881 Part 104: 1983, BS EN 12350-3: 2000).



1. Ένα κωνικό καλούπι (2/3 του ύψους του κώνου κάθισης) χρησιμοποιείται για να μορφοποιήσει ένα δείγμα του σκυροδέματος στο κέντρο της πλατφόρμας (διάστασης 700 χιλιοστών)
2. Η μία άκρη της πλατφόρμας σηκώνεται και ξανακατεβαίνει 15 φορές

**Εικόνα 1.10.** Δοκιμή τράπεζας εξάπλωσης (BS 1881 Part 105: 1984, BS EN 12350-5: 2000).

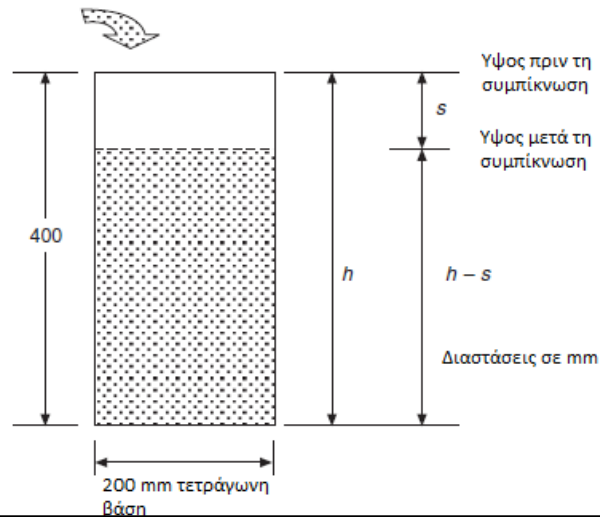


1. Ένας κώνος κάθισης πληρώνεται χωρίς συμπίεση
2. Ο κώνος αφαιρείται, και η εξάπλωση κάθισης είναι η διάμετρος της εξάπλωσης (μέσος όρος δύο κάθετων διαμέτρων)
3. Μερικές φορές επίσης μετράται και ο χρόνος για την επίτευξη εξάπλωση 500 mm
4. Η τράπεζα πρέπει να είναι λεία, καθαρή και επίπεδη

**Εικόνα 1.11.** Δοκιμή εξάπλωσης εξαιτίας κάθισης.

Η δοκιμή τις τράπεζας εξάπλωσης εισήχθη από τα Γερμανικά πρότυπα, όταν η χρήση υπερρευστοποιητών και σκυροδεμάτων υψηλών εργασιοτήτων (δηλαδή κάθιση με κατάρρευση) έγινε πολύ δημοφιλής στη δεκαετία του 1970. Ωστόσο η δοκιμή αυτή επικρίθηκε έντονα (Dimond και Bloomer, 1977), ακόμα και πριν την επίσημη προσάρτησή τους, το 1983, στα Βρετανικά πρότυπα, για διάφορους λόγους, όπως:

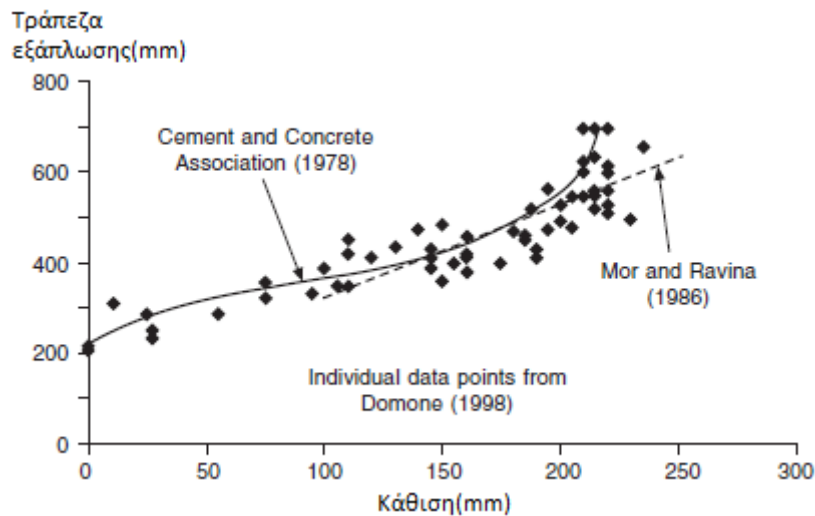
- Η δοκιμή εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τη δεξιότητα του χειριστή.
- Όταν η εξάπλωση υπερβαίνει το 510 mm (συνιστώμενη ελάχιστη εξάπλωση για σκυρόδεμα) το πάχος σκυροδέματος είναι περίπου ίσο με 20 mm, έτσι η δοκιμή δεν μπορεί να είναι ένα ικανοποιητικό μέτρο που να αντιπροσωπεύει τις συνολικές ιδιότητες του σκυροδέματος.
- Υπάρχει ένας υψηλός βαθμός συσχέτισης μεταξύ της αρχικής εξάπλωσης, πριν από την αναπήδηση της τράπεζας και της εξάπλωσης μετά την αναπήδηση, και κατά συνέπεια δεν υπάρχουν ποιοτικές πληροφορίες που να συσχετίζουν την εξάπλωση με την αναπήδηση.



1. Το δοχείο πληρώνεται προσεχτικά με σκυρόδεμα
  2. Η περίσσεια του σκυροδέματος απομακρύνεται με μία σπάτουλα προσεχτικά ώστε η πάνω επιφάνεια να μείνει λεία
  3. Το σκυρόδεμα συμπακνώνεται μέσω δόνησης
  4. Το τελικό ύψος του σκυροδέματος μετράται στο μέσω της κάθε πλευράς και μετά υπολογίζεται ο μέσος όρος
- Βαθμός συνεκτικότητας= $h/(h-s)$

**Εικόνα 1.12.** Δοκιμή για την εύρεση του βαθμού συνεκτικότητας (BS EN 12350-4: 2000).

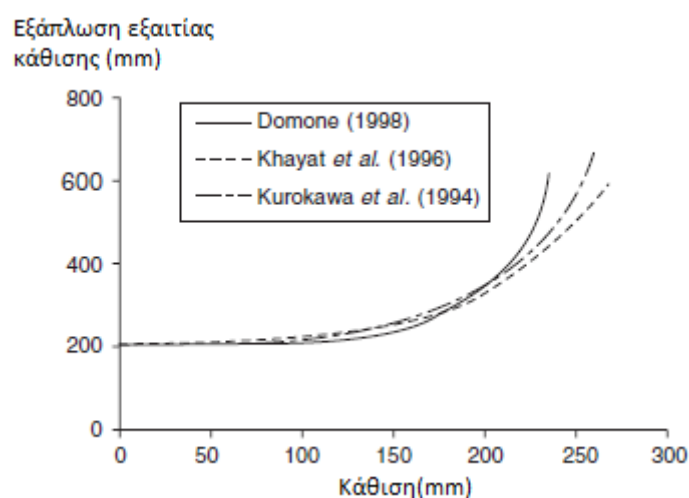
Η συσχέτιση μεταξύ της εξάπλωσης και της κάθισης φαίνεται στην **Εικόνα 1.13** όπου για την κατασκευή του διαγράμματος χρησιμοποιούνται τιμές από τρεις πηγές. Οι δύο από τις τρεις καμπύλες έχουν σιγμοειδή μορφή και δείχνουν την ευαισθησία της δοκιμής τράπεζας εξάπλωσης για υψηλές τιμές κάθισης. Η τρίτη καμπύλη είναι ευθεία γραμμή για τιμές κάθισης από 100 έως 250 mm. Ωστόσο, η διασπορά είναι τόσο μεγάλη ώστε να ικανοποιούνται και οι δύο προαναφερθείσες μορφές γραμμικής απεικόνισης.



**Εικόνα 1.13.** Συσχέτιση τιμών των δοκιμών κάθισης και τράπεζας εξάπλωσης



Η δοκιμή εξάπλωσης εξαιτίας κάθισης (**Εικόνα 1.11**) μπορεί να θεωρηθεί μία εναλλακτική της δοκιμής τράπεζας εξάπλωσης, όπως έχει ήδη αναφερθεί, χρησιμοποιείται ευρέως για τον έλεγχο αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος υψηλής ρευστότητας. Η μόνη επιπλέον επιπλοκή με την δοκιμή κάθισης είναι ότι τα αποτελέσματα που εξάγονται από την επιφάνεια της τράπεζας κάθισης εμπεριέχουν μεγαλύτερη ευαισθησία. Η συσχέτιση μεταξύ της κάθισης και της δοκιμής εξάπλωσης εξαιτίας κάθισης φαίνεται στην **Εικόνα 1.14**, στο συγκεκριμένο διάγραμμα φαίνονται αποτελέσματα από τρεις ερευνητικές μελέτες. Δεν αποτελεί έκπληξη το γεγονός ότι για καθίσεις μεγαλύτερες από 200mm, η ευαισθησία (της κάθισης) είναι πολύ μεγάλη για μεταβολές της ρευστότητας του σκυροδέματος. Οι καλύτερες καμπύλες συσχέτισης αποκλίνουν στις υψηλές τιμές κάθισης, γεγονός που μπορεί να οφείλεται σε διαφορετική μεθοδολογία στις μετρήσεις π.χ. διαφορετικός τρόπος μέτρησης της κάθισης όπως αναφέρθηκε παραπάνω.



**Εικόνα 1.14.** Εξάρτηση μεταξύ μετρήσεων κάθισης και εξάπλωσης εξαιτίας κάθισης

Δεδομένου ότι οι δοκιμές που καταγράφονται στον **Πίνακα 1.4**, έχουν ως βάση τους διαφορετικές αρχές και μετρούν διαφορετικές ιδιότητες, δεν αποτελεί έκπληξη ότι μόνο σε έναν, μεγάλο, βαθμό κατορθώνεται συσχέτιση μεταξύ αυτών και με μεγάλη διασπορά. Το παραπάνω φαίνεται να επιβεβαιώνεται στο διάγραμμα της **Εικόνας 1.15**, τα αποτελέσματα του οποίου προέρχονται από μία, αλλά πολύ πλήρη, έρευνα. Αυτές οι γενικές συσχετίσεις αντικατοπτρίζονται με απόλυτη συνέπεια και καθαρότητα στα Ευρωπαϊκά πρότυπα για το σκυρόδεμα, EN 206: 2000, που παρατίθενται στον **Πίνακα 1.5**. Οι κλάσεις που διαμορφώνονται στα πρότυπα δεν συνδέονται άμεσα, αλλά είναι σύμφωνες με τις συσχετίσεις που φαίνονται στα διαγράμματα των **Εικόνων 1.13** και **1.15**.

**Πίνακας 1.5.** Κλάσεις συσχέτισης των μεθόδων σύμφωνα με το πρότυπο BS EN 206-1: 2000

Κάθιση		Δοκιμή Vebe		Βαθμός συνεκτικότητας		Εξάπλωση	
Κλάση	Εύρος (mm)	Κλάση	Εύρος (secs)	Κλάση	Εύρος	Κλάση	Εύρος (mm)
S1	10–40	V0	≥ 31	C0	≥ 1.46	F1	≤ 340
S2	50–90	V1	30–21	C1	1.45–1.26	F2	350–410
S3	100–150	V2	20–11	C2	1.25–1.11	F3	420–480
S4	160–210	V3	10–6	C3	1.10–1.04	F4	490–550
S5	≥ 220	V4	5–3			F5	560–620
						F6	≥ 630

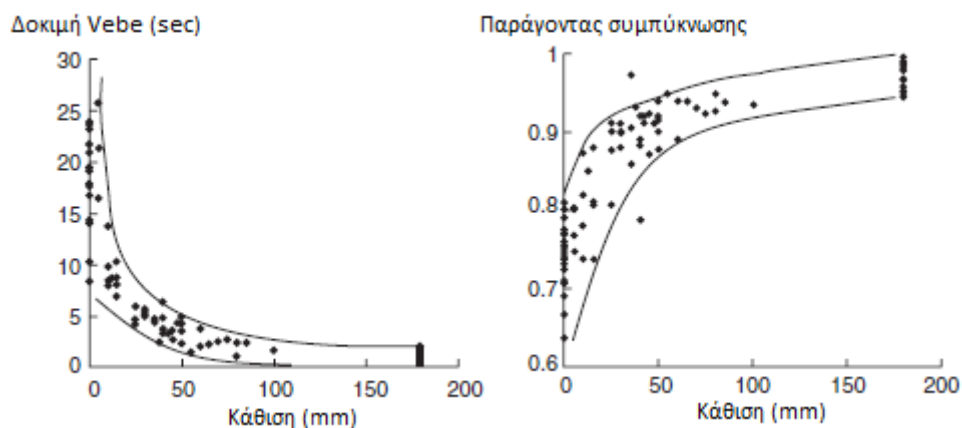
Η κατάσταση περιπλέκεται περαιτέρω από το γεγονός, πως σε ορισμένες περιπτώσεις, εάν χρησιμοποιηθούν δύο ή περισσότερες μέθοδοι για την κατάταξη ή διαφοροποίηση μεταξύ μιγμάτων, μπορεί να ληφθούν αντικρουόμενα αποτελέσματα. Για παράδειγμα στον **Πίνακα 1.6** δίνονται οι τιμές της κάθισης, της δοκιμής Vebe και του παράγοντα συμπύκνωσης τεσσάρων μιγμάτων σκυροδέματος, με αυτά τα αποτελέσματα έχει κατασκευαστεί το διάγραμμα της **Εικόνας 1.15**. Η κατάταξη κατά σειρά αυξανόμενης εργασιμότητας δίνει:

Για την κάθιση: Μίγμα A → Μίγμα D → Μίγμα C → Μίγμα B  
Για την δοκιμή Vebe: Μίγμα B → Μίγμα D → Μίγμα A → Μίγμα C  
Για τον παράγοντα συμπύκνωσης: Μίγμα B → Μίγμα A → Μίγμα C → Μίγμα D

**Πίνακας 1.6.** Αποτελέσματα κάθισης, δοκιμής Vebe και παράγοντα συμπύκνωσης για τέσσερα μίγματα (δεδομένα από Ellis, 1977).

Μίγμα	Κάθιση (mm)	Vebe (sec)	Παράγοντας συμπύκνωσης
A	25	4.3	0.91
B	50	4.9	0.88
C	40	3.3	0.92
D	35	4.4	0.97

Οι διαφορετικές κατατάξεις που προκύπτουν από τις μεθόδους σαφώς δεν είναι καθόλου ικανοποιητικές. Όχι μόνο θέτει απαραίτητη τη χρήση περιορισμών στις δοκιμές, αλλά μπορεί να οδηγήσει σε παραπλανητικά συμπεράσματα.



**Εικόνα 1.15.** Τυπική διασπορά αποτελεσμάτων δοκιμών μοναδικού σημείου σχετικές με την εργασιμότητα.

Για την καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς του σκυροδέματος και, συγκεκριμένα, για την επεξήγηση των ανωμαλιών που μπορεί να προκύψουν από τις δοκιμές μοναδικού σημείου, πρέπει να χρησιμοποιηθεί η επιστήμη της ρεολογίας και να εξεταστούν διεξοδικά όλες οι σημαντικές μελέτες που έλαβαν χώρα τα τελευταία τριάντα χρόνια πάνω στην τεχνολογία του σκυροδέματος.[19]

#### 1.1.9.4. Συνοχή, Διαχωρισμός και Ευστάθεια

Ένας εκπαιδευμένος και έμπειρος παρατηρητής μπορεί εύκολα να εκτιμήσει τη συνοχή ενός μίγματος. Η συνεκτικότητα είναι μία σημαντική ιδιότητα αλλά δυστυχώς μία κατάλληλη μέθοδο για τον προσδιορισμό της δεν έχει ακόμη αναπτυχθεί. Σε μια πρόσφατη έκθεση (Masterston και Wilson, 1997) έχει σχολιαστεί η ανάγκη σχετικά με την ανάπτυξη μίας τέτοιας μεθόδου. Ωστόσο κάποιες ενδείξεις σχετικές με τη συνοχή μπορεί να λαμβάνεται από τις δοκιμές κάθισης, εξάπλωσης εξαιτίας κάθισης ή από τις δοκιμές τράπεζας εξάπλωσης. Για τα σκυροδέματα που παρουσιάζουν πραγματική κάθιση (σχετικά μικρή εργασιμότητα) (Εικόνα 1.13), μετά από δοκιμή κάθισης, εάν η δοκιμή έχει πραγματοποιηθεί σωστά, ένα συνεκτικό σκυρόδεμα θα γύρει προς μία κατεύθυνση, ενώ ένα μη συνεκτικό σκυρόδεμα θα γύρει σε διάφορες κατευθύνσεις. Στα μίγματα υψηλής εργασιμότητας χρησιμοποιούνται οι δοκιμές κάθισης, εξάπλωσης εξαιτίας κάθισης και τράπεζας εξάπλωσης. Εάν ύστερα από το πέρας της δοκιμής δημιουργηθεί ένας δακτύλιος από πάστα τσιμέντου πέρα από τον όγκο που καταλαμβάνουν τα αδρανή, τότε υποδηλώνεται πως το μίγμα παρουσιάζει κακή συνοχή ή αστάθεια. Μπορεί επίσης να υποστηριχθεί ότι το πλαστικό ιξώδες είναι ένα μέτρο συνοχής.[19]

#### 1.1.9.5. Ποιοτικός Έλεγχος με Δοκιμές Ρεολογίας

Οι επιπλέον πληροφορίες σχετικά με τα μίγματα που προκύπτουν από τις δοκιμές ρεολογίας μπορεί να χρησιμοποιηθούν επωφελώς στον ποιοτικό έλεγχο σκυροδέματος. Αυτό φαίνεται στο παρακάτω υποθετικό παράδειγμα.

**Πίνακας 1.7.** Αποτελέσματα των δοκιμών ελέγχου ποιότητας με εφαρμογή διαδοχικών φορτίων στο ίδιο σκυρόδεμα.

Αριθμός μίγματος	Κάθιση (mm)	g (Nm)	h (Nm)
1	85	4.5	3.5
2	150	2.8	1.9
3	75	5.0	4.1
4	80	4.8	3.9
5	75	5.2	4.4
6	140	2.9	4.1

Δοκιμές με διαδοχικά ονομαστικά φορτία στο ίδιο σκυρόδεμα έδωσε τα αποτελέσματα του **Πίνακα 1.7** (οι τιμές των όρων h και g έχουν ευρεθεί με δοκιμές δύο σημείων και δεν έχουν μετατραπεί σε τιμές τάσης διαρροής ( $\tau_v$ ) και πλαστικού ιξώδους ( $\mu$ )). Το μίγμα περιέχει τσιμέντο Πόρτλαντ και υπερρρευστοποιητές. Η συγκεκριμένη κάθιση είναι 75mm, και έτσι φορτία τιμής 2 και 4 θα μπορούσαν να έχουν απορριφτεί λόγω της τιμής της κάθισης. Υπάρχουν δύο πιθανές αιτίες ώστε να εξηγηθεί η υπερβολική κάθιση, υπερβολική ποσότητα νερού ή υπερβολική ποσότητα υπερρρευστοποιητών. Εξετάζοντας τις τιμές των h και g φαίνεται ότι στο μίγμα 2 αυτές είναι πολύ μικρότερες από ότι στα ικανοποιητικά μίγματα 1,3,4,5 και 6, ωστόσο, στο μίγμα 6 το g είναι χαμηλότερο αλλά το h είναι εντός του εύρους των μειγμάτων 1, 3, 4, και 5. Ωστόσο το μίγμα 6 έχει υπερβολικά μεγάλη περιεκτικότητα σε υπερρρευστοποιητές, και με την προϋπόθεση ότι δεν υπήρχαν άλλα προβλήματα, όπως ο υπερβολικός χρόνος της δοκιμής, οι τιμές που δίνει δεν χρειάζεται να απορριφτούν.[19]

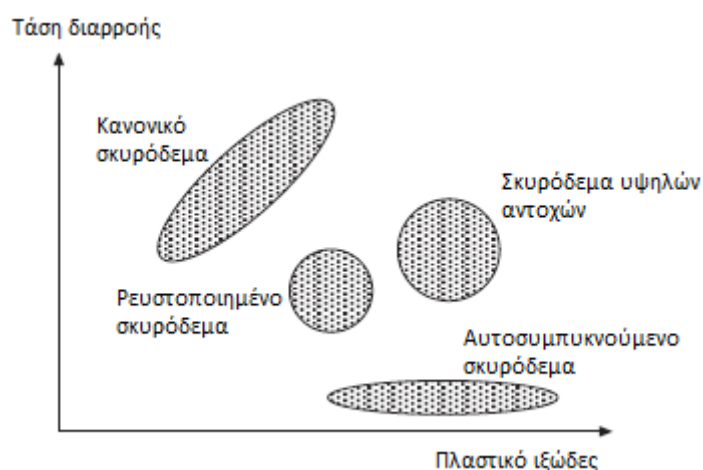
#### 1.1.9.6. Ρεολογία Σκυροδεμάτων Υψηλής Απόδοσης

Τα τελευταία δέκα με δεκαπέντε χρόνια έχει παρατηρηθεί μεγάλη ανάπτυξη και χρήση των τσιμετών μεγάλης απόδοσης, όπως, το σκυρόδεμα υψηλών αντοχών, το σκυρόδεμα υψηλής ανθεκτικότητας, το ινοπλισμένο σκυρόδεμα, το σκυρόδεμα για υποθαλάσσιες χρήσεις και το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα. Τα περισσότερα από αυτά περιέχουν ένα συνδυασμό πρόσμικτων υλικών, εναλλακτικά τσιμεντοειδή υλικά κ.λ.π. και για αυτόν τον λόγο παρουσιάζουν πολύ διαφορετικές ρεολογικές ιδιότητες σε σχέση με τα συνήθη μίγματα. Περιγράφοντας την εργασιμότητα σκυροδεμάτων υψηλής απόδοσης με μία δοκιμή ενός σημείου (π.χ. κάθιση) παρατηρούμε ότι δεν λαμβάνονται καθόλου ικανοποιητικά αποτελέσματα και έτσι η χρήση των σταθερών Bingham γίνεται απαραίτητη για την παραγωγή τέτοιων μιγμάτων που να εργαστούν και να διαστρωθούν με ευκολία.

Στο διάγραμμα της **Εικόνας 1.16** φαίνονται οι περιοχές που καταλαμβάνουν τέσσερις τύποι σκυροδέματος σε ένα διάγραμμα τάσης διαρροής-πλαστικού ιξώδους. Στο «κανονικό» σκυρόδεμα, όπου η εργασιμότητα ελέγχεται κυρίως από την περιεκτικότητα σε νερό, η τάση διαρροής και το πλαστικό ιξώδες θα διαφέρουν μεταξύ τους. Το ρευστοποιημένο σκυρόδεμα παράγεται με την προσθήκη υπερρρευστοποιητών σε ένα σύνθετο μίγμα (ίσως με υψηλότερη περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα συστατικά για την διασφάλιση της ευστάθειας), έχει μια τάση διαρροής χαμηλότερη από εκείνη του κανονικού

σκυροδέματος, και ως εκ τούτου, υψηλή κάθιση, αλλά ένα σχετικά υψηλό ιξώδες για τη διασφάλιση της ευστάθειας. Τα σκυροδέματα υψηλών αντοχών, που παρουσιάζουν υψηλή

περιεκτικότητα σε πάστα που περιέχει συνήθως πυριτική κονία (microsilica), μπορεί να είναι πολύ ιξώδη και κολλώδη, έτσι ώστε να είναι δύσκολος ο χειρισμός τους εκτός και αν προστεθούν υπερρευστοποιητές για την δημιουργία υψηλής κάθισης και χαμηλής τάσης διαρροής. Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα, το οποίο πρέπει να ρέει, υπό την επίδραση του βάρους του, γύρω από το σημείο το οποίο θα ενισχύσει, χωρίς να διαχωριστεί ή να παγιδεύσει αέρα, ίσως είναι το καλύτερο δείγμα μίγματος που ελέγχεται από τις αρχές της ρεολογίας (Okamura,1996). Η τάση διαρροής μπορεί να είναι πολύ χαμηλή ώστε να εξυπηρετηθεί η ροή, αλλά το ιξώδες πρέπει να είναι αρκετά υψηλό ώστε να εγγυάται την ευστάθεια, αλλά όχι τόσο υψηλό ώστε η ροή να είναι απαγορευτικά αργή.



**Εικόνα 1.16.** Ρεολογία διαφόρων τύπων σκυροδέματος.

Είναι σκόπιμο εδώ να αναφερθεί ο de Larrard (1999), ο οποίος κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η γνώση της ρεολογικής συμπεριφοράς του νωπού σκυροδέματος επιτρέπει στο χρήστη να εκτελέσει γρήγορα και με επιτυχία την εφαρμογή υψηλής ποιότητας σκυροδέματος, εξοικονομώντας χρόνο και χρήμα, και να παράγει κατασκευές με μεγάλη διάρκεια ζωής.[19]

#### 1.1.9.7. Απώλεια Εργασιμότητας

Το νωπό σκυρόδεμα χάνει την εργασιμότητά του εξαιτίας των παρακάτω λόγων:

- Το νερό ανάμιξης απορροφάται από τα αδρανή, εάν αυτά δεν βρίσκονται σε κορεσμένη κατάσταση πριν από την ανάμιξη.
- Εξάτμιση του νερού ανάμιξης.
- Πρόωρη έναρξη των αντιδράσεων ενυδάτωσης
- Αλληλεπιδράσεις μεταξύ των πρόσμικτων (συγκεκριμένα μεταξύ ρευστοποιητών και υπερρευστοποιητών) και των τσιμεντοειδών συστατικών του μίγματος.

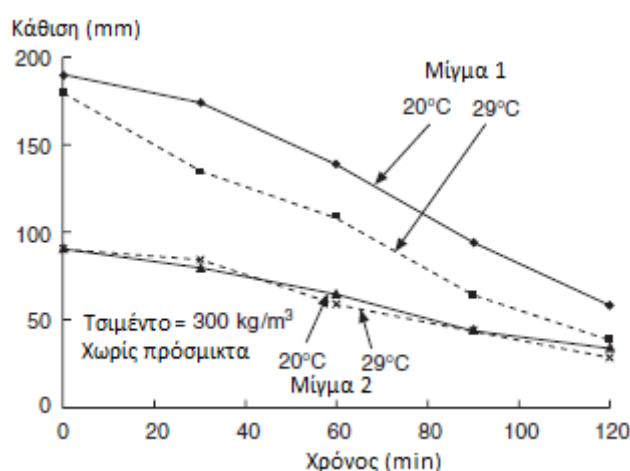
Η απορρόφηση νερού από τα αδρανή μπορεί να αποφευχθεί εάν εξασφαλιστεί ότι τα αδρανή που χρησιμοποιούνται βρίσκονται σε κορεσμένη κατάσταση π.χ. με τον ψεκάσμο των αποθεμάτων των αδρανών με νερό και την συντήρησή τους με ένα κάλυμμα τις ζεστές και ξηρές ημέρες, εάν και αυτό είναι δύσκολο σε ορισμένες περιοχές. Είναι επίσης δύσκολος εάν όχι ανεπιθύμητος ο κορεσμός των ελαφροβαρών αδρανών με την παραπάνω διαδικασία. Η εξάτμιση του νερού ανάμιξης μπορεί να

μειωθεί κρατώντας το σκυρόδεμα καλυμμένο κατά τη διάρκεια της μεταφοράς και της εφαρμογής, όσο περισσότερο αυτό είναι δυνατό.

Τα περισσότερα στοιχεία συνδέονται με την απώλεια κάθισης, και οφείλονται:

- Υψηλότερες θερμοκρασίες
- Υψηλότερες αρχικές καθίσεις
- Μεγαλύτερες περιεκτικότητες σε τσιμέντο
- Υψηλή περιεκτικότητα αλκαλίων και χαμηλή θεικών στο τσιμέντο

Στο διάγραμμα της **Εικόνας 1.17** φαίνονται τα στοιχεία από δύο μίγματα που διαφέρουν στην περιεκτικότητα νερού, όπου φαίνεται η επίδραση μόνο των δύο πρώτων παραγόντων.



**Εικόνα 1.17.**Τυπική συμπεριφορά απώλειας κάθισης μιγμάτων χωρίς πρόσμιχτα (Previte, 1977).

Ο ρυθμός απώλειας εργασιμότητας μπορεί να μειωθεί με συνεχή ανάμιξη π.χ. σε αυτοκινούμενη μπετονιέρα ή με προσθήκη πρόσμιχτων. Καταρχήν, η προσθήκη νερού για να αποφευχθεί η απώλεια κάθισης, δεν πρέπει να έχει επιπτώσεις στις αντοχές, εφόσον η ποσότητα που προστίθεται είναι ίση με την ποσότητα του νερού που εξατμίστηκε. Επίσης μελέτες έχουν δείξει ότι το νερό που προστίθεται μπορεί να αυξήσει τον λόγο νερό προς τσιμέντο έως 5% χωρίς να επιφέρει καμία απώλεια στις αντοχές των εικοσιοκτώ ημερών (Cheong και Lee, 1993). Ωστόσο, εκτός από ελεγχόμενες συνθήκες, η προσθήκη νερού για την κάλυψη των απωλειών από την εξάτμιση μπορεί να οδηγήσει σε απαράδεκτη αύξηση του λόγου νερό προς τσιμέντο και ως εκ τούτου ανάπτυξη μικρότερων αντοχών, επομένως καλύτερα να αποφεύγεται.[19]

### 1.1.10. Το Πορώδες του Σκυροδέματος

Το σκυρόδεμα, όπως και οι φυσικοί λίθοι, δεν είναι υλικό συμπαγές και πλήρες, αλλά περιέχει πλήθος από μικροσκοπικές και μακροσκοπικές κοιλότητες. Οι κοιλότητες αυτές είναι κενές από στερεό υλικό, γι' αυτό και ονομάζονται και πόροι ή κενά. Το σύνολο αυτών των κοιλοτήτων το ονομάζουμε πορώδες σκυροδέματος. Οι κοιλότητες αυτές μπορεί να περιέχουν αέρα ή να είναι γεμάτες νερό. Ανάλογα με την προέλευση τους διακρίνονται σε κατηγορίες. Έτσι υπάρχουν:

- a) Πόροι των αδρανών υλικών, δηλαδή πόροι των κόκκων της άμμου και των σκύρων.
- b) Πόροι που δημιουργούνται από εγκλεισμό φυσαλίδων μέσα στο τσιμεντοκονίαμα.
- c) Πόροι ή τροχοειδή κενά που δημιουργούνται μέσα στην τσιμεντοκονία μετά την εξάτμιση του νερού που περισσεύει.
- d) Κοιλότητες μεταξύ τσιμεντοκονιάματος και αδρανών, είτε από κακή πρόσφυση μεταξύ τους, είτε λόγω συστολής του τσιμεντοκονιάματος, είτε από το νερό που συγκεντρώνεται στην κάτω κυρίως πλευρά των κόκκων, λόγω της εξίδρωσης του μίγματος.
- e) Μικροσκοπικές κοιλότητες που προέρχονται από κακή συμπύκνωση.
- f) Τριχοειδή κενά δημιουργημένα μετά τις μικρορηγματώσεις που οφείλονται στις συστολές του τσιμεντοκονιάματος ή στις εξωτερικές καταπονήσεις.

Χαρακτηριστικά ενός υλικού είναι:

- 1) **Το συνολικό πορώδες** ορίζεται ως ο λόγος της διαφοράς του φαινομένου όγκου  $V_o$  από τον πραγματικό όγκο του υλικού  $V_s$  προς τον φαινόμενο όγκο  $V_o$ . Δηλαδή ο όγκος των κενών προς τον ολικό φαινόμενο όγκο. Η σχέση μπορεί να γραφτεί και με χρήση των ειδικών βαρών, του φαινομένου  $p$  και του απόλυτου  $p_s$ :

$$\frac{V_o - V_s}{V_o} = \frac{p_s - p}{p_s} \quad (10)$$

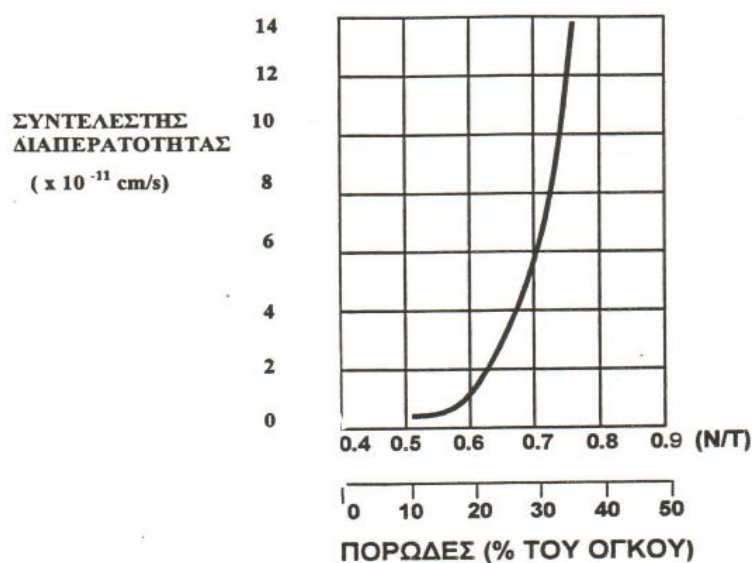
- 2) **Ο βαθμός συμπυκνώσεως** δίνεται από τον λόγο του πραγματικού προς τον φαινόμενο όγκο και είναι ισοδύναμος με τον λόγο του φαινομένου προς του πραγματικού ειδικού βάρους:

$$\frac{V_s}{V_o} = \frac{p}{p_s} \quad (11)$$

Τα παραπάνω μεγέθη χαρακτηρίζουν την έκταση του πορώδους, δε δίνουν όμως πληροφορίες για τη μορφή, το σχήμα, το μέγεθος, καθώς και την κατανομή των

κοιλοτήτων, που αποτελούν ουσιώδη χαρακτηριστικά για τη συμπεριφορά του υλικού και τη διείσδυση του νερού.

Το πορώδες του σκυροδέματος επηρεάζει κατά πολλούς τρόπους τις ιδιότητες του, κυρίως μέσα από την επίπτωση που έχει στη διαπερατότητά του. Μια τυπική συσχέτιση συντελεστού διαπερατότητας, πορώδους και λόγου W/C απεικονίζεται στην **Εικόνα 1.18**. Επηρεάζει τη χρονική συστολή, τον ερπυσμό, την υδατοαπορροφητικότητα, την υδατοστεγανότητα, καθώς και την ανθεκτικότητα του υλικού στον παγετό, ως φορέας της υγρής φάσεως, στην οποία κυρίως οφείλονται τα φαινόμενα αυτά.



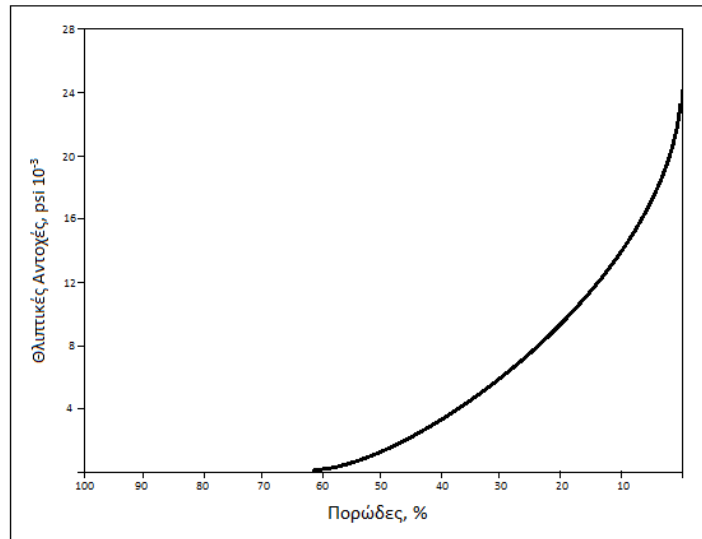
**Εικόνα 1.18.** Συσχέτιση πορώδους και Αντοχών.

Επίσης το πορώδες επηρεάζει σημαντικά και τις αντοχές (**Εικόνα 1.19**):

$$\beta = \beta_s \left( \frac{P}{P_s} \right) \quad (12)$$

Όπου  $\beta$  η αντοχή, και  $\beta_s$  η αντοχή της στερεάς μάζας (δεδομένου ότι η μετάδοση των δυνάμεων γίνεται μέσα από το στερεό ιστό του υλικού).





**Εικόνα 1.19.** Συσχέτιση πορώδους και αντοχών

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

Στη μείωση του πορώδους συντείνουν:

- 1) Η ελάττωση του νερού και επομένως η ελάττωση των πόρων που δημιουργείται από την εξάτμιση του νερού που περισσεύει.
- 2) Η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών και πλησιάζει στην άριστη περιοχή, δηλαδή πυκνότερη δομή αδρανών.
- 3) Η καλή ποιότητα και καθαρότητα αδρανών για την καλύτερη προσκόλληση της τσιμεντοκονίας. Τα ασβεστολιθικά πετρώματα π.χ. έχουν καλύτερη πρόσφυση από όση έχουν τα πυριτικά.
- 4) Η αποτελεσματική συμπύκνωση του νωπού σκυροδέματος.
- 5) Η καλή συντήρηση για την αποφυγή ρηγματώσεων κατά τη διάρκεια της πήξης.[19]

## 1.2. Ασβεστολιθικό Πληρωτικό Υλικό (Filler)

### 1.2.1.Ασβεστόλιθος

Ο ασβεστόλιθος είναι ένα ευρέως διαδεδομένο υλικό, με πολλές χρήσεις στην βιομηχανία δομικών υλικών και βέβαια στην παραγωγή των ξηρών κονιαμάτων, όπου χρησιμοποιείται ως αδρανές υλικό. Πέραν των ξηρών κονιαμάτων, οι χρήσεις του ασβεστόλιθου είναι πάρα πολλές όπως για παράδειγμα στη παραγωγή τσιμεντών, ασβέστη ως πρώτη ύλη,

απορρυπαντικών, Ζωοτροφών οικολογικών λιπασμάτων και χαλύβων. Επίσης στην παραγωγή χρωμάτων, πλαστικών και ασφάλτου ως filler.

Ο ασβεστόλιθος προέρχεται από τα ανθρακικά πετρώματα και εμφανίζεται είτε σαν καθαρό ανθρακικό ασβέστιο ( $\text{CaCO}_3$ ) είτε σαν Δολομίτης (Ασβεσίτης  $\text{CaCO}_3$  μαζί με ανθρακικό μαγνήσιο  $\text{MgCO}_3$ ). Πιο σπάνια με τον ασβεστόλιθο συνυπάρχει ο αραγωνίτης και σε μικρότερα ποσοστά σίδηρος ( $\text{FeCO}_3$ ), μαγνησίτης ( $\text{MgCO}_3$ ), ανκερίτης  $\text{Ca}_2\text{MgFe}(\text{CO}_3)_4$  κ.α. Είναι επίσης δυνατόν να περιέχει και πυριτικές προσμίξεις.

Το μάρμαρο είναι ένας ασβεστόλιθος που χρησιμοποιείται στα κονιάματα ως αδρανές υλικό και που ανήκει στην κατηγορία των ανθρακικών πετρωμάτων. Προέρχεται από ανθρακικά πετρώματα μετά από ανακρυστάλλωση του κυριότερου συστατικού του, του ασβεστίτη ( $\text{CaCO}_3$ ). Τα χαρακτηριστικά των μαρμάρων που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή των ξηρών κονιαμάτων έχουν να κάνουν με τη χημική και ορυκτολογική τους σύσταση, με το χρώμα, την αντοχή και την σκληρότητα του πετρώματος, την απορροφητικότητα κ.α.

### 1.2.2. Χρήση Ασβεστολιθικού Πληρωτικού Υλικού (Filler)

Ένα αδρανές πληρωτικό υλικό παρουσιάζει θεωρητικά μεγάλο ενδιαφέρον στα ισχνά σκυροδέματα, διότι βοηθάει τη δράση του τσιμέντου πληρώνοντας τα κενά που αφήνουν τα αδρανή. Ωστόσο το ασβεστολιθικό πληρωτικό υλικό δεν είναι ούτε αδρανές ούτε ανενεργό, μία μικρή ποσότητα είναι πάντα ευεργετική για το σκυρόδεμα, από τότε που τα τσιμέντα περιέχουν κάποια ποσότητα αργλικών αλάτων. Η βέλτιστη ποσότητα ασβεστολιθικών υλικών αυξάνεται όσο αυξάνεται και η ποσότητα υπερρευστοποιητών στο μίγμα και όσο μειώνονται οι επιθυμητές αντοχές. Επίσης, η εισαγωγή ασβεστολιθικού πληρωτικού υλικού γίνεται κυρίως όταν η περιεκτικότητα σε  $\text{C}_3\text{A}$  είναι μεγάλη.

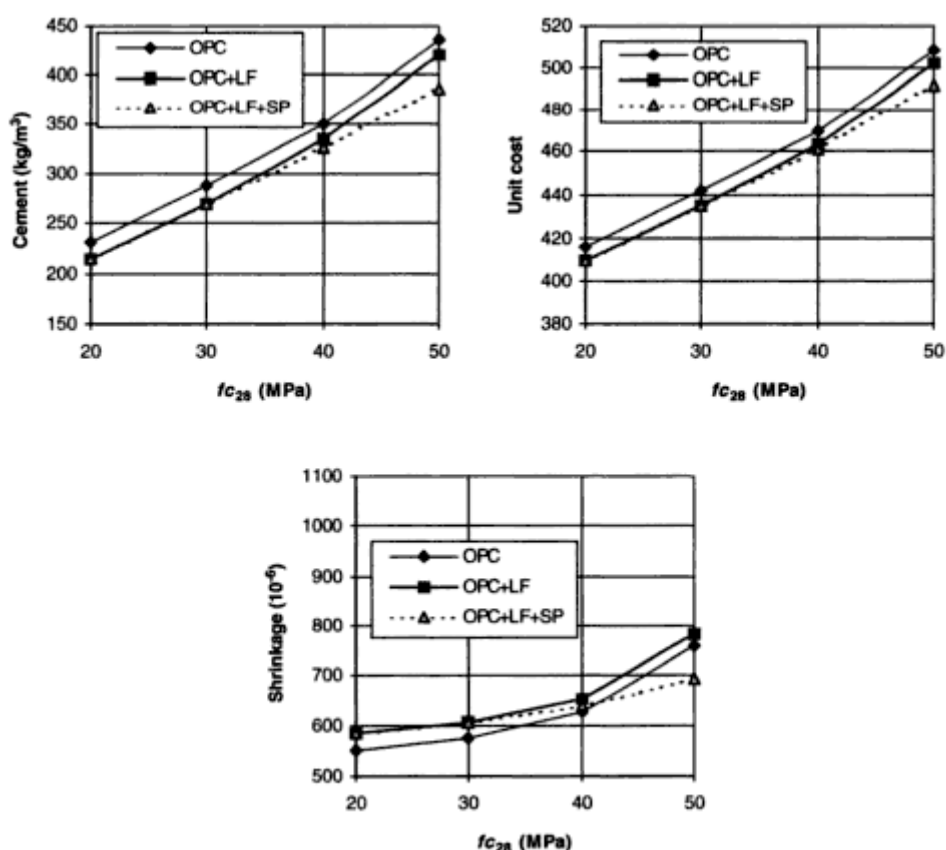
Όσο αφορά τη λεπτότητα του πληρωτικού υλικού, έχει αποδειχθεί ότι το φαινόμενο της επιτάχυνσης ελέγχεται από την ειδική επιφάνεια του προϊόντος. Αλλά χωρίς τη χρήση υπερρευστοποιητών ένα λεπτότερο πληρωτικό υλικό θα απαιτεί περισσότερο νερό για να διατηρήσει τις αντοχές και την κάθιση, και αυτό διότι η συμβολή της κοκκομετρίας στην ανάπτυξη αντοχών αυξάνεται όταν το μέγεθος των κόκκων μειώνεται. Έτσι ένα πολύ λεπτό ασβεστολιθικό υλικό (με μέση διάμετρο ίση με 1  $\mu\text{m}$  ή και μικρότερη), παρουσιάζει ενδιαφέρον για χρήση μόνο εάν χρησιμοποιηθεί παράλληλα και μία μεγάλη ποσότητα υπερρευστοποιητών. Αλλά στην περίπτωση των συμπληρωματικών υδραυλικών υλικών (mineral admixtures) που στόχος είναι η παρασκευή σκυροδέματος υψηλών αποδόσεων, το ασβεστολιθικό πληρωτικό υλικό πρέπει να «ανταγωνιστεί» προϊόντα με ποζολανικές ιδιότητες, όπως είναι η πυριτική παιπάλη, που είναι πολύ πιο δραστικά.

Προκειμένου να διαπιστωθούν οι διάφορες επιδράσεις που επιφέρει ένα ασβεστολιθικό πληρωτικό υλικό σε ένα μίγμα σκυροδέματος, πρέπει να ερευνηθούν τα αποτελέσματα κάποιων δοκιμών. Οι προδιαγραφές που εξετάζονται είναι οι ακόλουθες: ελάχιστος συντελεστής διάστρωσης ( $K' \leq 6$ ), μία ελάχιστη κάθιση περίπου 100 mm και οι θλιπτικές αντοχές των 28 ημερών να κυμαίνονται από 20 έως 50 MPa. Τα μίγματα θα πρέπει να έχουν

παρασκευαστεί σε πρότυπες συνθήκες. Το κόστος του ασβεστολιθικού πληρωτικού υλικού πρέπει να είναι το 16% του κόστους του τσιμέντου.

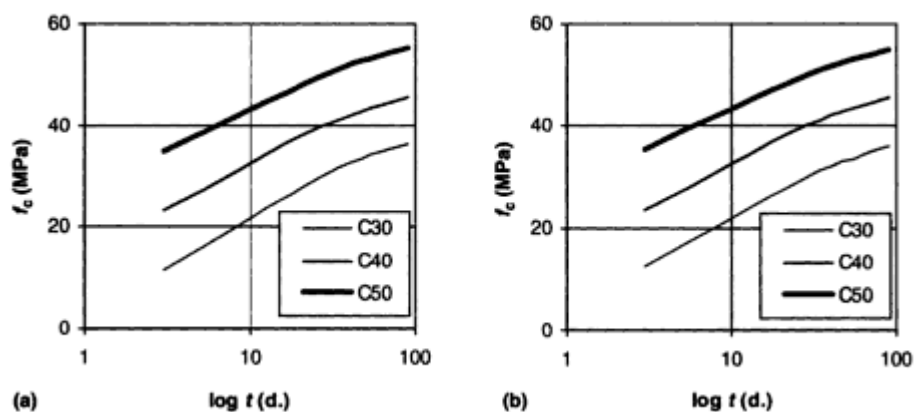
Στις **Εικόνες 1.20** και **1.21** φαίνονται οι επιδράσεις του ασβεστολιθικού πληρωτικού υλικού και των υπερρρευστοποιητών στις αντοχές του σκυροδέματος. Η πρώτη σειρά δοκιμών περιέχει μόνο τσιμέντο ως συνδετικό υλικό. Στη δεύτερη σειρά προστίθεται και ασβεστολιθικό πληρωτικό υλικό, ενώ η τρίτη σειρά περιέχει και υπερρρευστοποιητές. Το ελάχιστο κόστος αναγράφεται για όλα τα μίγματα.

Σύμφωνα με τα διαγράμματα, φαίνεται ότι η προσθήκη ασβεστολιθικού πληρωτικού υλικού έχει ως αποτέλεσμα την εξοικονόμηση μίας μέτριας ποσότητας τσιμέντου, με αποτέλεσμα να είναι πιο οικονομική όλη η σύνθεση. Φαίνεται επίσης ότι σε αρκετά υψηλές τιμές αντοχών η δράση του ασβεστολιθικού πληρωτικού υλικού ενισχύεται σημαντικά με την χρήση υπερρρευστοποιητών. Όσον αφορά τη συνολική συρρίκνωση, η χρήση ασβεστολιθικού πληρωτικού υλικού οδηγεί σε ελαφριά αύξηση, εκτός του δεξιού μέρους του διαγράμματος. Εν τέλει, η ανάπτυξη αντοχών ελάχιστα επηρεάστηκε από την παρουσία ασβεστολιθικού πληρωτικού υλικού. Το φαινόμενο της επιτάχυνσης που δημιουργείται από τα πρόσθετα εξισορροπεί την αύξηση του λόγου νερό προς τσιμέντο, που είναι καθαυτός ένας παράγοντας για πιο αργή ανάπτυξη αντοχών.



**Εικόνα 1.20.** Αποτελέσματα συγκεκριμένων θλιπτικών αντοχών πάνω σε σκυροδέματα διαφόρων συνθέσεων, LF=ασβεστολιθικό πληρωτικό υλικό, SP=υπερρρευστοποιητές.

Εκτός από τις επιπτώσεις στη συρρίκνωση που έχουν προαναφερθεί, και όταν δεν βρίσκεται σε υπερδοσολογία μέσα στο μίγμα, το ασβεστολιθικό πληρωτικό υλικό δεν επηρεάζει σχεδόν καθόλου την ανθεκτικότητα του υλικού-(για ισοδύναμη εργασιμότητα και αντοχή) εκτός από την κλιμακούμενη αντίσταση.[20]



Εικόνα 1.21. Ανάπτυξη αντοχών σε μίγματα (α) χωρίς και (β) με ασβεστολιθικό πληρωτικό υλικό.

### 1.2.3. Προδιαγραφές Ασβεστολιθικού Πληρωτικού Υλικού (Filler)

Τα ασβεστολιθικά πληρωτικά υλικά χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στην παρασκευή τσιμέντων και πρόσφατα έχουν αρχίσει να αξιοποιούνται ως πρόσθετα συστατικά στα μίγματα σκυροδέματος. Το πρότυπο EN 197-1 (BS EN 197-1, 2000) περιλαμβάνει δύο τύπους ασβεστολιθικών τσιμέντων Πόρτλαντ, το CEM II /A-L και το CEM III/B-L. Η περιεκτικότητα του πρώτου σε ασβεστόλιθο είναι μεταξύ 6 και 20 % και το δεύτερο μεταξύ 21 και 35 %. Αυτό το υλικό συνήθως εμπεριέχεται στο κλίνκερ του τσιμέντου Πόρτλαντ, και σε φυσιολογικές συνθήκες δίνει τσιμέντο κατηγορίας 32,5. Οι απαιτήσεις για τον ασβεστόλιθο είναι:

- Το περιεχόμενο  $\text{CaCO}_3$  να είναι μεγαλύτερο ή ίσο από 75%.
- Η περιεκτικότητα σε άργιλο, όπως καθορίζεται από την δοκιμή μπλε του μεθυλενίου, δεν πρέπει να υπερβαίνει το 1,2g/100g.
- Ο συνολικός οργανικός άνθρακας (TOC) δεν πρέπει να υπερβαίνει το 0,2% για LL ασβεστόλιθο και 0,5% για L ασβεστόλιθο.

Τα ασβεστολιθικά πληρωτικά υλικά αρχικά θεωρήθηκαν αδρανή, αλλά σταδιακά έγινε αποδεκτό ότι συμβάλουν στη διαδικασία ενυδάτωσης με το σχηματισμό  $\text{C}_3\text{A} \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$ .

Εκτός από την προσθήκη ασβεστόλιθου στα τσιμέντα, ασβεστολιθικά πληρωτικά υλικά μπορούν να προστεθούν απευθείας στο μίγμα δίνοντας ισοδύναμο συνδυασμό. Οι προδιαγραφές για τα ασβεστολιθικά πληρωτικά υλικά δίνονται από το BS 7979 (2001) και είναι παρόμοιες με αυτές που ισχύουν για τα ασβεστολιθικά τσιμέντα. Τα ασβεστολιθικά πληρωτικά υλικά μπορούν να χρησιμοποιούνται σε ειδικά σκυροδέματα, όπως το

αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα, για την ενίσχυση της συνοχής στο πλαστικό σκυρόδεμα.[18]

### **1.3. Ανακύκλωση νερού Έκπλυσης οχημάτων μεταφοράς έτοιμου σκυροδέματος**

#### **1.3.1. Επαναχρησιμοποίηση Νερού Έκπλυσης-Διεθνής Εμπειρία**

Στον τομέα παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος υπολογίζεται ότι καταναλώνονται πάνω από 900 λίτρα νερού για την έκπλυση μίας μόνο μπετονιέρας, την ίδια ώρα που σε παγκόσμιο επίπεδο είναι διαθέσιμα 7 δισεκατομμύρια λίτρα νερού ετησίως. Τα τελευταία χρόνια έχουν θεσπιστεί αυστηρότερα μέτρα σχετικά με την ανακύκλωση του νερού έκπλυσης του εξοπλισμού της βιομηχανίας έτοιμου σκυροδέματος, σύμφωνα με τα οποία τα αδρανή και η ιλύς (slurry) πρέπει να ανακτώνται και να χρησιμοποιούνται για την παρασκευή σκυροδέματος. Βέβαια, με τη χρήση ανακυκλωμένου νερού είναι δυνατή μία απόκλιση στους χρόνους πήξης από 30 λεπτά έως μία ώρα.

Στο τέλος μίας ημέρας η μπετονιέρα μπορεί να περιέχει υπόλειμμα που φτάνει μέχρι και τα 280kg. Η μεγαλύτερη ποσότητα μετά την έκπλυση της μπετονιέρας απορρίπτεται στο περιβάλλον. Αυτό δημιουργεί και πάρα πολλά περιβαλλοντικά προβλήματα. Μία νέα προσέγγιση που έχει προταθεί είναι η ανάκτηση της ποσότητας του σκυροδέματος που είναι προσκολλημένη στο τύμπανο της μπετονιέρας. Με αυτή την μέθοδο ένας σταθεροποιητής προστίθεται στο σκυρόδεμα ώστε να επιβραδυνθεί η περαιτέρω ενυδάτωση. Αυτό το πρόσθετο ενδεχομένως να περιέχει καρβοξυλικό οξύ και υλικά που έχουν ως βάση τους τον φώσφορο. Την επόμενη μέρα προστίθεται διεγέρτης ο οποίος εξουδετερώνει την επιβραδυντική δράση. Εν συνεχεία το σκυρόδεμα διαστρώνεται και αναπτύσσει αντοχές στο εύρος των φυσιολογικών. Άλλες ιδιότητες δεν επηρεάζονται από τη διαδικασία.

Το νερό έκπλυσης παρουσιάζει συχνά pH κοντά στο 13 και όπως είναι φυσικό δεν μπορεί να αποστραγγίζεται στον υδροφόρο ορίζοντα ως έχει. Προκειμένου να επαναχρησιμοποιηθεί το νερό έκπλυσης πρέπει να γίνει διαχωρισμός ανάμεσα σε καθαρό νερό, κατάλληλο για την παρασκευή νέου σκυροδέματος, και νερό που παρουσιάζει υψηλή περιεκτικότητα σε λάσπη (λούμη ή sludge). Αυτό μπορεί να πραγματοποιηθεί είτε σε μία μηχανική δεξαμενή συμπύκνωσης είτε σε μία φυσική δεξαμενή κάθισης. Το νερό που είναι πλούσιο σε λούμη (sludge) περιέχει ένα μεγάλο ποσοστό μορίων μη ενυδατωμένου τσιμέντου, ενυδατωμένου τσιμέντου και πολύ λεπτών αδρανών σωματιδίων.

Σύμφωνα με την έκθεση της Forintek, η ποσότητα νερού έκπλυσης που χρησιμοποιείται για την παρασκευή ενός κυβικού μέτρου σκυροδέματος, στις βιομηχανίες έτοιμου σκυροδέματος του Καναδά, κυμαίνεται από 41,6 έως 608,14 λίτρα, ανάλογα με το είδος της μονάδας παραγωγής του σκυροδέματος και την απόσταση από το σημείο εφαρμογής. Όσο αφορά το είδος της μονάδας παραγωγής, εννοείται εάν το σκυρόδεμα μεταφέρεται σε έτοιμη ρευστή μορφή στο σημείο εφαρμογής ή εάν μεταφέρονται ξηρά τα συστατικά για επιτόπου ανάμιξη σε μία φορητή μπετονιέρα. Μικρότερη περιεκτικότητα νερού έκπλυσης,

απαιτείται στις μονάδες που βρίσκονται κοντά σε αστικές περιοχές λόγω της μικρότερης απόστασης από τα εργοτάξια και της ύπαρξης κεντρικής γραμμής παραγωγής. Το ανακυκλωμένο νερό από την έκπλυση των φορτηγών, τα ανακτώμενα αδρανή, συλλέκτες υγρής παιπάλης και εργαστηριακές δεξαμενές καθίζησης στερεών χρησιμοποιούνται ήδη στην Ιαπωνία. Από έρευνα, της Εθνικής Βιομηχανικής Ένωσης έτοιμου σκυροδέματος της Ιαπωνίας, προκύπτει ότι η μέση ποσότητα νερού έκπλυσης για την παρασκευή ενός κυβικού μέτρου σκυροδέματος στην Ιαπωνία είναι 200 λίτρα.[21, 22]

### 1.3.2. Επαναχρησιμοποίηση Νερού Έκπλυσης-Ελληνικός Χώρος

Στις μονάδες παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος προκύπτει καθημερινά μία μεγάλη ποσότητα παραπροϊόντων τα οποία είτε απορρίπτονται είτε συγκεντρώνονται σε ειδικούς χώρους αποθήκευσης. Τα παραπροϊόντα αυτά είναι κυρίως το επιστρεφόμενο νωπό σκυρόδεμα και το νερό έκπλυσης των ειδικών σιλοφόρων οχημάτων μεταφοράς έτοιμου σκυροδέματος.

Το επιστρεφόμενο νωπό σκυρόδεμα προκύπτει όταν ένα σημαντικό ποσοστό του νωπού διακινούμενου σκυροδέματος που προέρχεται και διακινείται από τις μονάδες έτοιμου σκυροδέματος απορρίπτεται στο τέλος του ημερήσιου προγράμματος των ειδικών οχημάτων. Επιπροσθέτως σπαταλούνται μεγάλες ποσότητες νερού για την έκπλυση του σταθερού και κινητού εξοπλισμού παραγωγής, μεταφοράς και άντλησης σκυροδέματος, το οποίο αποτίθεται ή επαναχρησιμοποιείται ύστερα από επεξεργασία και σε μικρά ποσοστά στο νερό ανάμιξης για παραγωγή σκυροδέματος. Υπολογίζεται ότι η ποσότητα νερού που χρησιμοποιείται καθημερινά για να ξεπλένεται το εσωτερικό των οχημάτων μεταφοράς σκυροδέματος είναι περίπου 1500 L νερού ανά φορτηγό, ενώ η αναξιοποίητη (και συνεπώς απορριπτόμενη) ποσότητα σκυροδέματος μπορεί να φθάσει και τα 300 L. Δεδομένου ότι ένα όχημα μεταφοράς σκυροδέματος μεταφέρει συνήθως ποσότητα σκυροδέματος  $8\text{m}^3$  που εμπεριέχουν περίπου 1600L νερού, είναι προφανές ότι η ανεπαρκής ανακύκλωση νερού διπλασιάζει τη κατανάλωση.

Η απόρριψη των παραπροϊόντων αυτών επιφέρει μεγάλα περιβαλλοντικά προβλήματα αφού το απορριπτόμενο έτοιμο σκυρόδεμα καθώς και το νερό έκπλυσης των φορτηγών έχουν χαρακτηριστεί ως απόβλητα επικίνδυνα για απόρριψη από διεθνείς και Ευρωπαϊκούς κανονισμούς, καθώς τα υλικά αυτά έχουν pH 11.5 ή και μεγαλύτερο. Εξαιτίας του γεγονότος τούτου, η απόθεση παρόμοιας φύσης υλικών είναι αυστηρά τυποποιημένη από διαφορετικές περιβαλλοντικές νομοθεσίες, με αποτέλεσμα να αναμένεται στο μέλλον αισθητή μείωση της διαθεσιμότητας εγκεκριμένων χώρων απόθεσης απορριπτόμενου έτοιμου σκυροδέματος και νερού έκπλυσης.[8]

Είναι φανερό ότι το πρότυπο του ΕΛΟΤ(1979) θέτει τα αυστηρότερα όρια σε σχέση με τα άλλα δύο διεθνή πρότυπα, τα οποία και είναι παρεμφερή. Αξίζει να σημειωθεί ότι μόνο το πρότυπο του ΕΛΟΤ θέτει ανώτατα όρια στο pH (με το ASTM να μη θέτει ούτε κατώτατα). Επίσης, το ΕΛΟΤ έχει πάνω από 16 φορές μικρότερο το άνω όριο για τα ολικά στερεά σε σχέση με το ASTM. Το EN δεν ορίζει συγκεκριμένο ποσοστό για τα στερεά στο νερό ανάμιξης, αλλά προβλέπει το συνυπολογισμό τους στις πρώτες ύλες του αναμίγματος και την αντίστοιχη αφαίρεση αυτού του ποσοστού από την άμμο.

Επίσης το ΕΛΟΤ απαιτεί περίπου 2 φορές μικρότερο όριο για τα θειικά ιόντα σε σχέση με το EN και περίπου 3 φορές μικρότερο σε σχέση με το ASTM. Όσο αφορά τα Cl<sup>-</sup> είναι αρκετά πιο ελαστικό σε σχέση με τα άλλα 2 πρότυπα. Η αυστηρότητα αυτή του προτύπου του ΕΛΟΤ αναγκάζει τις ελληνικές μονάδες έτοιμου σκυροδέματος να μην χρησιμοποιούν το ανακυκλωμένο νερό αλλά να το προσθέτουν σε πολύ μικρά ποσοστά στις δεξαμενές νερού από ελεγχόμενη γεώτρηση, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Τα όρια των τριών προτύπων φαίνονται στον **Πίνακα 1.8**. [30, 31, 32]

**Πίνακας 1.8.** Προδιαγραφές των προτύπων ΕΛΟΤ 345, EN 1008 και ASTM C 1602/C 1602M για το νερό ανάμιξης.

Πρότυπο	pH	Ολικά στερεά (ppm)	Cl <sup>-</sup> (ppm)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ppm)
ΕΛΟΤ 345	6 - 9	<3000	<1214	<1014
EN 1008	>4	-	<500	<2000
ASTM C 1602/C 1602M	-	<50 000	<500	<3000

Οι περισσότερες μονάδες παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος, συγκεκριμένα το 82% [7] στην Ελλάδα διαθέτουν σύστημα ανακύκλωσης νερού με στόχο την επαναχρησιμοποίηση του. Χαρακτηριστικά, η εταιρία INTERBETON ανακυκλώνει το νερό που χρησιμοποιείται για το πλύσιμο του σταθερού και κινητού εξοπλισμού παραγωγής, μεταφοράς και άντλησης σκυροδέματος. Μετά τη συγκέντρωσή του σε δεξαμενές από όπου, μετά από σχετική επεξεργασία ( κάθιση στερεών, προσθήκη HCl<sub>aq</sub>), επιστρέφει στην παραγωγή. Το ποσοστό ανακυκλούμενου νερού φθάνει στο 11% επί του συνολικά απαιτούμενου νερού για τη λειτουργία των μονάδων του ομίλου. [8]

### 1.3.3. Χρήση ανακυκλωμένου νερού- Ανασκόπηση της Διεθνούς Έρευνας

Κάποιες μελέτες σχετικά με την καταλληλότητα του ανακυκλωμένου νερού έκπλυσης έχουν ήδη γίνει. Ένα μέρος αυτών κατέληξε σε κάποια σημαντικά ευρήματα ενώ σε κάποιες άλλες μελέτες τα συμπεράσματα ήταν κάπως συγκεχυμένα. Ήδη από πολύ παλιά ο Abrams (1924) [24] πραγματοποίησε μία εκτενή σειρά δοκιμών. Παρήγαγε 6.000 δοκίμια σκυροδέματος και κονιαμάτων, όπου για την παρασκευή τους χρησιμοποίησε 68 διαφορετικά είδη νερού. Τελικά, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το φυσικό νερό και το νερό του δικτύου ύδρευσης, αυτό δηλαδή που χαρακτηρίζεται ως πόσιμο νερό, είναι κατάλληλο για την παρασκευή σκυροδέματος. Παρά το γεγονός ότι δεν χρησιμοποίησε ανακυκλωμένο νερό, η έρευνά του αυτή αποτελεί μία πρώτη προσέγγιση, διότι χρησιμοποίησε άλλου είδους νερά που περιέχουν ακαθαρσίες, όπως νερό λιμνών, νερό με υψηλή περιεκτικότητα σε αλκαλικά και θειικά και νερό που περιείχε βιομηχανικά απόβλητα. Τα αποτελέσματα, που έδωσε η χρήση αυτών των ειδών νερού ως νερού ανάμιξης, κρίθηκαν αρκετά ικανοποιητικά

δεδομένου ότι σε ορισμένες περιπτώσεις οι θλιπτικές αντοχές των παραγόμενων δοκιμίων ξεπέρασαν το 90% των αντοχών των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με καθαρό νερό.

Το 1994 ο Borger [25] και η ομάδα του εξέτασαν τις αντοχές, τους χρόνους πήξης, την εργασιμότητα και την αντίσταση στα θειικά, κονιαμάτων τα οποία περιείχαν ποσότητες ανακυκλωμένου νερού έκπλυσης. Τα δοκίμια είχαν λόγο νερού προς τσιμέντο (w/c) 0,485 και λόγο αδρανών-τσιμέντου 1:2,75. Αναφέρθηκε ότι η «ηλικία» του νερού έκπλυσης είχε μεγάλη επίδραση στις αντοχές, αύξηση έως και 20%. Γενικά, αύξηση των αντοχών παρατηρήθηκε όταν το νερό προέρχονταν από εκπλύσεις που είχαν γίνει μέχρι και 8 ώρες πριν την παρασκευή των δοκιμίων, ενώ παράλληλα παρατηρήθηκε μείωση της εργασιμότητας και της διαπερατότητας. Αναφέρθηκε επίσης ότι η αντίσταση στα θειικά αυξάνει. Τα αποτελέσματα αυτά αποδίδονται στην αυξημένη περιεκτικότητα τσιμέντου των δοκιμίων, εξαιτίας των αιωρούμενων σωματιδίων τσιμέντου στο νερό έκπλυσης. Μία έρευνα από τον Selih και την ομάδα του (1993)[26] (οι οποίοι παρήγαγαν τρεις παρτίδες σκυροδέματος σε Σλοβενική γραμμή παραγωγής χρησιμοποιώντας ανακυκλωμένο νερό και τσιμέντο CEM I 42.5R, τα μίγματα είχαν λόγο w/c 0,4) καταλήγει στην εύρεση μειωμένων τιμών κάθισης και περιεκτικότητας αέρα για τα δοκίμια που έχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε λεπτά σωματίδια. Σε αντίθεση με το πόρισμα του Borger, ο Selih ανέφερε απώλειες έως 10% των αντοχών, ως αποτέλεσμα της χρήσης ανακυκλωμένου νερού. Οι Sandrolini και Franzoni (2001) [27] διερεύνησαν επίσης τη χρυσή νερού έκπλυσης για ανάμιξη, σε μία μεσαίας παραγωγικότητας μονάδα έτοιμου σκυροδέματος, και κατέληξαν πως οι αντοχές 28 ημερών των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με νερό έκπλυσης ήταν τουλάχιστον στο 96% των αντοχών των δοκιμίων που παρασκευάστηκαν με καθαρό νερό. Τα μίγματα σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκαν είχαν λόγο w/c 0,57 και περιείχαν τσιμέντο τύπου CEM II/A-L 42.5R. Αναφέρθηκε επίσης μείωση της απορρόφησης νερού και του πορώδους, καθώς και πιθανή βελτίωση των αντοχών λόγω της χρήσης νερού έκπλυσης.

Ανάλογα με την προέλευση του νερού ή το είδος και την περιεκτικότητα των προσμίξεων που περιέχουν, κάποια είδη ανακυκλωμένου νερού μπορεί να μην είναι κατάλληλα για χρήση στη παραγωγή σκυροδέματος. Τέτοια ευρήματα αναφέρθηκαν από τον Kuosa (2005) [28] σε μια μελέτη που πραγματοποιήθηκε με πέντε είδη νερού που περιείχαν απορρυπαντικά. Το ανακυκλωμένο νερό, που χρησιμοποιήθηκε σε περιεκτικότητες από 26 έως 100% στο νερό ανάμιξης δεν είχε καμία επίδραση στις αντοχές και στο χρόνο πήξης του σκυροδέματος. Ωστόσο, η χρήση του επηρεάζει δυσμενώς τη δομή των κενών αέρα με αποτέλεσμα αρνητική επίδραση, κυρίως τα αερακτικά τσιμέντα. Το παραπάνω γεγονός συνδέεται άμεσα με την μείωση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος όσο αφορά την αντίσταση σε ψύξη και σε θέρμανση.

Η πιθανή χρήση νερού με υψηλή περιεκτικότητα σε λάσπη (λούμη ή sludge) έχει επίσης μελετηθεί με αποτελέσματα που μάλλον θεωρούνται συγκεκριμένα. Σκυροδέματα με λόγους w/c 0,5, 0,6 και 0,7 μελετήθηκαν από τον Chaatveera [29] και την ομάδα του (2006) ως προς το ειδικό βάρος, την κάθιση, την αύξηση της θερμοκρασίας, τις θλιπτικές αντοχές, το μέτρο ελαστικότητας, τη συρρίκνωση και την επίθεση από οξέα. Αν και το ειδικό βάρος καθώς και η θερμοκρασία του νωπού σκυροδέματος δεν επηρεάζονται από το νερό υψηλής περιεκτικότητας σε λούμη, παρατηρείται μείωση της κάθισης και των αντοχών. Η αύξηση της περιεκτικότητας του νερού που περιέχει λούμη (sludge) στο νερό ανάμιξης έχει



ως αποτέλεσμα την αύξηση της συρρίκνωσης και της απώλειας βάρους που οφείλεται σε επίθεση από οξέα.[23]

## **2. Πειραματικό Μέρος**

## 2.1. Τοποθέτηση Θέματος

Ένα από τα πιο σημαντικά περιβαλλοντικά προβλήματα σχετικά με τη βιομηχανία έτοιμου σκυροδέματος είναι η απόρριψη στο περιβάλλον του νερού που χρησιμοποιείται για την έκπλυση των μηχανημάτων ανάμιξης. Το **νερό έκπλυσης** παρουσιάζει υψηλή περιεκτικότητα σε διαλελυμένα και αιωρούμενα σωματίδια, τόσο μη ενυδατωμένου όσο και ενυδατωμένου τσιμέντου καθώς και εξαιρετικά λεπτών αδρανών κλασμάτων, τα οποία σε ξηρή μορφή είναι ιδιαίτερος λεπτόκοκκα και κατατάσσονται εντός των ορίων του ορισμού της παιπάλης (<75μm). Ως εκ τούτου, η αλκαλικότητα του νερού έκπλυσης είναι πολύ υψηλή, παρουσιάζει pH κοντά στο 12,5 ενώ έχουν αναφερθεί από τη διεθνή εμπειρία τιμές μέχρι 13. Η λάσπη αυτή των στερεών του νερού έκπλυσης στη βιομηχανική πρακτική ονομάζεται **λούμη**, και όσο αφορά την Ελληνική παραγωγή σκυροδέματος, όπου η πλειονότητα των αδρανών είναι ασβεστολιθικής φύσεως, αποτελείται κυρίως από ασβεστολιθική παιπάλη.

Υπολογίζεται ότι η ποσότητα νερού που χρησιμοποιείται καθημερινά για να ξεπλένεται το εσωτερικό των οχημάτων μεταφοράς σκυροδέματος είναι περίπου 1500 L νερού ανά φορτηγό, ενώ η αναξιοποίητη (και συνεπώς απορριπτόμενη) ποσότητα σκυροδέματος μπορεί να φθάσει και τα 300 L. Γίνεται λοιπόν αντιληπτό ότι η απόρριψη του νερού έκπλυσης στο περιβάλλον επιβαρύνει σημαντικά τον υδροφόρο ορίζοντα. Μία προσπάθεια που αφορά την επίλυση του παραπάνω προβλήματος, στην Ελλάδα αλλά και διεθνώς, είναι η ανακύκλωση του νερού έκπλυσης και η επαναχρησιμοποίησή του για την παρασκευή νέων παρτίδων σκυροδέματος.

Όσον αφορά τον Ελλαδικό χώρο, η επαναχρησιμοποίηση του ανακυκλούμενου νερού καθώς και η περιεκτικότητά αυτού στο νερό ανάμιξης επιβάλλεται από αυστηρούς κανόνες (πιο αυστηρούς από ότι στον διεθνή χώρο). Κατά κανόνα οι Ελληνικές προδιαγραφές είναι πολύ πιο αυστηρές από τις αναγκαίες. Χαρακτηριστικά, ο Κανονισμός Τεχνολογίας του Σκυροδέματος (ΚΤΣ 97) προβλέπει ότι η συνολική παιπάλη της άμμου που χρησιμοποιείται σε ανάμιγμα σκυροδέματος δεν πρέπει να υπερβαίνει το 16%. Επίσης, το εθνικό πρότυπο ΕΛΟΤ 345 (1979) προβλέπει ως μέγιστη περιεκτικότητα ανόργανων στερεών στο νερό ανάμιξης τα 3000ppm. Επομένως συμπεραίνεται ότι τα Ελληνικά πρότυπα που ισχύουν αυτή τη στιγμή για τη βιομηχανία του έτοιμου σκυροδέματος, όσο αφορά τα λεπτόκοκκα υλικά σε ένα ανάμιγμα, δεν σχετίζονται άμεσα αλλά πρέπει να εφαρμόζονται ταυτοχρόνως. Αυτό έρχεται σε αντίθεση με το Ευρωπαϊκό πρότυπο νερού ανάμιξης σκυροδέματος (EN 1008) που προβλέπει ένα συνολικό ποσοστό παιπάλης στο ανάμιγμα, συμψηφίζοντας τη λούμη του νερού και τα λεπτόκοκκα κλάσματα της άμμου. Για την ορθή τοποθέτηση της παραπάνω διατύπωσης πρέπει να τεθεί το εξής ερώτημα, **κατά πόσο επιβλαβής ή ευεργετική είναι η ύπαρξη υψηλής περιεκτικότητας ασβεστολιθικής παιπάλης σε ένα ανάμιγμα σκυροδέματος, και πώς αυτή επηρεάζει τις ιδιότητες του σκυροδέματος;**

Η απάντηση του παραπάνω ερωτήματος είναι ο βασικός σκοπός αυτής της πειραματικής προσπάθειας. Η επιτυχία μιας τέτοιας έρευνας είναι απόλυτα συνδεδεμένη με την ολοκληρωμένη μελέτη της επίδρασης της περιεκτικότητας τόσο της λούμης όσο και του ασβεστολιθικού filler της άμμου στο σκυροδέμα. Κρίνεται σκόπιμο επομένως να μελετηθούν μία σειρά από ιδιότητες του σκυροδέματος, σε διάφορα δοκίμια με μεγάλο

εύρος περιεκτικότητας σε παιπάλη, ώστε να αποσαφηνιστεί ο ρόλος της λούμης και να μελετηθεί περαιτέρω η σημασία ύπαρξης και η δράση του ασβεστολιθικού filler στα αναμίγματα σκυροδέματος. Οι βασικές ιδιότητες που πρέπει να μελετηθούν είναι οι θλιπτικές αντοχές και η εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος σε σειρές δοκιμών με διάφορους λόγους w/c και κυμαινόμενες περιεκτικότητες λούμης και filler.

### 2.1.1. Πειραματική διαδικασία

Ο κορμός αυτής της έρευνας βασίζεται στον προσεκτικό σχεδιασμό των πειραμάτων. Αρχικά κρίνεται αναγκαίος, πέρα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, ο χαρακτηρισμός των συστατικών που χρησιμοποιήθηκαν ώστε να γίνει μία πρώτη πρόβλεψη σχετικά με την συμπεριφορά τους στο σκυρόδεμα. Ο χαρακτηρισμός της λούμης (αφού συλλεχθεί, ξηρανθεί και αποσυσσωματωθεί) γίνεται με τις ακόλουθες μεθόδους ανάλυσης: χημική (XRF), ορυκτολογική (XRD), θερμική (TG-DTG) και οπτική (SEM) ώστε να εξεταστεί η μικροδομή της. Ο χαρακτηρισμός του τσιμέντου, τύπου CEM I 42,5, αφορά χημική ανάλυση που έγινε με XRF. Στη λούμη, το τσιμέντο και το filler έγινε ανάλυση κοκκομετρικής κατανομής με laser ώστε να διαπιστωθεί η λεπτότητά τους.

Οι συνθέσεις παρασκευάστηκαν με διαφορετικές και συγκεκριμένες περιεκτικότητες filler στην άμμο. Έτσι για τον επιτυχή προσδιορισμό της ποσότητας του filler στην άμμο, κρίθηκε αναγκαίος ο διαχωρισμός των χονδρόκοκκων κλασμάτων της άμμου από την περιεχόμενη παιπάλη της, ώστε κατά την παρασκευή των δοκιμών να προστίθενται, με τη βοήθεια ζυγού, οι ακριβείς ποσότητες filler και άμμου που υπαγορεύονται από το σχεδιασμό των πειραμάτων. Ο διαχωρισμός της άμμου έγινε με την μέθοδο της υγρής κοσκίνισης, με τη χρήση ενός κόσκινου No 200 (75  $\mu\text{m}$ ). Δείγματα από τις προκύπτουσες συνθέσεις άμμου αναλύθηκαν με τη μέθοδο 'ισοδύναμο άμμου' ώστε να ερευνηθεί η τυχών υψηλή περιεκτικότητα της σε αργιλοπυριτική παιπάλη (η οποία πρέπει να βρίσκεται σε συγκεκριμένα χαμηλά ποσοστά στα κονιάματα).

Παρασκευάστηκαν δύο βασικές σειρές δοκιμών κονιαμάτων. Το **πλήθος των πειραμάτων και ο κίνδυνος της επανάληψης** κάποιων εξ αυτών οδήγησε στην παρασκευή κονιαμάτων και όχι σκυροδεμάτων, λόγω μικρότερης απαιτούμενης ποσότητας πρώτων υλών και ευκολίας στην παρασκευή. Πολύ σημαντική επίσης είναι η διευκόλυνση που παρέχει η χρήση των δοκιμών κονιαμάτων σχετικά με τη μελέτη των μικρών διαφορών των θλιπτικών αντοχών. Αυτό διότι εξαιτίας της πιο ομοιόμορφης φύσης των κονιαμάτων είναι πιο εύκολο να συγκριθούν οι μικρές διαφορές που παρουσιάζουν οι θλιπτικές αντοχές της τάξης των μερικών MPa ενώ, στα δοκίμια σκυροδέματος λόγω της ιδιαιτερότητας και σχετικής ανομοιομορφίας του υλικού οι μικρές διαφορές των θλιπτικών αντοχών μπορεί να βρίσκονται εντός του περιθωρίου του τυχαίου σφάλματος.

Η πρώτη σειρά παρασκευάστηκε έτσι ώστε ο λόγος νερού προς τσιμέντο να είναι σταθερός και ίσος με 0,5, η ποσότητα συνολικής άμμου, τσιμέντου και νερού στο κάθε δείγμα ήταν η ίδια. Τα δείγματα αυτής της σειράς διέφεραν ως προς την περιεκτικότητα filler στην άμμο (περιεκτικότητα filler από 0 έως 30%). Τα πειράματα πραγματοποιήθηκαν τρεις φορές με τρεις διαφορετικές περιεκτικότητες λούμης 0 ppm, 10000 ppm και 50000 ppm. Η περιεκτικότητα της λούμης υπολογισμένη σε gr, σε ξηρό μίγμα πρώτων υλών, είναι ισοδύναμη με τις παραπάνω τιμές ppm όπως ακριβώς υπολογίζεται η περιεκτικότητα των

αιωρούμενων στερεών στο νερό έκπλυσης. Σκοπός είναι η μελέτη της επίδρασης διαφόρων περιεκτικότητας filler και λούμης των δοκιμών στην εξάπλωση του νωπού κονιάματος και τις αντοχές του σκληρυμένου.

Στη δεύτερη σειρά, βάσει των αποτελεσμάτων της πρώτης, επαναλήφθηκαν τα πιο χαρακτηριστικά πειράματα, με τη διαφορά ότι οι περιεκτικότητες σε νερό ήταν διαφορετικές ανά δείγμα (διαφορετικό w/c), με στόχο όλα τα δοκίμια αυτής της σειράς να παρουσιάζουν την ίδια εξάπλωση ( $\pm 0,25$  cm). Σκοπός αυτής της σειράς είναι να μελετηθεί η επίδραση διαφόρων περιεκτικότητας filler και λούμης στις θλιπτικές αντοχές σκληρυμένου κονιάματος σε δοκίμια που παρουσιάζουν την ίδια εργασιμότητα.

Έχοντας συμπληρώσει τις δύο βασικές σειρές των δοκιμών δημιουργήθηκε η ανάγκη να εξακριβωθεί το ποσοστό που επηρεάζει κάθε μία από τις ανεξάρτητες μεταβλητές (%filler, w/c, ποσότητα λούμης) τις ιδιότητες των παραγόμενων κονιαμάτων. Για τον λόγο αυτό, σχεδιάστηκαν εννέα ακόμα πειράματα, και με τη βοήθεια της στατιστικής μεθόδου Taguchi, υπολογίστηκε ο βαθμός επίδρασης του κάθε παράγοντα στην εργασιμότητα και στις θλιπτικές αντοχές.

## 2.2. Χαρακτηρισμός και Προετοιμασία Πρώτων Υλών

Για την ανάγκη των πειραμάτων αλλά και για την τελική εκτίμηση των τελικών ιδιοτήτων των κονιαμάτων που παρασκευάζονται είναι απαραίτητη η προεργασία και ο χαρακτηρισμός των πρώτων υλών.

Ο χαρακτηρισμός της λούμης (αφού συλλεχθεί, ξηρανθεί και αποσυσσωματωθεί) γίνεται με τις ακόλουθες μεθόδους ανάλυσης: χημική (XRF), ορυκτολογική (XRD), θερμική (TG-DTG) και οπτική (SEM) ώστε να εξεταστεί η μικροδομή της. Ο χαρακτηρισμός του τσιμέντου, τύπου CEM I 42,5, αφορά χημική ανάλυση που έγινε με XRF. Στη λούμη, το τσιμέντο και το filler έγινε ανάλυση κοκκομετρικής κατανομής με laser ώστε να διαπιστωθεί η λεπτότητά τους. Η άμμος διαχωρίζεται από την παιπάλη της με τη μέθοδο της υγρής κοσκίνισης ώστε να δημιουργηθούν συνθέσεις άμμου με ακριβή περιεκτικότητα σε filler και σε χονδρότερα κλάσματα άμμου. Τέλος, οι προκύπτουσες συνθέσεις άμμου υποβάλλονται στη δοκιμή ισοδύναμου άμμου.

### 2.2.1. Χαρακτηρισμός Λούμης

Για τον επιτυχή σχεδιασμό των πειραμάτων αλλά και για την σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων, είναι αναγκαίος ο χαρακτηρισμός της λούμης ώστε να διαπιστωθεί η φυσική και χημική σύσταση του υλικού. Για τον σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκε α) χημική ανάλυση με χρήση της μεθόδου φθορισμού ακτίνων X (X – Ray Fluorescence – XRF), β) ορυκτολογική ανάλυση με τη μέθοδο περίθλασης ακτίνων X (X- Ray Diffraction – XRD), γ) θερμική ανάλυση με τη μέθοδο της βαρυτομετρικής (Thermal Gravimetric – TG) και διαφορικής βαρυτομετρικής (Differential Thermal Gravimetric – DTG) ανάλυσης και δ) οπτική ανάλυση με τη μέθοδο της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης (scanning electron microscopy-SEM). Τέλος, μετά την αποσυσσωμάτωση και την ξήρανσή της λούμης έγινε ανάλυση κοκκομετρικής κατανομής με laser ώστε να διαπιστωθεί η λεπτότητά της.

### 2.2.1.1.Χημική ανάλυση Λούμης

Η χημική ανάλυση της λούμης έγινε με τη μέθοδο φθορισμού ακτίνων Χ με τη βοήθεια φασματοφωτόμετρου φθορισμού ακτίνων Χ (XRF). Αρχικά, παρασκευάζονται τετηγμένα δισκία (fused beads), τα οποία αναλύονται με το σύστημα φθορισμού ακτίνων Χ για τον προσδιορισμό της περιεκτικότητας τους σε CaO, SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO και Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Για την πραγματοποίηση των αναλύσεων προαπαιτείται βαθμονόμηση του οργάνου, δηλαδή κατασκευή καμπύλης για κάθε οξείδιο, που συσχετίζει τη μετρούμενη ένταση της ακτινοβολίας φθορισμού με τη συγκέντρωση του οξειδίου στο δείγμα. Κατόπιν, βάσει των καμπυλών αυτών, οι μετρούμενες εντάσεις από το υπό ανάλυση δείγμα μετατρέπονται σε συγκέντρωση οξειδίων που είναι και το τελικό αποτέλεσμα της ανάλυσης. Η χημική ανάλυση που προέκυψε φαίνεται στον **Πίνακα 2.1**.

**Πίνακας 2.1.** Χημική ανάλυση λούμης.

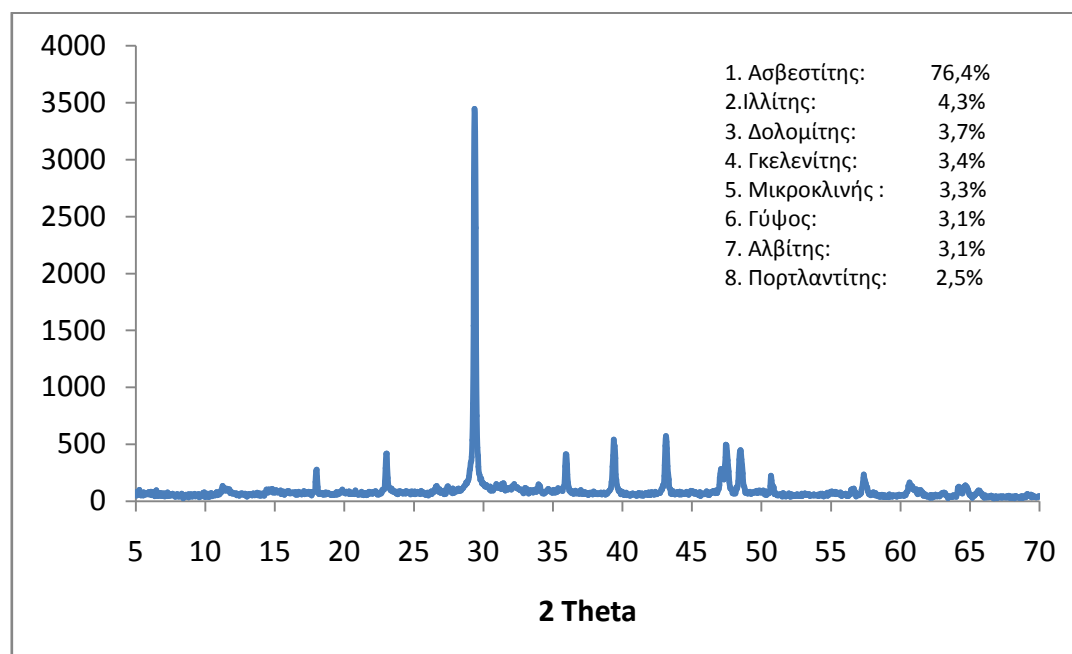
Οξείδιο	περιεκτικότητα (% w/w)	Οξείδιο	περιεκτικότητα (% w/w)
CaO	43,3	Cl	840ppm
SiO <sub>2</sub>	15,9	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	620ppm
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,07	MnO	270ppm
MgO	2,11	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	210ppm
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,05	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	110ppm
SO <sub>3</sub>	1,58	CuO	87ppm
K <sub>2</sub> O	0,293	NiO	82ppm
TiO <sub>2</sub>	0,187	ZnO	65ppm
Na <sub>2</sub> O	0,107	SrO	63ppm
LOI	30,2		

Όπως προκύπτει από την χημική ανάλυση, ο ασβεστίτης CaCO<sub>3</sub> είναι το κύριο συστατικό στη λούμη. Αυτό το γεγονός υποδεικνύεται τόσο από την περιεκτικότητα μονοξειδίου του ασβεστίου CaO (43,3 % w/w), το οποίο είναι το προϊόν πύρωσης του CaCO<sub>3</sub>, όσο και από το ποσοστό της απώλειας πύρωσης (LOI 30,3%). Εάν το υλικό αποτελούνταν αποκλειστικά από CaCO<sub>3</sub> τότε, βάσει στοιχειομετρίας, η περιεκτικότητα σε CaO θα έπρεπε να είναι 56% και η απώλεια πύρωσης, (δηλαδή το παραγόμενο CO<sub>2</sub>) 44%. Ωστόσο το υψηλό ποσοστό της απώλειας πύρωσης (LOI 30,3%) υποδηλώνει πως το CaCO<sub>3</sub> είναι το κύριο συστατικό της λούμης.

Επίσης ανιχνεύτηκαν και δευτερεύοντα οξείδια, όπως το διοξείδιο του πυριτίου SiO<sub>2</sub> σε περιεκτικότητα 15,9%, το οξείδιο του αργιλίου Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε περιεκτικότητα 4,07%, το οξείδιο του μαγνησίου MgO σε περιεκτικότητα 2,11% και το οξείδιο του σιδήρου Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> σε περιεκτικότητα 2,05%. Τα οξείδια αυτά προέρχονται και από τις ορυκτολογικές φάσεις του κλίνκερ που εμπεριέχονται στο ενυδατωμένο τσιμέντο (C<sub>3</sub>S, C<sub>2</sub>S, C<sub>3</sub>A και C<sub>4</sub>AF) αλλά κυρίως από προσμίξεις στα ασβεστολιθικά αδρανή που απαρτίζουν το μεγαλύτερο μέρος του νωπού σκυροδέματος άρα και των στερεών του νερού έκπλυσης, δηλαδή της λούμης.

### 2.2.1.2.Ορυκτολογική ανάλυση λούμης

Για τον εντοπισμό των κύριων ορυκτολογικών φάσεων σε κρυσταλλική μορφή χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της περίθλασης με ακτίνες Χ και με την χρήση περιθλασιμέτρου ακτινών Χ (XRD). Η μέθοδος συνδυάστηκε με την ημιποσοτική μέθοδο Rietveld, έτσι ώστε πέρα από την εύρεση των διαφόρων κρυσταλλικών φάσεων να είναι δυνατός ο προσδιορισμός της περιεκτικότητας αυτών. Το ακτινοδιάγραμμα της λούμης καθώς και οι περιεκτικότητες που δίνονται από την μέθοδο Rietveld παρατίθενται στο **Διάγραμμα 2.1**.



**Διάγραμμα 2.1.** Ακτινοδιάγραμμα λούμης- Ημιποσοτικός προσδιορισμός με τη χρήση της μεθόδου Rietveld.

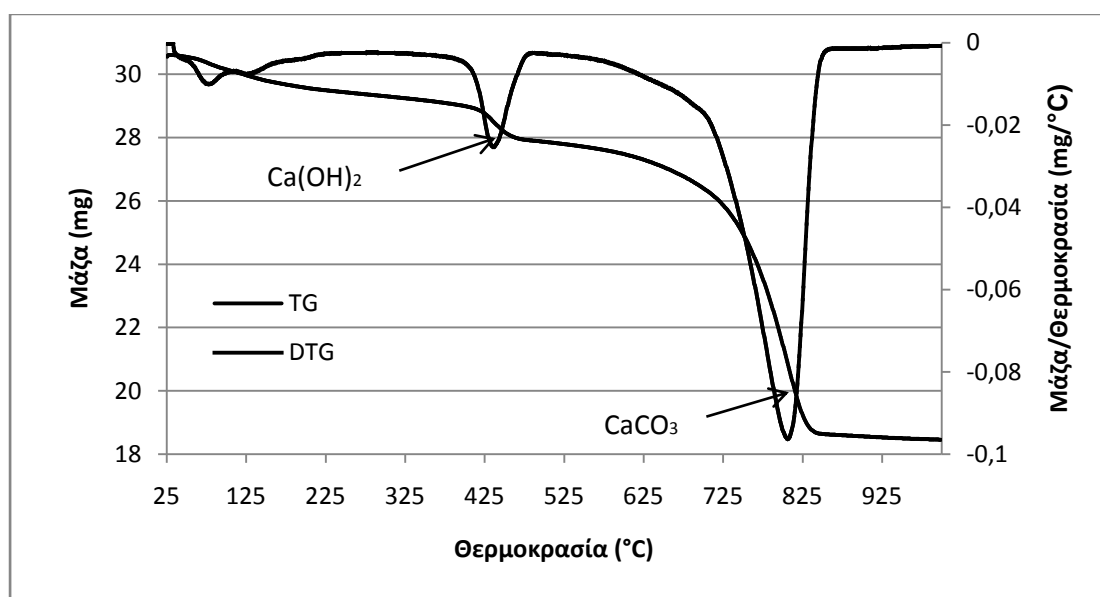
Τα αποτελέσματα της μεθόδου περίθλασης ακτινών Χ είναι παρόμοια και συμπληρωματικά με αυτά που έδωσε η χημική ανάλυση. Η κύρια κορυφή του ακτινοδιαγράμματος αντιστοιχεί στον ασβεστίτη  $\text{CaCO}_3$  όπως άλλωστε υποδεικνύεται και από τα αποτελέσματα της μεθόδου Rietveld,  $\text{CaCO}_3$  76,4 %. Οι κρύσταλλοι Πορτλαντίτη  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  και Γύψου  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  βρίσκονται σε πολύ μικρότερη περιεκτικότητα, 2,5 και 3,1% αντίστοιχα. Επίσης οι υπόλοιπες ενώσεις που εμφανίζονται και στο XRF φαίνεται να κρυσταλλώνονται στη μορφή του Ιλλίτη  $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$  σε ποσοστό 4,3 %, του Δολομίτη  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  σε ποσοστό 3,7%, του Γκελενίτη  $2\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{SiO}_2$  σε ποσοστό 3,4 %, του Μικροκλινή  $\text{KAlSi}_3\text{O}_8$  σε ποσοστό 3,3% και του Αλβίτη  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  σε ποσοστό 3,1%.

### 2.2.1.3.Θερμική ανάλυση λούμης

Την χημική και ορυκτολογική ανάλυση συμπληρώνει η θερμοβαρυμετρική ανάλυση (TG) και η διαφορική θερμική βαρυτομετρική ανάλυση (DTG). Η καταγραφή της μεταβολής της μάζας των εξεταζόμενου δείγματος κατά τη θέρμανση του, πραγματοποιήθηκε με τη χρήση του οργάνου TGA/SDTA 851 της METTLER TOLEDO. Οι συνθήκες εφαρμογής της μεθόδου ήταν οι εξής:

- Εισαγωγή των δειγμάτων, βάρους 50-70mg, σε χωνευτήριο πλατίνας με χωρητικότητα 70μL.
- Θερμική κατεργασία στην περιοχή από 25 °C έως 1000°C με σταθερό βήμα ανόδου της θερμοκρασίας 10°C/min.
- Αποφυγή ενανθράκωσης των δειγμάτων από τον ατμοσφαιρικό αέρα χρησιμοποιώντας άζωτο παροχής 50ml/min, ως αδρανές αέριο.

Στο **Διάγραμμα 2.2** δίδονται οι καμπύλες της θερμικής βαρυτομετρικής (TG) και διαφορικής βαρυτομετρικής θερμικής ανάλυσης (DTG) δείγματος λούμης.



**Διάγραμμα 2.2.** Καμπύλες TG και DTG δείγματος λούμης.

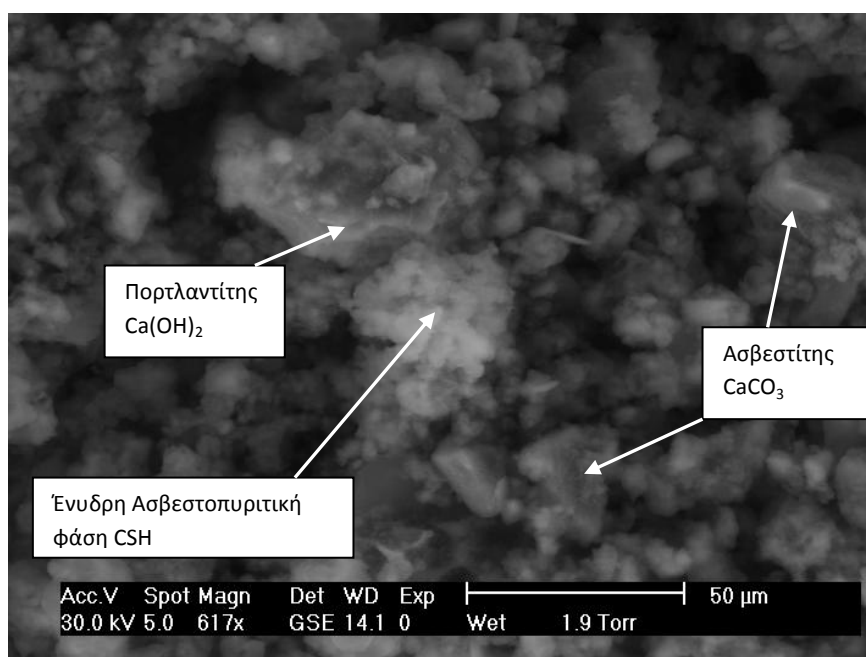
Από την καμπύλη TG και ακόμα πιο ξεκάθαρα από τη διαφορική της μορφή (καμπύλη DTG) φαίνεται πως σημαντική απώλεια μάζας παρατηρείται σε δύο περιοχές του διαγράμματος. Η πιο έντονη μεταβολή φαίνεται στην περιοχή διάσπασης του ασβεστίτη  $\text{CaCO}_3$  μεταξύ των 600 και 900 °C. Αυτό το εύρημα ενισχύει το συμπέρασμα που προέκυψε από τις αναλύσεις με XRF και XRD, δηλαδή ότι το κύριο συστατικό της λούμης είναι ο ασβεστίτης. Μία λιγότερη έντονη αλλά όχι αμελητέα μεταβολή παρατηρείται στην περιοχή 430-530 °C και οφείλεται στην απώλεια των χημικά ενωμένων νερών του πορτλαντίτη  $\text{Ca(OH)}_2$ . Οι απώλειες μάζας που περιγράφηκαν παραπάνω εκφράζονται και στις παρακάτω αντιδράσεις:





#### 2.2.1.4.Οπτική ανάλυση λούμης

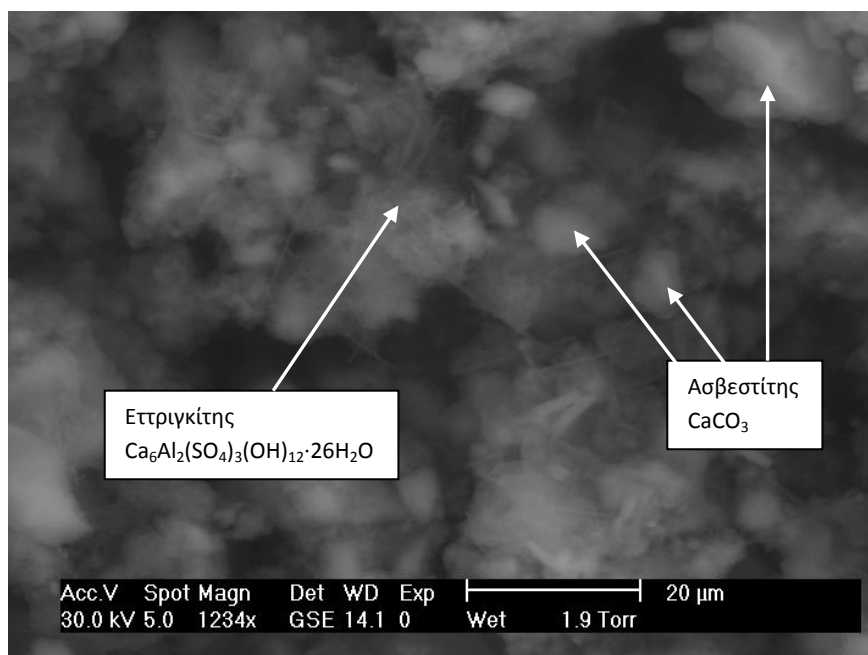
Η οπτική ανάλυση της λούμης έγινε με την μέθοδο της ηλεκτρονικής μικροσκοπίας σάρωσης. Η αρχή λειτουργίας του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM) βασίζεται στην παραγωγή μίας εστιασμένης δέσμης ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας δημιουργώντας ένα εύρος σημάτων στην επιφάνεια του στερεού δείγματος. Τα σήματα που προέρχονται από την αλληλεπίδραση ηλεκτρονίου-δείγματος αποκαλύπτουν πληροφορίες σχετικά με το δείγμα συμπεριλαμβανομένης της εξωτερικής μορφολογίας, της χημικής σύνθεσης και της κρυσταλλικής δομής του δείγματος. Το όργανο που χρησιμοποιήθηκε για τη χημική ανάλυση της λούμης είναι το μοντέλο Quanta 200 της εταιρίας FEI. Επίσης, για την ανάλυση χρησιμοποιήθηκε ανιχνευτής GSE. Οι **Εικόνες 2.1** και **2.2** προέρχονται από την ανάλυση της λούμης στο SEM.



**Εικόνα 2.1.** Άποψη λούμης από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM), μεγέθυνση 617x.

Στην **Εικόνα 2.1**, μεγέθυνση 617x, διακρίνεται καθαρά η παρουσία ασβεστίτη  $\text{CaCO}_3$ . Χαρακτηριστικά, η μορφή του, όπως δίνεται από το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης, ομοιάζει με μικρούς βράχους. Στην ίδια εικόνα διακρίνεται η παρουσία πορτλαντίτη  $\text{Ca(OH)}_2$ , οι κρύσταλλοι του οποίου έχουν πολυγωνική μορφή και το περίγραμμά τους ξεχωρίζει σε σχέση με τα άλλα συστατικά της λούμης. Τέλος, εμφανής είναι η παρουσία της ένυδρης ασβεστοπυριτικής φάσης CSH με την μορφή λευκού νεφελώματος.

Σε μεγαλύτερη μεγέθυνση, **Εικόνα 2.2**, διακρίνονται οι βελονοειδείς κρύσταλλοι του εττριγκίτη  $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ , ο οποίος αποτελεί προϊόν της ενυδάτωσης του τσιμέντου και εμφανίζεται από τα πρώτα στάδια της διεργασίας. Επίσης, φαίνονται πιο καθαρά οι κρύσταλλοι του ασβεστίτη  $\text{CaCO}_3$ .



**Εικόνα 2.2.** Άποψη λούμης από ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (SEM), μεγέθυνση 1234x.

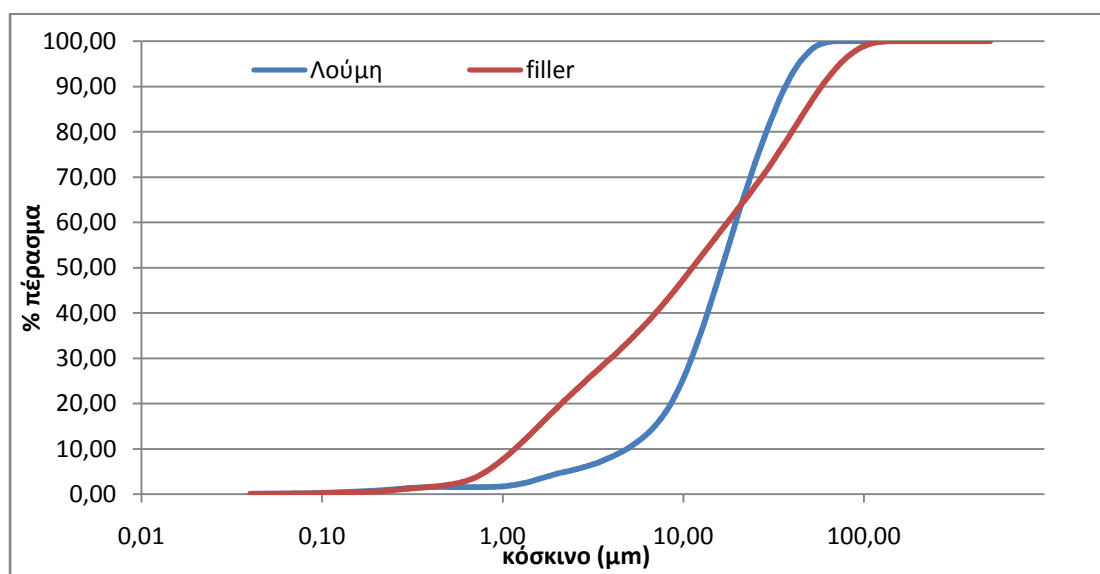
#### 2.2.1.5. Προεργασία λούμης- κοκκομετρική κατανομή

Η λούμη που χρησιμοποιήθηκε στις συνθέσεις συλλέχθηκε από δεξαμενή κάθισης στερεών των εγκαταστάσεων της εταιρίας INTERBETON στη Μεταμόρφωση Αττικής. Κατόπιν, τοποθετήθηκε σε φούρνο ξήρασης για 24 ώρες στους 95°C ώστε να απομακρυνθεί η περιεχόμενη υγρασία. Ακολούθησε αποσυσσωμάτωση του υλικού με ανακίνηση και χωρίς τη χρήση αλεστικών. Τέλος, έγινε κοσκίνιση με κόσκινο No 172 (90 μm) ώστε να ελεγχτεί η λεπτότητα του υλικού. Δείγμα της λεπτόκοκκης λούμης υπέστη κοκκομετρική ανάλυση με laser με την συσκευή CILAS 1064 Liquid ώστε να εξακριβωθεί η λεπτότητα του υλικού. Τα αποτελέσματα φαίνονται στον **Πίνακα 2.2** και στο **Διάγραμμα 2.3**.

**Πίνακας 2.2.** Κοκκομετρική ανάλυση λούμης με laser.

Μέγεθος κόσκινου (μm)	% πέρασμα από το κόσκινο
2,00	4,49
5,00	10,26
10,00	25,52
16,00	48,82
20,00	61,33
25,00	73,12
32,00	84,54
45,00	95,80
71,00	100,00
90,00	100,00

Όπως φαίνεται από την κοκκομετρική ανάλυση, **Πίνακας 2.2** το 100% των κόκκων της λούμης βρίσκεται κάτω από 71 μm, άρα ανήκει στην κατηγορία της παιπάλης. Επίσης, το 95,8% των κόκκων της είναι κάτω από 45 μm και το 84,54% κάτω από 32μm. Στο **Διάγραμμα 2.3** συγκρίνονται οι καμπύλες κοκκομετρίας της λούμης με την αντίστοιχη καμπύλη του filler εμπορίου ξηρορέματος που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία. Όπως προκύπτει λοιπόν, η λούμη είναι ένα υπέρλεπτο υλικό το οποίο καλύπτει τις κοκκομετρικές απαιτήσεις το ασβεστολιθικού filler. Συγκεκριμένα, για μεγαλύτερα μεγέθη κόσκινο (>25μm) η λούμη εμφανίζει πιο λεπτόκοκκα χαρακτηριστικά από το filler το οποίο έχει 100% πέρασμα στα 140μm σε αντίθεση με τη λούμη που είναι όλη λεπτότερη από 71μm.



**Διάγραμμα 2.3.** Καμπύλες κοκκομετρικής ανάλυσης με laser λούμης και filler, κόσκινο(μm) - % πέρασμα.

Συμπερασματικά, η λούμη αποτελεί ένα εξαιρετικά λεπτόκοκκο υλικό ασβεστολιθικής φύσεως κυρίως λόγω της φύσης των αδρανών που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα. Προφανώς, η λούμη που προκύπτει στις ελληνικές μονάδες σκυροδέματος είναι αμιγώς ασβεστολιθικής προέλευσης λόγω της μεγάλης ποσότητας ασβεστόλιθου που υπάρχει στην χώρα, ενώ σε άλλες χώρες της βορείου Ευρώπης που χρησιμοποιούνται και αργιλοπυριτικά αδρανή η χημική ανάλυση της αντίστοιχης λούμης θα ήταν διαφορετική. Η συγκεκριμένη λούμη που μελετήθηκε και χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία αποτελείτο κυρίως από ανθρακικό ασβέστιο (ασβεστίτη), το κύριο συστατικό του ασβεστόλιθου, με κάποιες ποσότητες πυριτίου, αργιλίου και σιδήρου προερχόμενες από το τσιμέντο και από προσμίξεις των αδρανών αλλά και υδροξείδιο του ασβεστίου (πορτλαντίτη) που προέρχεται από την ενυδάτωση του τσιμέντου. Τέλος, ο χαρακτηρισμός του υλικού δεν υποδεικνύει την ύπαρξη συστατικών βλαβερών προς το τσιμέντο ή το σκυρόδεμα.

### 2.2.2.Χαρακτηρισμός Τσιμέντου-Χημική και Κοκκομετρική Ανάλυση

Σε όλες τις συνθέσεις χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο υψηλών αντοχών τύπου CEM I 42,5. Ο τύπος αυτός του τσιμέντου είναι ο πλέον κατάλληλος για την χρήση του στην παρασκευή κονιαμάτων. Η χημική ανάλυση το τσιμέντου έγινε με τη μέθοδο φθορισμού ακτινών Χ με τη βοήθεια φασματοφωτόμετρου φθορισμού ακτινών Χ(XRF). Τα συστατικά που περιέχονται στο τσιμέντο καταγράφονται στον **Πίνακα 2.3**.

**Πίνακας 2.3.** Χημική σύσταση τσιμέντου CEM I 42,5.

Οξείδιο	περιεκτικότητα (% w/w)
CaO	64,16
SiO <sub>2</sub>	20,13
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,82
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,50
MgO	3,25
SO <sub>3</sub>	2,82
K <sub>2</sub> O	0,59
Na <sub>2</sub> O	0,19

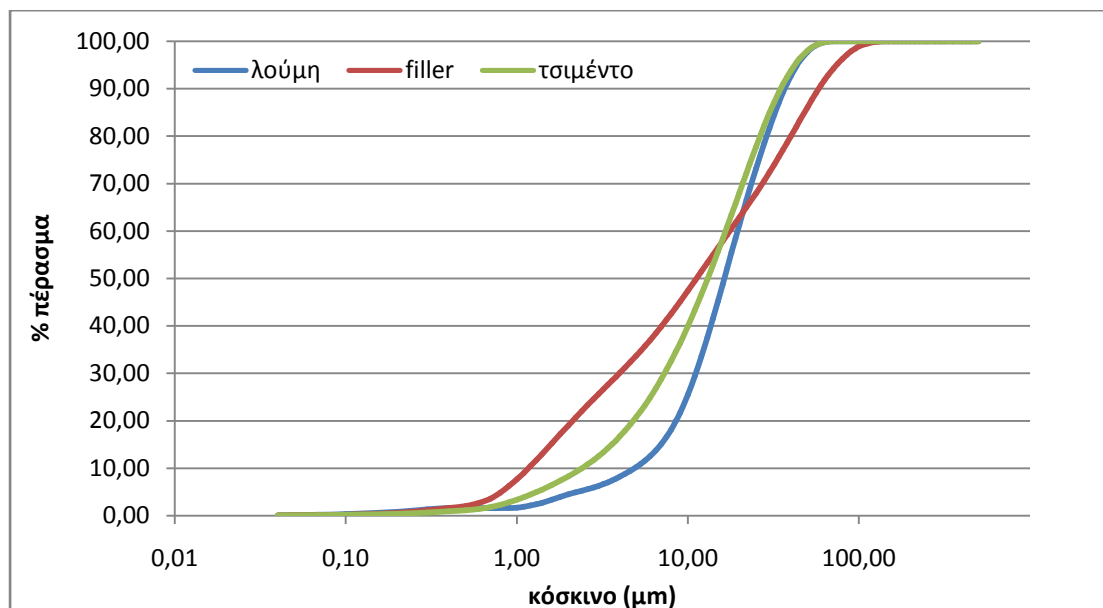
Πέρα από την χημική ανάλυση πραγματοποιήθηκε κοκκομετρική ανάλυση με τη μέθοδο laser, τα αποτελέσματα της οποίας παραθέτονται στον **Πίνακα 2.4** και στο **Διάγραμμα 2.4**. Στον **Πίνακα 2.4** φαίνεται πως ο 100% του τσιμέντου είναι κάτω από 71 μm, το 96,38% κάτω από 45 μm και το 82,22% κάτω από 32 μm. Φαίνεται λοιπόν πως το τσιμέντο πληροί τις προδιαγραφές λεπτότητας ώστε να είναι σε επαφή με τα χονδρότερα αδρανή της άμμου με αποτέλεσμα οι συνθέσεις κονιαμάτων να παρουσιάζουν την απαραίτητη ομοιογένεια.

**Πίνακας 2.4.** Κοκκομετρική ανάλυση τσιμέντου CEM I 42,5.

Μέγεθος κόσκινου (μm)	% πέρασμα από το κόσκινο
2,00	8,29
5,00	20,85
10,00	39,93
16,00	58,38
20,00	68,07
25,00	77,71
32,00	87,22
45,00	96,38
71,00	100,00
90,00	100,00

Στο **Διάγραμμα 2.4** συγκρίνεται η λεπτότητα του τσιμέντου με το ασβεστολιθικό filler που χρησιμοποιήθηκε και της λούμης. Από τη σύγκριση των τριών καμπυλών φαίνεται καθαρά

πως η κοκκομετρική κατανομή του τσιμέντου βρίσκεται πιο κοντά σε αυτήν της λούμης παρά σε αυτήν του filler.



**Διάγραμμα 2.4.** Καμπύλες κοκκομετρικής ανάλυσης με laser τσιμέντου CEM I 42,5, filler και λούμης κόσκινο(μm)-%πέρασμα.

### 2.2.3. Προεργασία και Ανάλυση Άμμου

Η άμμος που χρησιμοποιήθηκε σε όλες τις συνθέσεις προήλθε από το λατομείο του ομίλου TITAN που βρίσκεται στην περιοχή Ξηρορέματος του Ασπροπύργου Αττικής. Οι συνθέσεις παρασκευάστηκαν με διαφορετικές και συγκεκριμένες περιεκτικότητες filler στην άμμο. Έτσι για τον επιτυχή προσδιορισμό της ποσότητας του filler στην άμμο, κρίθηκε αναγκαίος ο διαχωρισμός των χονδρόκοκκων κλασμάτων της άμμου από την περιεχόμενη παιπάλη της, ώστε κατά την παρασκευή των δοκιμών να προστίθενται, με τη βοήθεια ζυγού, οι ακριβείς ποσότητες filler και άμμου που υπαγορεύονται από το σχεδιασμό των πειραμάτων. Ο διαχωρισμός της άμμου έγινε με τη μέθοδο της υγρής κοσκίνισης. Δείγματα από τις προκύπτουσες συνθέσεις άμμου αναλύθηκαν με τη μέθοδο 'ισοδύναμο άμμου' ώστε να ερευνηθεί η τυχόν υψηλή περιεκτικότητα της σε αργιλοπηριτική παιπάλη (η οποία πρέπει να βρίσκεται σε συγκεκριμένα χαμηλά ποσοστά στα κονιάματα).

#### 2.2.3.1. Υγρή Κοσκίνιση

Κατά τη διαδικασία της υγρής κοσκίνισης, δείγματα άμμου από το λατομείο Ξηρορέματος υποβάλλονται στην παρακάτω διαδικασία:

1. 500g άμμου τοποθετούνται σε βαθύ δοχείο.
2. Η άμμος ξεπλένεται καλά ώστε να είναι διαυγής. Υπολογίζεται ότι οι κόκκοι της άμμου που απομακρύνονται από την έκπλυση είναι κάτω από 100 μm.
3. Το νερό της έκπλυσης με τα λεπτά κλάσματα της άμμου περνάει από κόσκινο Νο 200 (75 μm) έτσι ώστε να συλλεχθούν οι κόκκοι που βρίσκονται από 75 μm και πάνω.

4. Η άμμος που δεν περιέχει filler τοποθετείται για 24 ώρες σε φούρνο ξήρανσης στους 95 °C.
5. Αφού κοσκινιστεί και ξηραθεί η απαραίτητη ποσότητα άμμου χωρίς filler που είναι απαραίτητη για την διεξαγωγή των πειραμάτων, χωρίζεται σε τέσσερα μέρη και φτυαρίζεται ώστε να ομογενοποιηθεί (τεταρτομερισμός).

Στη συνέχεια, ποσότητες άμμου και filler ζυγίζονται σε ζυγό ακριβείας δευτέρου δεκαδικού ψηφίου ώστε να παραχθούν συνθέσεις άμμου που η περιεκτικότητά τους σε filler είναι 0, 5, 10, 15, 20, 22,5, 25 και 30 % αντίστοιχα.

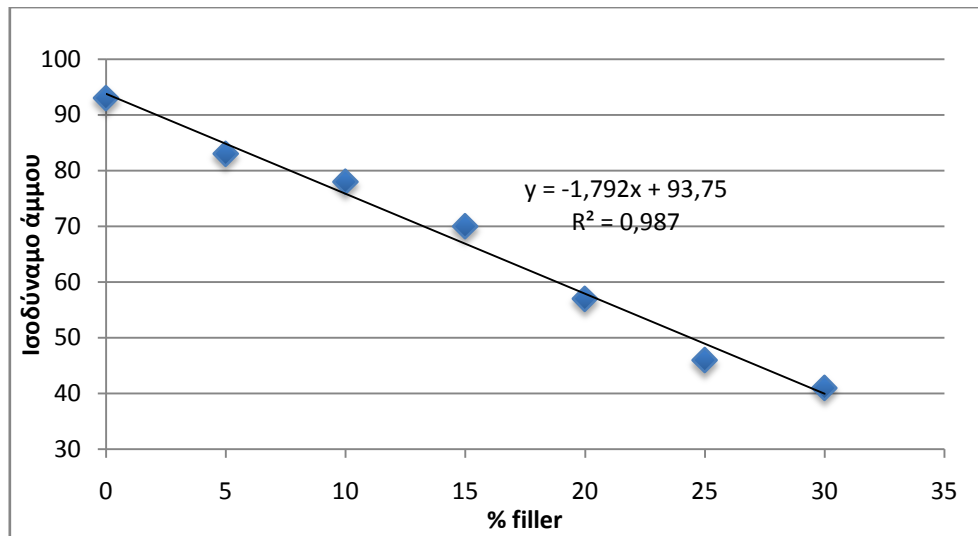
### 2.2.3.2.Ισοδύναμο Άμμου

Δείγματα 300g από κάθε σύνθεση άμμου υποβάλλονται στη δοκιμή 'ισοδύναμο άμμου'. Η δοκιμή αυτή γίνεται για να διαπιστωθεί η παρουσία επιβλαβών ποσοτήτων αργίλου. Η παρουσία αργίλου στην άμμο είναι ανεπιθύμητη διότι προκαλεί διόγκωση μετά από κορεσμό του αδρανούς με νερό και περιβάλλει τους κόκκους του αδρανούς με αποτέλεσμα να λειτουργεί ως λιπαντικό. Στον **Πίνακα 2.5** και στο **Διάγραμμα 2.5** φαίνονται τα αποτελέσματα του ισοδύναμου άμμου που στην προκειμένη περίπτωση μετρήθηκε κυρίως για να επαληθευτεί η ορθότητα των συνθέσεων της άμμου παρά η ύπαρξη των αργίλων.

**Πίνακας 2.5.** Ισοδύναμο άμμου για δείγματα που περιέχουν 0, 5, 10, 15, 20, 25 και 30% filler.

% filler	ισοδύναμο άμμου %
0	93
5	83
10	78
15	70
20	57
25	46
30	41

Τα αποτελέσματα από την δοκιμή ισοδύναμου άμμου δείχνουν πως η άμμος που χρησιμοποιείται σε όλες τις συνθέσεις ικανοποιεί την συνθήκη για χαμηλή περιεκτικότητα σε άργιλο. Με την αύξηση του ποσοστού σε filler παρατηρείται μείωση του ισοδύναμου άμμου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην αύξηση της περιεκτικότητας της ασβεστολιθικής παιτάλης στην άμμο και όχι στην αυξημένη παρουσία αργίλου.



**Διάγραμμα 2.5.** Γραφική αναπαράσταση Ισοδύναμου άμμου δειγμάτων περιέχουν 0, 5, 10, 15, 20, 25 και 30% filler.

## 2.3. Πειραματική Διαδικασία

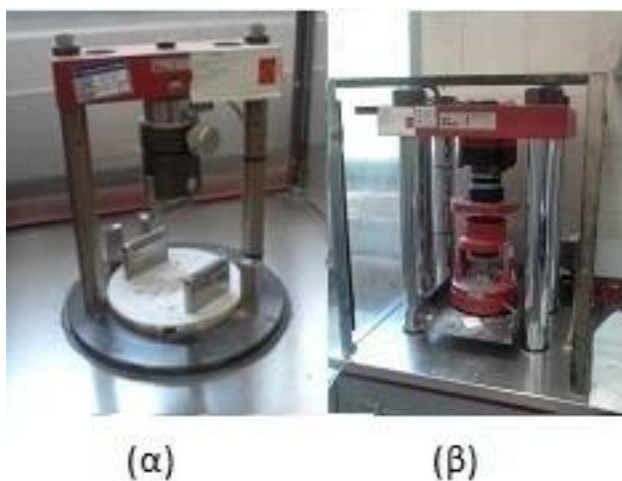
### 2.3.1. Περιγραφή Διεξαγωγής Πειραμάτων

Το σύνολο των πειραμάτων πραγματοποιήθηκαν στο εργαστήριο κονιαμάτων της διεύθυνσης έρευνας και ποιότητας της Α.Ε. τιμέντων TITAN στο Καμάρι Βοιωτίας. Η ανάμιξη γίνεται σε αναμκτήρα (Rotation  $140 \pm 5$  rpm και Planetary movement  $62 \pm 2$  rpm) για 90 sec, που ανταποκρίνεται στο πρότυπο EN 196-1[33]. Μετά το πέρας της ανάμιξης το νωπό κονίαμα υποβάλλεται σε δοκιμή εξάπλωσης σύμφωνα με το πρότυπο EN 1015-3, 1999[34], **Εικόνα 2.3.** Η τελική τιμή της εξάπλωσης που λαμβάνεται είναι ο μέσος όρος του μήκους δύο κάθετων διαμέτρων της απλωμένης νωπής κονιάς (σε cm).

Στη συνέχεια το μίγμα τοποθετείται σε πρισματικές μήτρες ( $40 \times 40 \times 160$  mm)[33]. Η κάθε μήτρα παράγει τρία δοκίμια (ώστε εν συνεχεία να μετρηθούν οι θλιπτικές αντοχές του σκληρυμένου κονιάματος στις 2, στις 7 και στις 28 ημέρες). Εν συνεχεία, προκειμένου να ωριμάσει και να σκληρυνθεί σε ελεγχόμενες συνθήκες, το δοκίμιο τοποθετείται σε θάλαμο συντήρησης, σταθερής θερμοκρασίας  $20$  °C και υγρασίας 95% RH.



**Εικόνα 2.3.** Τράπεζα εξάπλωσης με την οποία μετρήθηκε η εξάπλωση των συνθέσεων που παρασκευάστηκαν.



**Εικόνα 2.4.** Πρέσα με την οποία προσδιορίστηκαν οι καμπτικές (α) και οι θλιπτικές (β) αντοχές των συνθέσεων που παρασκευάστηκαν.

Η αφαίρεση του καλουπιού γίνεται ύστερα από 2 ημέρες, όπου και το πρώτο από τα τρία σκληρυμένα δείγματα, της συγκεκριμένης σύνθεσης, υποβάλλεται στη δοκιμή προσδιορισμού της καμπτικής και της θλιπτικής αντοχής του σε πρέσα μάρκας Hurrpert, **Εικόνα 2.4.** Τα δύο επόμενα δείγματα της σύνθεσης υποβάλλονται στη δοκιμή στις 7 και στις 28 ημέρες από την παρασκευή τους, αντίστοιχα. Οι δοκιμές αντοχών σε θλίψη και σε κάμψη πραγματοποιούνται με βάση το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN 1015.11, 1999 [35].

#### **2.3.1.1.Κωδικοποίηση Συνθέσεων**

Λόγω του όγκου των πειραμάτων αλλά και των διαφοροποιήσεων από σύνθεση σε σύνθεση (περιεκτικότητα % σε filler στην άμμο, περιεκτικότητα σε λούμη, ποσότητα νερού ανάμιξης) γίνεται επιτακτική η κωδικοποίηση των συνθέσεων ώστε η καθεμία από αυτές να γίνεται άμεσα διακριτή. Έτσι, κάθε σύνθεση τη συνοδεύει ένας κωδικός που αποτελείται, από έναν αριθμό ο οποίος υποδηλώνει την περιεκτικότητά της σε filler, ένα γράμμα που υποδηλώνει την περιεκτικότητά της σε λούμη και έναν δείκτη που υποδηλώνει το λόγο w/c.



Τα νούμερα κυμαίνονται από το 1 έως το 8 και κατά σειρά αντιστοιχούν σε 0, 5, 10, 15, 20, 22,5, 25 και 30% περιεκτικότητα σε filler στην άμμο. Όσον αφορά την περιεκτικότητα σε λούμη, το γράμμα a αντιστοιχεί σε 0 ppm λούμης, το γράμμα b σε 10000 ppm λούμης και το γράμμα c σε 50000 ppm λούμης. Ο δείκτης είναι το ακριβές νούμερο του λόγου w/c της κάθε σύνθεσης. Στους **Πίνακες 2.6, 2.8 και 2.10**, όπου καταγράφονται οι ποσότητες των υλικών και του νερού των τριών σειρών συνθέσεων, γίνεται αντιληπτό το νόημα της κωδικοποίησης αυτής.

### **2.3.2. Σταθερό w/c - 1<sup>η</sup> Σειρά Συνθέσεων**

Η πρώτη σειρά αποτελείται από 24 δοκίμια. Αυτά χωρίζονται ανά 8 σύμφωνα με την περιεκτικότητά τους σε λούμη. Τα δοκίμια της πρώτης οκτάδας δεν περιέχουν καθόλου λούμη, της δεύτερης περιέχουν από 2,7 gr (ή 10.000 ppm) και της τρίτης από 13,5 gr (ή 50000 ppm). Τα πειράματα είναι σχεδιασμένα έτσι ώστε ο λόγος w/c να είναι σταθερός σε όλα τα μίγματα ίδιος και ίσος με 0,5. Ως εκ τούτου κάθε ανάμιγμα παρασκευάστηκε με ίδιες ποσότητες νερού και τσιμέντου αντίστοιχα, 540 gr τσιμέντου CEM I 42,5 και 270 gr νερού, ενώ η συνολική περιεχόμενη άμμος σε κάθε δείγμα είναι 1156,5 gr.

Τα δοκίμια της κάθε οκτάδας διαφέρουν μεταξύ τους ως προς την περιεκτικότητα του filler στην άμμο. Έτσι η περιεκτικότητα (% w/w) του κάθε δοκιμίου σε filler στην άμμο είναι κατά αύξουσα τιμή 0, 5, 10, 15, 20, 22,5, 25 και 30% αντίστοιχα. Στον **Πίνακα 2.6** φαίνονται αναλυτικά οι περιεκτικότητες των πρώτων υλών σε κάθε σύνθεση, ενώ στον **Πίνακα 2.7** δίνονται αναλυτικά τα αποτελέσματα της εξάπλωσης και των καμπτικών και θλιπτικών αντοχών της κάθε σύνθεσης της σειράς 1.

Πίνακας 2.6.Σχεδιασμός Πειραμάτων, Σειρά 1(σταθερό w/c 0,5– διαφορετική εξάπλωση)

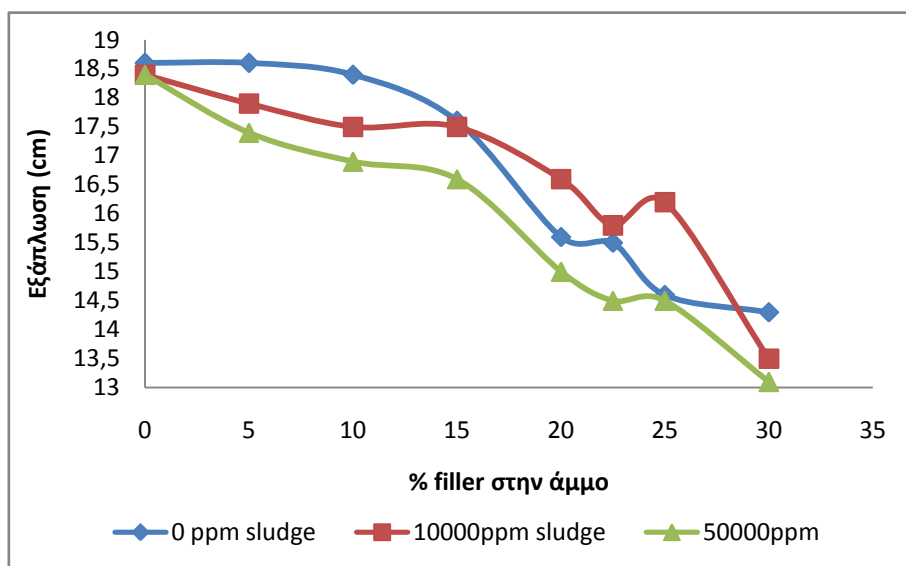
a/a	% filler στην άμμο	ppm λούμης στο νερό	gr ξηρής λούμης στο ανάμιγμα	gr filler άμμου στο ανάμιγμα	gr χονδρόκοκκης άμμου στο ανάμιγμα	gr τσιμέντου στο ανάμιγμα	gr νερού στο ανάμιγμα
1a <sub>0,5</sub>	0	0	0	0	1156,5	540	270
2a <sub>0,5</sub>	5	0	0	57,8	1098,7	540	270
3a <sub>0,5</sub>	10	0	0	115,6	1040,9	540	270
4a <sub>0,5</sub>	15	0	0	173,5	983,0	540	270
5a <sub>0,5</sub>	20	0	0	231,2	925,3	540	270
6a <sub>0,5</sub>	22,5	0	0	260,2	896,3	540	270
7a <sub>0,5</sub>	25	0	0	289,1	867,4	540	270
8a <sub>0,5</sub>	30	0	0	347	809,5	540	270
1b <sub>0,5</sub>	0	10.000	2,7	0	1156,5	540	270
2b <sub>0,5</sub>	5	10.000	2,7	57,8	1098,7	540	270
3b <sub>0,5</sub>	10	10.000	2,7	115,6	1040,9	540	270
4b <sub>0,5</sub>	15	10.000	2,7	173,5	983,0	540	270
5b <sub>0,5</sub>	20	10.000	2,7	231,2	925,3	540	270
6b <sub>0,5</sub>	22,5	10.000	2,7	260,2	896,3	540	270
7b <sub>0,5</sub>	25	10.000	2,7	289,1	867,4	540	270
8b <sub>0,5</sub>	30	10.000	2,7	347	809,5	540	270
1c <sub>0,5</sub>	0	50.000	13,5	0	1156,5	540	270
2c <sub>0,5</sub>	5	50.000	13,5	57,8	1098,7	540	270
3c <sub>0,5</sub>	10	50.000	13,5	115,6	1040,9	540	270
4c <sub>0,5</sub>	15	50.000	13,5	173,5	983,0	540	270
5c <sub>0,5</sub>	20	50.000	13,5	231,2	925,3	540	270
6c <sub>0,5</sub>	22,5	50.000	13,5	260,2	896,3	540	270
7c <sub>0,5</sub>	25	50.000	13,5	289,1	867,4	540	270
8c <sub>0,5</sub>	30	50.000	13,5	347	809,5	540	270

Πίνακας 2.7. Εξάπλωση, Αντοχές σε Κάμψη και Θλίψη Δοκιμίων Σειράς 1 (σταθερό w/c 0,5– διαφορετική εξάπλωση).

a/a	% filler	w/c	Εξάπλωση (cm)	2 Ημέρες		7 Ημέρες		28 Ημέρες	
				Κάμψη (MPa)	Θλίψη (MPa)	Κάμψη (MPa)	Θλίψη (MPa)	Κάμψη (MPa)	Θλίψη (MPa)
1a <sub>0,5</sub>	0	0,5	18,6	5,01	29,40	7,5	46,35	7,87	54,40
2a <sub>0,5</sub>	5	0,5	18,6	5,17	30,60	7,5	46,95	7,44	55,70
3a <sub>0,5</sub>	10	0,5	18,4	5,67	34,20	7,67	49,75	6,34	59,90
4a <sub>0,5</sub>	15	0,5	17,6	5,88	35,80	7,09	49,30	6,44	60,40
5a <sub>0,5</sub>	20	0,5	15,6	5,76	36,40	6,59	48,93	7,07	59,50
6a <sub>0,5</sub>	22,5	0,5	15,5	5,71	34,97	6,36	47,58	6,97	55,80
7a <sub>0,5</sub>	25	0,5	14,6	5,22	35,45	6,41	49,03	6,41	56,75
8a <sub>0,5</sub>	30	0,5	14,3	5,44	35,90	6,25	49,15	5,9	56,15
1b <sub>0,5</sub>	0	0,5	18,4	4,79	29,52	6,23	44,75	6,54	57,58
2b <sub>0,5</sub>	5	0,5	17,9	5,48	33,42	6,2	45,40	6,62	58,70
3b <sub>0,5</sub>	10	0,5	17,5	5,70	33,86	5,91	46,70	7,11	58,55
4b <sub>0,5</sub>	15	0,5	17,5	5,56	33,97	5,63	47,55	6,58	57,50
5b <sub>0,5</sub>	20	0,5	16,6	5,57	37,65	6,89	52,30	7,12	60,50
6b <sub>0,5</sub>	22,5	0,5	15,8	5,92	34,90	6,21	50,50	7,57	57,90
7b <sub>0,5</sub>	25	0,5	16,2	5,38	34,95	5,78	47,80	6,56	55,60
8b <sub>0,5</sub>	30	0,5	13,5	5,8	38,10	6,89	53,15	6,82	61,70
1c <sub>0,5</sub>	0	0,5	18,4	5,59	29,50	6,12	43,60	6,81	56,00
2c <sub>0,5</sub>	5	0,5	17,4	5,41	32,00	6,58	47,90	8,31	56,30
3c <sub>0,5</sub>	10	0,5	16,9	5,21	33,30	6,76	47,55	7,04	56,65
4c <sub>0,5</sub>	15	0,5	16,6	5,52	36,10	6,7	48,05	6,21	56,60
5c <sub>0,5</sub>	20	0,5	15	4,6	35,15	6,25	48,30	6,05	58,55
6c <sub>0,5</sub>	22,5	0,5	14,5	5,11	37,15	6,25	51,50	6,75	51,85
7c <sub>0,5</sub>	25	0,5	14,5	5,1	33,55	6,09	47,85	6,00	56,45
8c <sub>0,5</sub>	30	0,5	13,1	5,54	36,55	6,13	48,00	5,91	49,90

Όπως φαίνεται από τον **Πίνακα 2.7** και από το **Διάγραμμα 2.6** η προσθήκη παιπάλης στο μίγμα οδηγεί γενικά σε μείωση της εξάπλωσης άρα και της εργασιμότητας. Η τάση αυτή είναι αρκετά ξεκάθαρη για τις αυξήσεις της περιεκτικότητας του filler. Επίσης, μείωση της εξάπλωσης παρατηρείται και για αύξηση της περιεκτικότητας της λούμης. Μία διαφοροποίηση παρατηρείται για τις εξαπλώσεις των συνθέσεων που περιέχουν 2,7 gr λούμης (10000 ppm) και filler παραπάνω από 20%, εκεί παρατηρούνται υψηλότερες εξαπλώσεις από ότι των αντίστοιχων συνθέσεων χωρίς λούμη. Αυτού του είδους οι διαφοροποιήσεις εμπίπτουν εντός των ορίων σφάλματος της συγκεκριμένης δοκιμής.

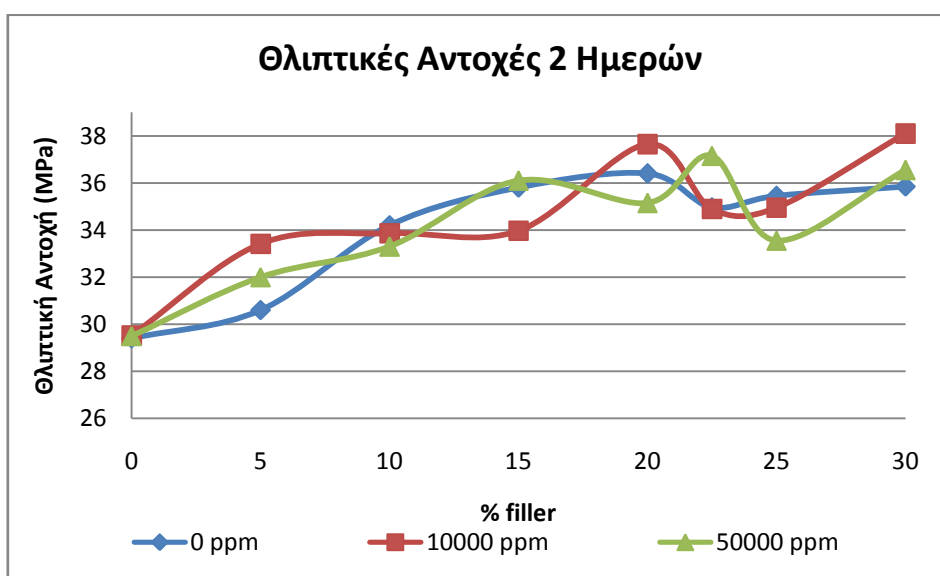
Βέβαια, τα δοκίμια, τα οποία περιέχουν περιεκτικότητες filler από 20% και πάνω, παρουσιάζουν μεγάλο ενδιαφέρον ως προς τις αντοχές τους όπως θα αναλυθεί και παρακάτω, ωστόσο οι εξαπλώσεις τους είναι πολύ χαμηλές πράγμα που υποδηλώνει και πολύ χαμηλή εργασιμότητα που μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την μη ικανοποιητική μίξη των πρώτων υλών άρα και την ανομοιογένεια των εν λόγω κονιαμάτων.



**Διάγραμμα 2.6.** Διάγραμμα εξάπλωσης- περιεκτικότητα %filler στην άμμο, πρώτη σειρά δοκιμών.

Στο **Διάγραμμα 2.7** παρατίθεται η συσχέτιση των θλιπτικών αντοχών 2 ημερών και της περιεκτικότητας % σε filler, για 0, 10000 και 50000 ppm λούμης. Και στις τρεις καμπύλες γίνεται αντιληπτό ότι με την αύξηση σε filler υπάρχει μία σαφής τάση αύξησης των θλιπτικών αντοχών. Στην καμπύλη που αφορά συνθέσεις που δεν περιέχουν καθόλου λούμη φαίνεται πως για 20% filler η θλιπτική αντοχή αποτελεί την μέγιστη τιμή ενώ, για 22,5, 25 και 30% φαίνεται πως οι αντοχές πέφτουν σχετικά. Όσο αφορά τις συνθέσεις που περιέχουν 10000 ppm λούμης παρατηρείται πως η τάση ανόδου των αντοχών είναι αρκετά μεγάλη από 0 έως 5% περιεκτικότητας filler. Στη συνέχεια, για 5, 10 και 15% σε filler, οι θλιπτικές αντοχές παραμένουν σχεδόν σταθερές γύρω στα 34,50 MPa, ενώ από 15 έως 20% σε filler είναι φανερό και πάλι η ανοδική τάση των θλιπτικών αντοχών. Για περιεκτικότητα 20% filler παρουσιάζεται και ένα τοπικό μέγιστο στα 37,25 MPa. Επίσης για 22,5 και 25% περιεκτικότητα σε filler παρατηρείται μία πτώση των αντοχών ενώ για 30% μία πολύ μεγάλη αύξηση. Στις συνθέσεις που περιείχαν 50000 ppm φαίνεται πως η ανοδική τάση των θλιπτικών αντοχών συνεχίζει μέχρι περιεκτικότητας 22,5% σε filler.

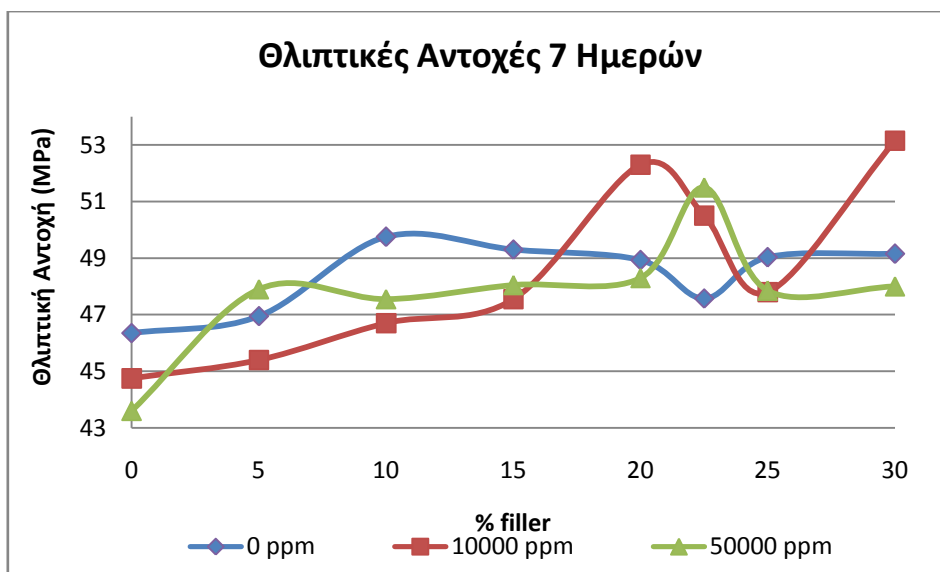
Από τη γενική εικόνα του **Διαγράμματος 2.7** φαίνεται πως η λούμη δεν επηρεάζει τις πρώιμες θλιπτικές αντοχές. Θα μπορούσε να παρατηρηθεί ότι μία περιεκτικότητα σε filler γύρω στο 20% και λούμης 10000 rpm δίνει τις υψηλότερες αντοχές διότι συνδυάζει ικανοποιητική εργασιμότητα, όπως συμπεραίνεται από τις τιμές της εξάπλωσης (**Διάγραμμα 2.6**), και μία αρκετά ικανοποιητική περιεκτικότητα σε ασβεστολιθική παιπάλη που δρα ευεργετικά για τις αντοχές. Ωστόσο, υψηλές τιμές αντοχών βρέθηκαν και για περιεκτικότητες σε filler 30 % και λούμης 10000 και 50000 rpm αντίστοιχα. Όμως λόγω της ελλιπούς εργασιμότητας και της υπερβολικής περιεκτικότητας λεπτόκοκκων υλικών, οι τιμές αυτές αποδίδονται σε ανομοιογένεια του υλικού.



**Διάγραμμα 2.7.** Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Θλιπτικών αντοχών 2 ημερών - % filler συνθέσεων σειράς 1.

Ανοδική τάση των αντοχών με αύξηση της περιεκτικότητας σε filler, όμοια με αυτή των δύο ημερών, παρατηρείται και στις θλιπτικές αντοχές των 7 ημερών, **Διάγραμμα 2.8**. Στις συνθέσεις που δεν περιέχουν λούμη η τάση αύξησης των αντοχών είναι έντονη μέχρι και τη σύνθεση με περιεκτικότητα 10 % σε filler, ενώ για συνθέσεις υψηλότερης περιεκτικότητας σε filler η τάση αυτή εξομαλύνεται.

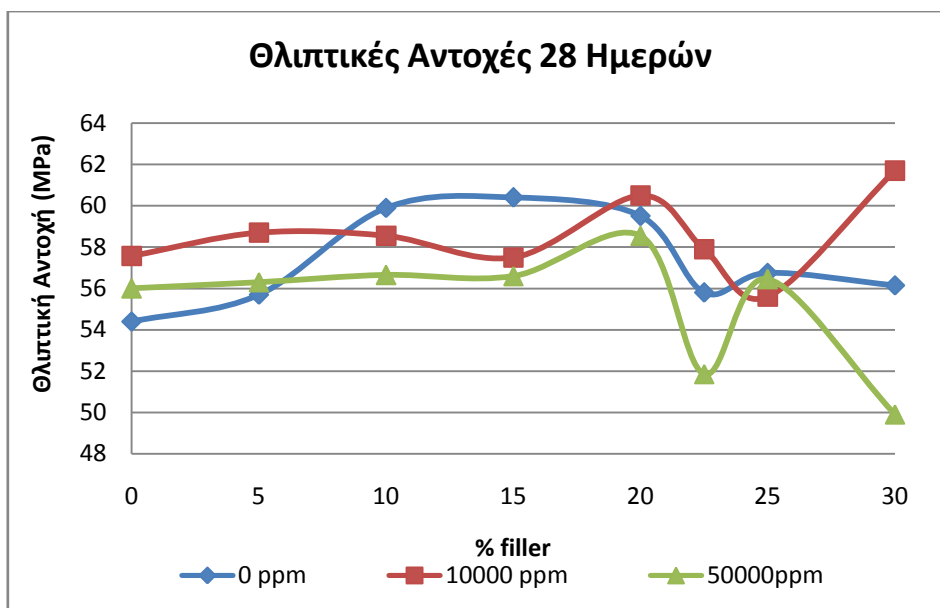
Για τις συνθέσεις που περιέχουν 10000 rpm λούμης φαίνεται πως η τάση ανάπτυξης θλιπτικών αντοχών 7 ημερών ακολουθεί, γενικά, την πορεία που ακολουθεί και το διάγραμμα των δύο ημερών. Η τιμή της θλιπτικής αντοχής 7 ημερών για 20% περιεκτικότητας filler, εκτός ότι παρουσιάζει ένα τοπικό μέγιστο, είναι υψηλότερη από κάθε τιμή των καμπυλών τόσο των 0 rpm όσο και των 50000 rpm. Ένα παρόμοιο αποτέλεσμα απεικονίζεται και στο **Διάγραμμα 2.7** (2 ημερών), αλλά στις 7 ημέρες (**Διάγραμμα 2.8**) η τιμή αυτή παρουσιάζεται αρκετά υψηλότερη σε σχέση με τις άμεσα συγκρινόμενες τιμές. Για της περιεκτικότητες που ακολουθούν (22,5 και 25 % filler) παρατηρείται μία πτώση των αντοχών, ενώ για 30 % η τιμή της θλιπτικής αντοχής είναι υπερβολικά υψηλή, κάτι που μπορεί να αποδοθεί και εδώ σε ανομοιογένεια του υλικού.



**Διάγραμμα 2.8.** Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Θλιπτικών αντοχών 7 ημερών - % filler συνθέσεων σειράς 1.

Για τις συνθέσεις που περιέχουν 50000 ppm λούμης η τιμή της θλιπτικής αντοχής, για περιεκτικότητα 5 % , είναι αρκετά υψηλότερη από αυτή που αφορά περιεκτικότητα 0 % . Μάλιστα η συγκεκριμένη τιμή, συγκρινόμενη με τις αντίστοιχες θλιπτικές αντοχές (των συνθέσεων περιεκτικότητας 5 % filler) για 0 ppm και 10000 ppm λούμης, είναι υψηλότερη. Εδώ ένα σχόλιο που μπορεί να γίνει είναι πως για χαμηλή περιεκτικότητα σε filler (5%) η λούμη , ως ασβεστολιθικό υλικό, μπορεί να υποκαταστήσει τον ευεργετικό, για τις θλιπτικές αντοχές, ρόλο του filler. Οι τιμές θλιπτικών αντοχών, για 5, 10, 15 και 20% περιεκτικότητας σε filler, είναι πολύ κοντά. Για τη σύνθεση περιεκτικότητας 22,5 % σε filler παρατηρείται αύξηση της θλιπτικής αντοχής και ένα τοπικό μέγιστο. Το αποτέλεσμα είναι πολύ ενδιαφέρον αλλά υπάρχουν επιφυλάξεις σχετικά με την αξιολόγησή του για λόγους που έχουν αναφερθεί και παραπάνω (ανομοιογένεια που οφείλεται σε ελλιπή εργασιμότητα και σε υπερβολική περιεκτικότητα λεπτόκοκκων υλικών). Άλλωστε, η εξάπλωση της συγκεκριμένης σύνθεσης είναι χαμηλή (14,5 cm).

Οι γενική εικόνα των τριών καμπυλών του **Διαγράμματος 2.8** , με τις τρεις καμπύλες να βρίσκονται σε αρκετά σημεία η μία υπεράνω της άλλης όπως επίσης και να εφάπτονται, μας οδηγεί στο γενικό συμπέρασμα πως η περιεκτικότητα σε λούμη δεν επηρεάζει σε σημαντικό βαθμό τις θλιπτικές αντοχές, όπως ειπώθηκε και παραπάνω. Βέβαια, ένα ποιοτικό σημείο διαφοροποίησης του **Διαγράμματος 2.8** από το **Διάγραμμα 2.7** είναι, πως στις αντοχές των 7 ημερών, βρέθηκαν σαφέστατα υψηλές τιμές θλιπτικών αντοχών για 10000 και για 50000 ppm λούμης, όπως και προαναφέρθηκε. Όσο αφορά την μείωση των αντοχών που παρατηρούνται, για 22,5 και 25 %filler στην καμπύλη των 10000 ppm καθώς και για 25 % και 30 % στην καμπύλη των 50000 ppm, οφείλονται στην υπερβολική περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα υλικά και στην ελλιπή εργασιμότητα. Τέλος, η υπερβολικά υψηλή θλιπτική αντοχή για την σύνθεση περιεκτικότητας 30% filler και 10000 ppm λούμης οφείλονται στην ανομοιογένεια του υλικού σύμφωνα με όσα έχουν αναφερθεί, σε αρκετά σημεία, παραπάνω.



**Διάγραμμα 2.9.** Συγκεντρωτικό Διάγραμμα Θλιπτικών αντοχών 28 ημερών-%filler συνθέσεων σειράς 1.

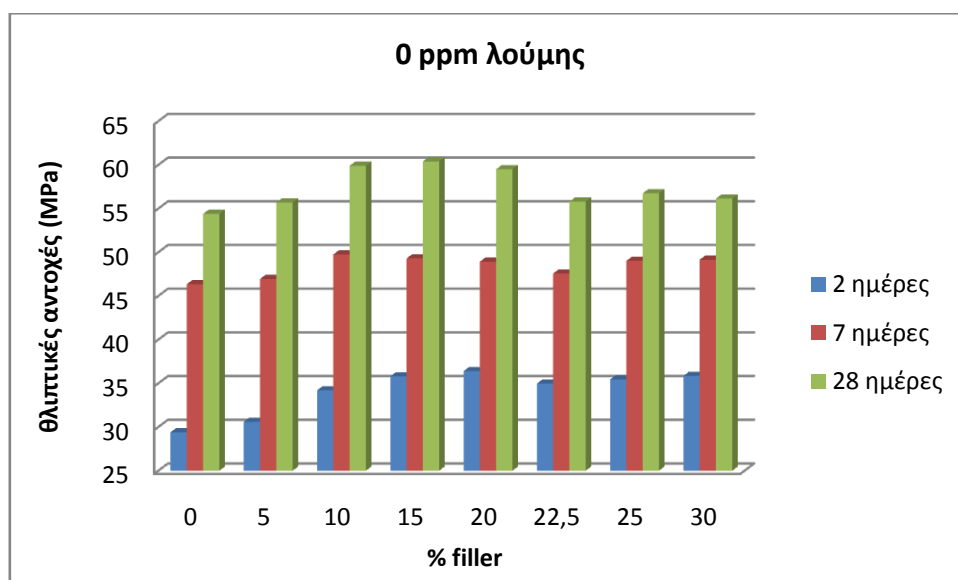
Όσον αφορά τις αντοχές των 28 ημερών, **Διάγραμμα 2.9**, φαίνεται ότι η αυξητική τάση των θλιπτικών αντοχών με την αύξηση της περιεκτικότητας σε filler δεν είναι τόσο έντονη όσο είναι για τις 2 και τις 7 ημέρες. Ένα πρώτο σχόλιο λοιπόν πάνω σε αυτό το αποτέλεσμα είναι πως η αύξηση της περιεκτικότητας σε filler ενισχύει πολύ τις πρώιμες ( 2 ημερών) και μέσες (7 ημερών) αντοχές και όχι τόσο πολύ τις ύστερες (28 ημερών). Φαίνεται ξεκάθαρα τόσο στη καμπύλη των συνθέσεων για 10000 ppm λούμης όσο και στη καμπύλη για 50000 ppm λούμης, πως για 0 έως και 15 % περιεκτικότητα σε filler οι θλιπτικές αντοχές είναι πολύ κοντά. Στην καμπύλη των συνθέσεων που δεν περιέχουν λούμη, η αυξητική τάση των αντοχών είναι, έως και για 10% filler, πιο έντονη. Μάλιστα η θλιπτική αντοχή για τη σύνθεση που δεν περιέχει καθόλου filler βρίσκεται πιο χαμηλά από ότι οι αντίστοιχες θλιπτικές αντοχές για περιεκτικότητες 10000 και 50000 ppm. Άρα, μπορεί να ειπωθεί πως όταν δεν περιέχεται καθόλου filler στην άμμο, τότε η περιεκτικότητα σε λούμη βοηθάει την ανάπτυξη των ύστερων αντοχών.

Αξιοσημείωτο είναι επίσης, πως στο **Διάγραμμα 2.9** και για περιεκτικότητες filler 10 και 15 %, η καμπύλη περιεκτικότητας 50000 ppm σε λούμη βρίσκεται κάτω από αυτή που έχει σχεδιαστεί για τις συνθέσεις που περιέχουν 10000 ppm λούμης και αυτή με τη σειρά της βρίσκεται κάτω από την καμπύλη των συνθέσεων που δεν περιέχουν λούμη. Φαίνεται λοιπόν πως για αυτήν τη περιοχή (περιεκτικότητας σε filler) η προσθήκη λούμης επιδεινώνει ελαφρώς την ανάπτυξη ύστερων θλιπτικών αντοχών. Εξάιρεση αποτελεί η θλιπτική αντοχή της σύνθεσης που περιέχει 20 % filler και 10000 ppm λούμης που είναι ελαφρώς πιο υψηλή από τις αντίστοιχες τιμές των άλλων δύο καμπυλών, ενδεχομένως, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω από τον σχολιασμό των άλλων δύο διαγραμμάτων, η περιεκτικότητα της συγκεκριμένης σύνθεσης σε ασβεστολιθική παυπάλη (περιεκτικότητα λούμης και filler) να οδηγεί στις βέλτιστες θλιπτικές αντοχές.

Επίσης είναι φανερό πως οι μέγιστη ύστερη αντοχή (28 ημερών) για την καμπύλη των συνθέσεων που δεν περιέχει λούμη βρίσκεται στη σύνθεση 15 % περιεκτικότητας σε filler, ενώ για τις άλλες δύο καμπύλες ευρίσκεται για περιεκτικότητα 20 % σε filler. Για τις τιμές που αφορούν συνθέσεις από 22,5 % περιεκτικότητας σε filler και πάνω ισχύουν όσα έχουν αναφερθεί στον σχολιασμό των προηγούμενων διαγραμμάτων.

Στο **Διάγραμμα 2.10** φαίνονται υπό τύπου ραβδογράμματος όλες οι θλιπτικές αντοχές 2, 7 και 28 ημερών των συνθέσεων που δεν περιέχουν λούμη. Είναι φανερό πως η υψηλότερη τιμή θλιπτικής αντοχής 7 ημερών εμφανίζεται για μία σχετικά χαμηλή περιεκτικότητα σε filler, 10%, σε αντίθεση με την μέγιστη αντοχή των 2 ημερών όπου η μέγιστη αντοχή παρατηρείται για περιεκτικότητα 20% σε filler. Επίσης η μέγιστη θλιπτική αντοχή 28 ημερών σημειώνεται στη σύνθεση που έχει 15% περιεκτικότητα σε filler. Ένα συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από αυτά τα αποτελέσματα είναι πως μία μεγάλη περιεκτικότητα σε filler (20%) συμβάλει πιο πολύ στην ανάπτυξη πρώιμων αντοχών (2 ημερών), ενώ μία περιεκτικότητα σε filler (10%) συμβάλει κυρίως στην ανάπτυξη των μέσων αντοχών (7 ημερών). Επίσης μία περιεκτικότητα σε filler 15%, που είναι και η συνήθεις περιεκτικότητα filler στην άμμο, συντελεί κυρίως στην ανάπτυξη ύστερων αντοχών (28 ημερών).

Επίσης εύκολα μπορεί να παρατηρήσει κανείς για τις θλιπτικές των 28 ημερών πως οι αντοχές έχουν μία ξεκάθαρη τάση αύξησης με την προσθήκη του filler, μέχρι και περιεκτικότητας 15% σε filler, και ύστερα με περαιτέρω προσθήκη filler οι θλιπτικές αντοχές μειώνονται. Αυτή η πτωτική τάση των αντοχών μπορεί να αποδοθεί στην υψηλή περιεκτικότητα των λεπτόκοκκων υλικών που οδηγεί στη μείωση της εργασιμότητας.

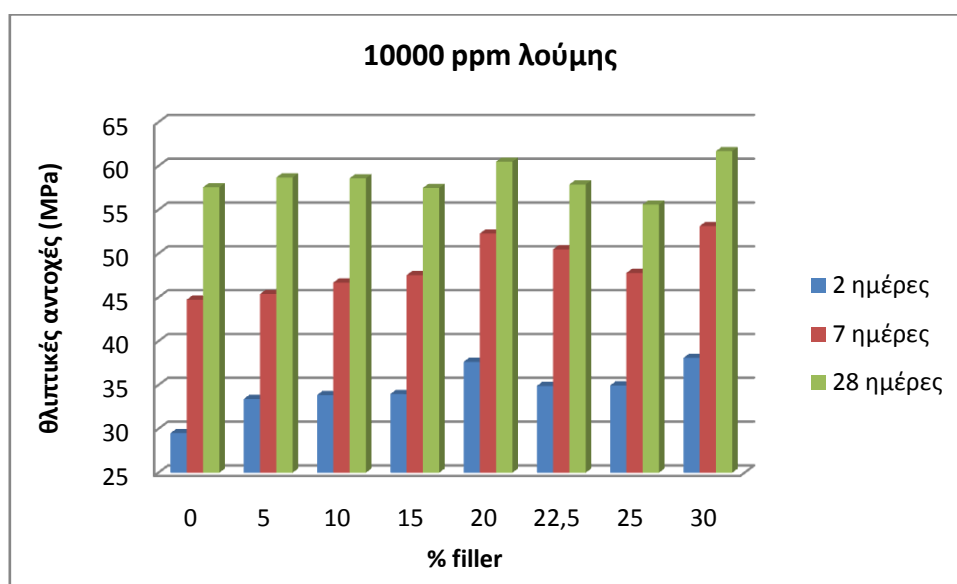


**Διάγραμμα 2.10.** Ραβδόγραμμα Θλιπτικών αντοχών-% filler για συνθέσεις χωρίς λούμη Σειράς 1, Αντοχές 2, 7 και 28 ημερών.

Στο **Διάγραμμα 2.11** φαίνονται υπό τύπου ραβδογράμματος όλες οι θλιπτικές αντοχές 2, 7 και 28 ημερών των συνθέσεων που η περιεκτικότητά τους σε λούμη είναι 10000 ppm. Η

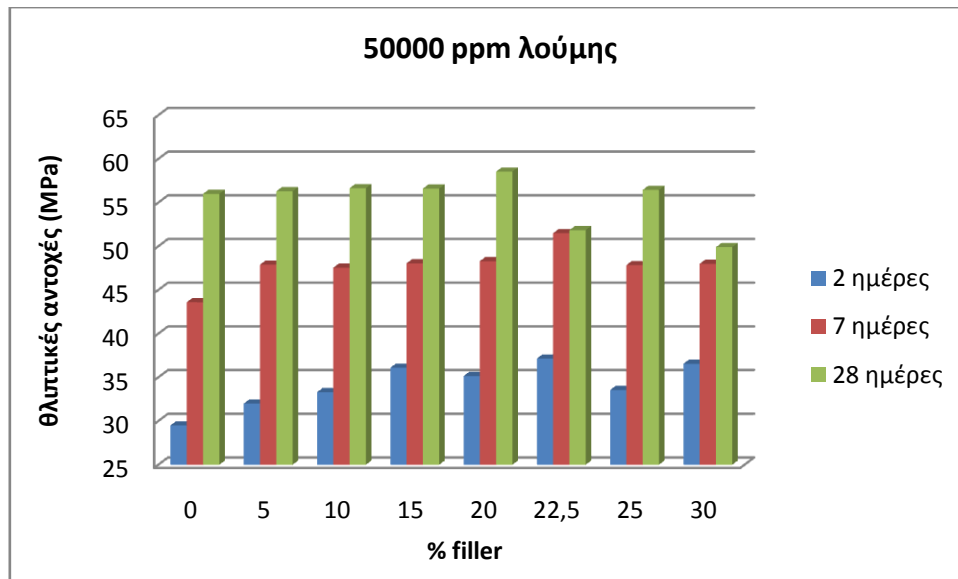


μέγιστες θλιπτικές αντοχές 2, 7 και 28 ημερών παρατηρούνται για περιεκτικότητας 20 % και 30 % filler. Επειδή στη σύνθεση που περιέχει 30 % filler η εργασιμότητα, λόγω της υπερβολικής περιεκτικότητας filler, δεν κρίνεται καθόλου ικανοποιητική (εξάπλωση 13,5 cm), πιθανότατα το υλικό να είναι αρκετά ανομοιογενές και δεν μπορεί να αξιολογηθεί. Ωστόσο, η σύνθεση που η περιεκτικότητα σε filler είναι 20 % η εργασιμότητα είναι αρκετά ικανοποιητική (εξάπλωση 16,6 cm). Επίσης σε αυτήν την σύνθεση οι αντοχές, σε όλες τις ηλικίες, ήταν υψηλότερες από κάθε άλλο δοκίμιο της σειράς 1 (**Διαγράμματα 2.7, 2.8 και 2.9**). Επομένως μπορεί να ειπωθεί πως περιεκτικότητα 20% filler στην άμμο και 10000 rpm λούμης οδηγεί στις βέλτιστες αντοχές κονιάματος.



**Διάγραμμα 2.11.** Ραβδόγραμμα Θλιπτικών αντοχών-% filler για συνθέσεις με 10000 rpm λούμης Σειράς 1, Αντοχές 2, 7 και 28 ημερών.

Στο **Διάγραμμα 2.12** φαίνονται υπό τύπου ραβδογράμματος όλες οι θλιπτικές αντοχές 2, 7 και 28 ημερών των συνθέσεων που η περιεκτικότητά τους σε λούμη είναι 50000 rpm. Εδώ η εικόνα δεν είναι ξεκάθαρη. Μέγιστη θλιπτική αντοχή 28 ημερών δίνει η σύνθεση με περιεκτικότητα 20% σε filler. Οι μέγιστες θλιπτική αντοχές 2 και 7 ημερών παρατηρούνται στη σύνθεση με περιεκτικότητα 22,5 % filler. Στην ίδια σύνθεση παρατηρείται πολύ χαμηλή τιμή της θλιπτικής αντοχής των 28 ημερών. Μέγιστο για τις 28 ημέρες παρατηρείται στη σύνθεση με περιεκτικότητα 20% filler. Επίσης, για τις συνθέσεις που περιέχουν filler 22,5% και 30% filler η αύξηση των αντοχών από τις 7 στις 28 ημέρες είναι υπερβολικά μικρή. Σε ένα βαθμό αυτά τα αποτελέσματα μπορούν να αποδοθούν στην υπερβολική περιεκτικότητα των λεπτόκοκκων υλικών στο μίγμα και την ελλιπή εργασιμότητα που οδηγεί στη μεγάλη ανομοιογένεια της σύνθεσης. Έτσι σε αυτές τις περιπτώσεις, τα δοκίμια της ίδιας σύνθεσης μπορεί να διαφέρουν σημαντικά ως προς τη σύσταση έτσι ώστε οι αντοχές που λαμβάνονται στις 2, 7 και 28 ημέρες να μην μπορούν να συσχετιστούν άμεσα.



**Διάγραμμα 2.12.** Ραβδόγραμμα Θλιπτικών αντοχών-% filler για συνθέσεις με 50000 ppm λούμης Σειράς 1, Αντοχές 2, 7 και 28 ημερών.

### 2.3.3. Σταθερή Εξάπλωση - 2<sup>η</sup> Σειρά Συνθέσεων

Στην 1<sup>η</sup> σειρά πειραμάτων μελετήθηκε η επίδραση, στις θλιπτικές αντοχές και στην εξάπλωση, των περιεκτικοτήτων σε filler στην άμμο και σε λούμη. Η δεύτερη σειρά πειραμάτων σχεδιάστηκε με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης των θλιπτικών αντοχών από έναν εξίσου σημαντικό παράγοντα, τον λόγο νερού προς τσιμέντο (w/c). Επίσης, σε αυτή τη σειρά των πειραμάτων θα μελετηθεί η εξάρτηση του w/c τόσο από την περιεκτικότητα σε λούμη όσο και από την περιεκτικότητα σε filler.

**Πίνακας 2.8.** Σχεδιασμός Πειραμάτων, Σειρά 2(σταθερή εξάπλωση 17,25±0,25 cm– διαφορετικό w/c 0,44-0,54).

a/a	% filler στην άμμο	w/c	ppm λούμης στο νερό	gr ξηρής λούμης στο ανάμιγμα	gr filler άμμου στο ανάμιγμα	gr χονδρόκοκκης άμμου στο ανάμιγμα	gr τσιμέντου στο ανάμιγμα	gr νερού στο ανάμιγμα
1a <sub>0,44</sub>	0	0,44	0	0	0	1156,5	540	240
4a <sub>0,49</sub>	15	0,49	0	0	173,5	983,0	540	265
5a <sub>0,51</sub>	20	0,51	0	0	231,2	925,3	540	277
7a <sub>0,54</sub>	25	0,54	0	0	289,1	867,4	540	290
1b <sub>0,44</sub>	0	0,44	10.000	2,7	0	1156,5	540	240
4b <sub>0,49</sub>	15	0,49	10.000	2,7	173,5	983,0	540	265
5b <sub>0,51</sub>	20	0,51	10.000	2,7	231,2	925,3	540	278
7b <sub>0,54</sub>	25	0,54	10.000	2,7	289,1	867,4	540	292

Έτσι λοιπόν, στη δεύτερη σειρά επαναλαμβάνονται τα πιο χαρακτηριστικά πειράματα της πρώτης. Επαναλαμβάνονται συνθέσεις που δεν περιέχουν λούμη και συνθέσεις που περιέχουν 10000 ppm λούμης. Αυτή η σειρά όμως είναι σχεδιασμένη ώστε όλες οι συνθέσεις να παρουσιάζουν την ίδια εργασιμότητα, η συνθήκη αυτή εξασφαλίζεται μέσω της εξάπλωσης (ίδια εξάπλωση συνεπάγεται ίδια εργασιμότητα). Έτσι λοιπόν οι συνθέσεις της 2<sup>ης</sup> σειράς περιέχουν τις ίδιες περιεκτικότητες πρώτων υλών με τις αντίστοιχες συνθέσεις της 1<sup>ης</sup> σειράς, αλλά διαφορετικές περιεκτικότητας σε νερό ανάμιξης ώστε να διατηρηθεί σταθερή η εξάπλωση. Οι περιεκτικότητες σε χονδρόκοκκη άμμο (0,075-4mm) , filler άμμου, τσιμέντου και νερού καθώς και οι λόγοι w/c για κάθε σύνθεση, καταγράφονται στον **Πίνακα 2.8**.

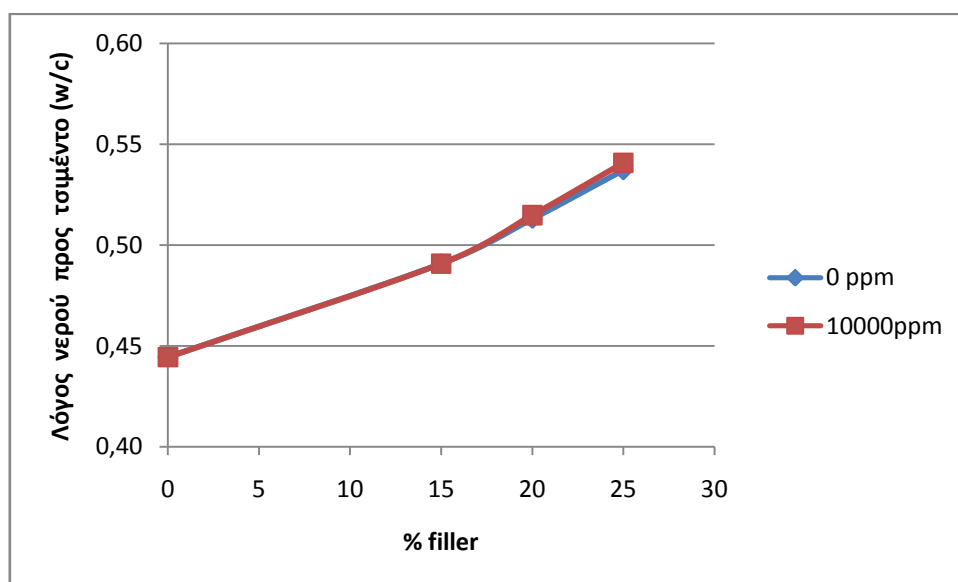
Για να επιτευχθεί η ίδια εξάπλωση σε όλες τις συνθέσεις ακολουθείται συγκεκριμένη μεθοδολογία. Αρχικά επιλέγεται μία θεωρητική επιθυμητή τιμή εξάπλωσης, αυτή είναι 17,25 cm με μία ανεκτή απόκλιση  $\pm 0,25$  cm. Εν συνεχεία, ξεκινώντας από τη σύνθεση που περιέχει τα περισσότερα λεπτόκοκκα υλικά (μικρότερη εξάπλωση), υπολογίζεται εμπειρικά η αύξηση της ποσότητας του νερού ανάμιξης ώστε η εργασιμότητα να βρίσκεται εντός των ορίων της επιθυμητής τιμής. Μετά την ανάμιξη το νωπό κονίαμα υποβάλλεται στη δοκιμή εξάπλωσης. Εάν η τιμή της εξάπλωσης είναι μικρότερη από τα όρια της επιθυμητής τιμής τότε προσθέτονται μερικές σταγόνες νερού στο ανάμιγμα, εάν είναι μεγαλύτερη τότε η σύνθεση πρέπει να παρασκευαστεί εκ νέου. Στη συνέχεια, η ίδια διαδικασία ακολουθείται για όλες τις συνθέσεις.

**Πίνακας 2.9.** Αντοχές σε Κάμψη και Θλίψη Δοκιμών Σειράς 2 (σταθερή εξάπλωση  $17,25 \pm 0,25$  cm– διαφορετικό w/c 0,44-0,54).

a/a	%filler	Νερό (gr)	w/c	Εξάπλωση (cm)	2 Ημέρες		7 Ημέρες		28 Ημέρες	
					Κάμψη (MPa)	Θλίψη (MPa)	Κάμψη (MPa)	Θλίψη (MPa)	Κάμψη (MPa)	Θλίψη (MPa)
1a <sub>0,44</sub>	0	240	0,44	17,4	5,51	33,25	7,41	49,65	6,46	55,10
4a <sub>0,49</sub>	15	265	0,49	17,3	5,58	31,80	6,77	47,55	6,97	54,35
5a <sub>0,51</sub>	20	277	0,51	17,0	4,85	29,25	6,56	43,75	5,8	47,40
7a <sub>0,54</sub>	25	290	0,54	17,2	5,07	28,80	5,85	39,20	6,51	45,25
1b <sub>0,44</sub>	0	240	0,44	17,4	5,4	35,40	7,42	47,10	8,82	64,20
4b <sub>0,49</sub>	15	265	0,49	17,0	5,38	31,50	6,36	45,00	6,96	53,50
5b <sub>0,51</sub>	20	278	0,51	17,0	5,01	29,10	5,18	42,90	6,87	51,05
7b <sub>0,54</sub>	25	292	0,54	17,5	4,75	27,00	5,72	40,75	6,53	48,35

Στον **Πίνακα 2.9** φαίνονται αναλυτικά όλες οι τιμές καμπτικών και θλιπτικών αντοχών των δοκιμών της δεύτερης σειράς. Μία πρώτη αποτίμηση των αποτελεσμάτων αυτών γίνεται στο **Διάγραμμα 2.13** όπου συσχετίζεται ο λόγος νερού προς τσιμέντο w/c με την περιεκτικότητα % σε filler. Πολύ ξεκάθαρα φαίνεται από το διάγραμμα αυτό, πως η καμπύλη των συνθέσεων που δεν περιέχουν λούμη συμπίπτει με την καμπύλη των συνθέσεων που περιέχουν 10000ppm λούμης. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα πως η περιεκτικότητα της λούμης δεν επηρεάζει την εργασιμότητα του νωπού κονιάματος, εφ

όσον δεν χρειάζεται πρόσθετη ποσότητα νερού ανάμιξης στις συνθέσεις που περιέχουν 10000 ppm λούμης ώστε να επιτευχθούν οι ίδιες εξάπλωσεις με τις συνθέσεις που δεν περιέχουν λούμη. Επίσης, αυξανόμενη της περιεκτικότητας % σε filler παρατηρείται σχεδόν γραμμική άνοδος του λόγου w/c, διότι η μεγάλη ποσότητα λεπτόκοκκων υλικών στο ανάμιγμα επηρεάζει αρνητικά την εργασιμότητα, άρα είναι απαραίτητη μεγαλύτερη ποσότητα νερού ανάμιξης για την επίτευξη της επιθυμητής εξάπλωσης.

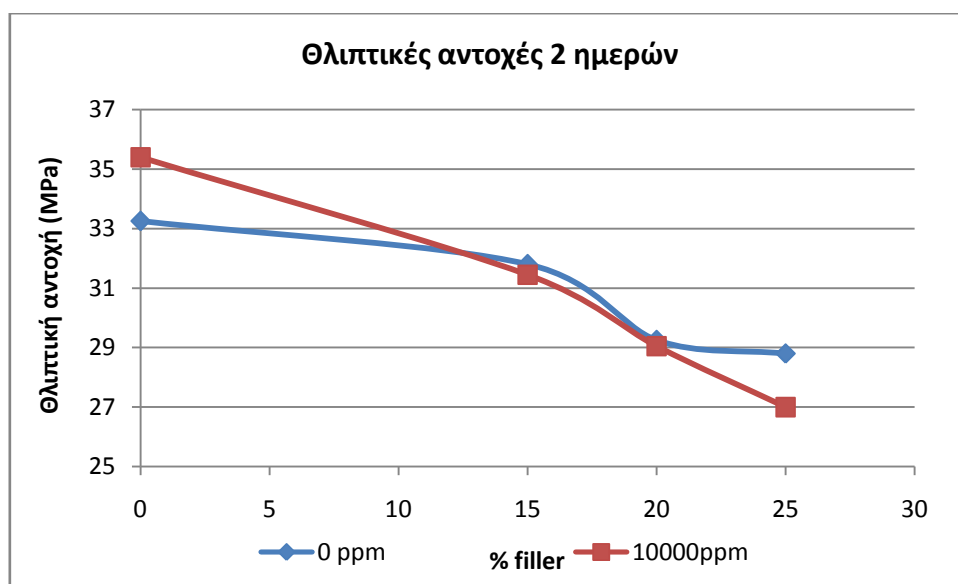


**Διάγραμμα 2.13.** Συσχέτιση λόγου νερού προς τσιμέντο w/c-%filler, συνθέσεις 0 και 10000 ppm λούμης ίδιας εξάπλωσης (17,25±0,25cm).

Η συσχέτιση των πρωίμων θλιπτικών αντοχών με την αύξηση της περιεκτικότητας % σε filler φαίνεται στο **Διάγραμμα 2.14**. Αρχικά φαίνεται ξεκάθαρα η τάση μείωσης των θλιπτικών αντοχών με την αύξηση της περιεκτικότητας % σε filler. Το σχεδόν προφανές συμπέρασμα είναι πως η αύξηση της περιεκτικότητας σε filler οδηγεί σε μείωση των θλιπτικών αντοχών λόγω της αύξησης του λόγου w/c, εδώ μπορεί να γίνει επίκληση στον A.Neville όπου σε σχετική βιβλιογραφία του αναφέρει εκτενώς για την εξάρτηση των θλιπτικών αντοχών από τον λόγο w/c [5, 6].

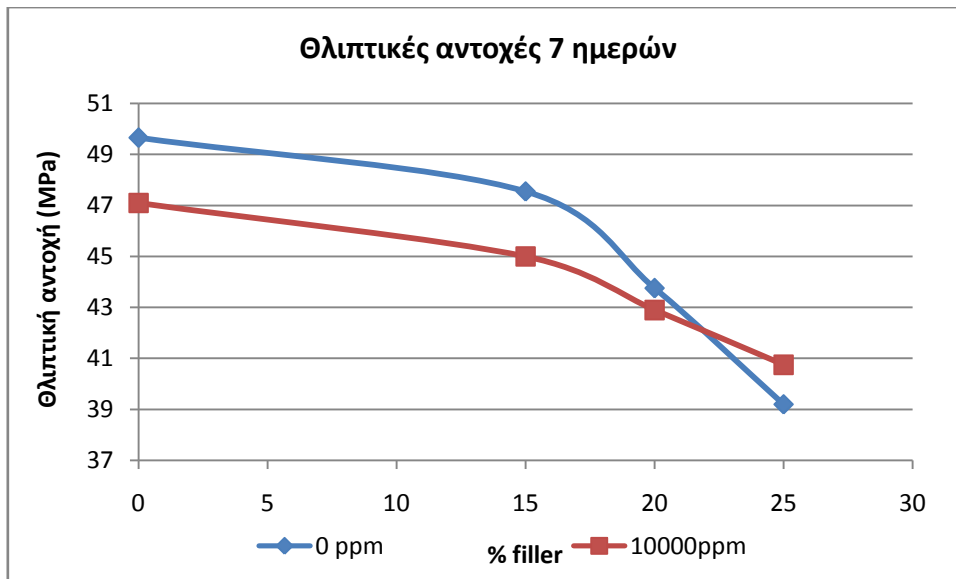
Για περιεκτικότητα 0 % σε filler, στο ίδιο διάγραμμα, φαίνεται πως η θλιπτική αντοχή της σύνθεσης που περιέχει 10000 ppm λούμης είναι υψηλότερη από αυτή που δεν περιέχει λούμη. Εδώ ενισχύεται το συμπέρασμα που εξήχθηκε στον σχολιασμό της σειράς 1, δηλαδή πως όταν απουσιάζει το filler από την άμμο, η λούμη, η οποία είναι επίσης ασβεστολιθικής φύσης, το υποκαθιστά βοηθώντας την ανάπτυξη πρωίμων αντοχών. Για 15 και 20 % περιεκτικότητα σε filler οι τιμές των δύο καμπυλών σχεδόν συμπίπτουν, γεγονός που οδηγεί στο συμπέρασμα, πως σε συνθέσεις, όπου η περιεκτικότητα filler στην άμμο κρίνεται ικανοποιητική, προσθήκη λούμης στην άμμο της τάξης των 10000 ppm δεν φαίνεται να επηρεάζει τις θλιπτικές αντοχές. Για 25 % περιεκτικότητα σε filler η σύνθεση που περιέχει

10000 ppm λούμης παρουσιάζει μικρότερη θλιπτική αντοχή από αυτή που δεν περιέχει, κάτι που πρέπει να διερευνηθεί περαιτέρω.



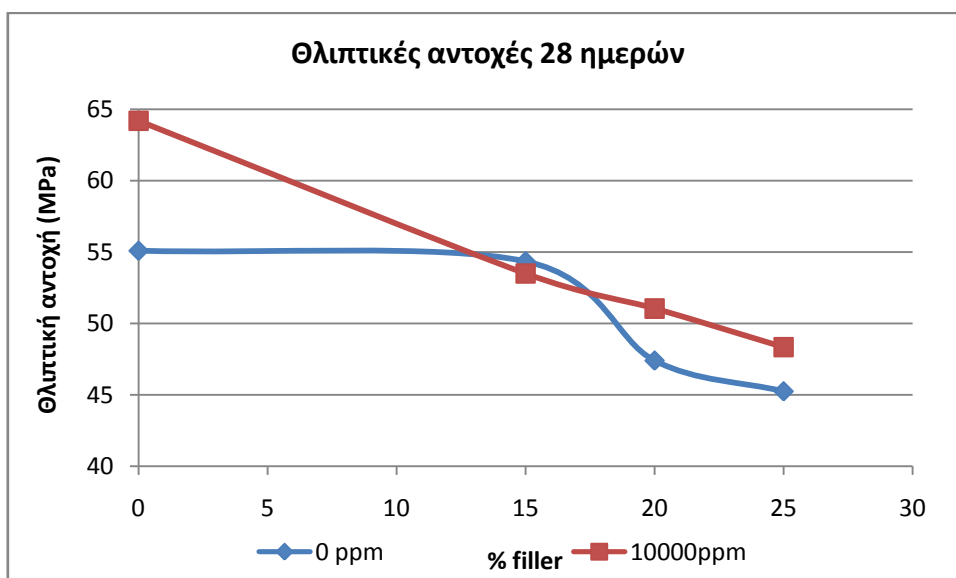
**Διάγραμμα 2.14.** Συσχέτιση θλιπτικών αντοχών 2 ημερών -%filler, συνθέσεις 0 και 10000 ppm λούμης ίδιας εξάπλωσης ( $17,25 \pm 0,25$ cm).

Όσον αφορά τις θλιπτικές αντοχές των 7 ημερών, **Διάγραμμα 2.15**, η εικόνα είναι κάπως διαφορετική. Καταρχήν και εδώ φαίνεται ξεκάθαρα η τάση μείωσης των αντοχών με την αύξηση του filler, επομένως και με την αύξηση του λόγου w/c. Ωστόσο, οι εικόνα σύγκρισης των δύο καμπυλών είναι πιο συγκεχυμένη. Η σύγκριση των δύο συνθέσεων (με 0 και 10000 ppm λούμη) για 0 % filler οδηγεί σε αντίθετα αποτελέσματα σε σχέση με τις θλιπτικές αντοχές των 2 ημερών, δηλαδή για 0 ppm λούμης η θλιπτική αντοχή είναι μεγαλύτερη από αυτή για 10000ppm. Ο σχολιασμός αυτού του αποτελέσματος θα γίνει μαζί με τον σχολιασμό του διαγράμματος των 28 ημερών, ώστε να σχηματιστεί μία πιο καθαρή εικόνα.



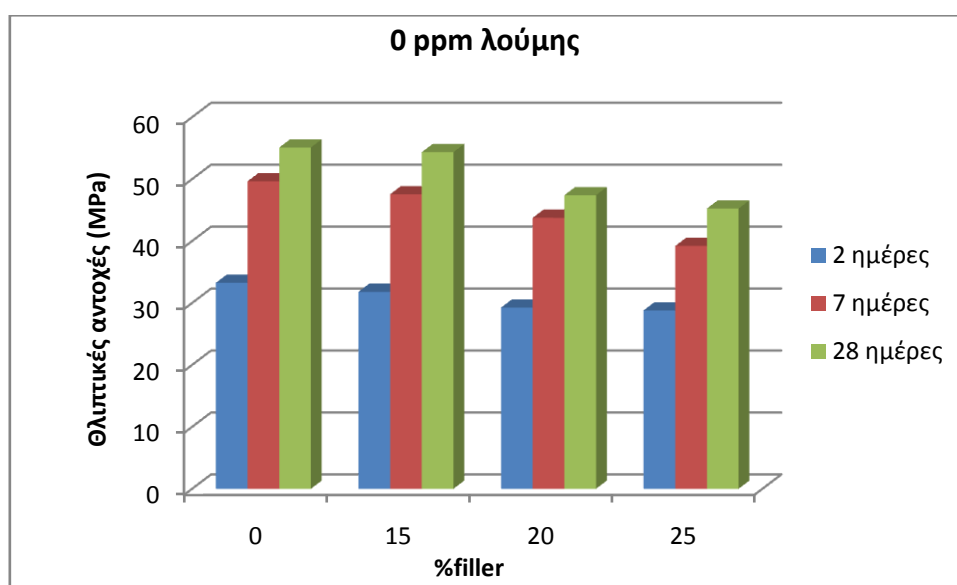
**Διάγραμμα 2.15.** Συσχέτιση θλιπτικών αντοχών 7 ημερών -%filler, συνθέσεις 0 και 10000 ppm λούμης ίδιας εξάπλωσης ( $17,25 \pm 0,25$ cm).

Επίσης, για 15 και 20 % περιεκτικότητα σε filler φαίνεται πως οι θλιπτικές αντοχές των συνθέσεων που δεν περιέχουν λούμη είναι υψηλότερες από αυτές που περιέχουν. Άρα από ότι φαίνεται η παρουσία της λούμης σε αυτές τις συνθέσεις δεν επηρεάζει τις πρώιμες αντοχές (2 ημερών) αλλά επηρεάζει τις μέσες (7 ημερών). Για τις συνθέσεις που περιέχουν 25 % filler οι θλιπτικές αντοχές φαίνεται να αυξάνονται με την παρουσία λούμης.



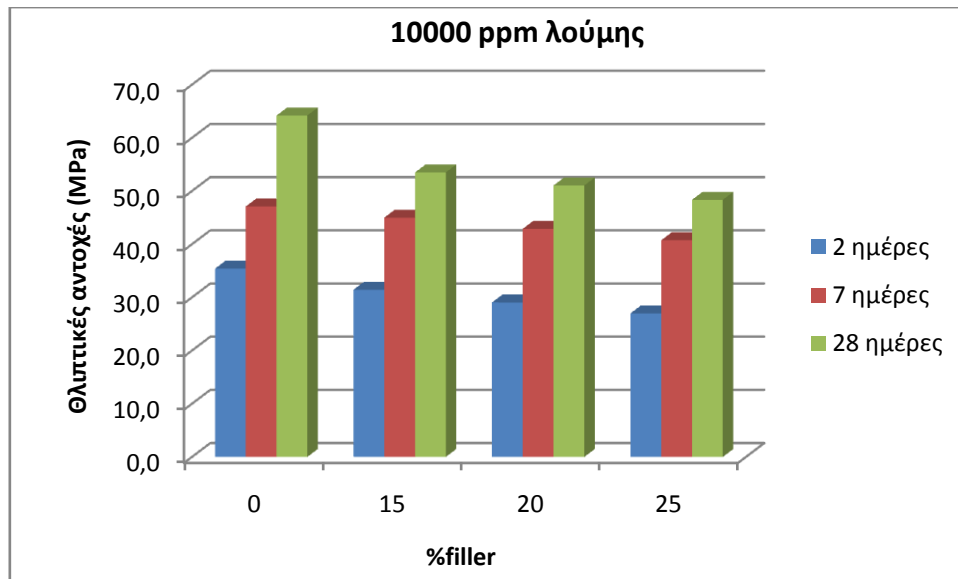
**Διάγραμμα 2.16.** Συσχέτιση θλιπτικών αντοχών 28 ημερών -%filler, συνθέσεις 0 και 10000 ppm λούμης ίδιας εξάπλωσης ( $17,25 \pm 0,25$ cm).

Στο **Διάγραμμα 2.16** συσχετίζονται οι θλιπτικές αντοχές των 28 ημερών με την αύξηση της περιεκτικότητας % σε filler. Και εδώ φαίνεται η τάση πτώσης των θλιπτικών αντοχών με την αύξηση του filler επομένως και με την αύξηση του w/c. Ωστόσο, οι τιμές θλιπτικών αντοχών για τις συνθέσεις που δεν περιέχουν λούμη και η περιεκτικότητα σε filler είναι 0 % και 15% αντίστοιχα είναι πολύ κοντά, κάτι που φαίνεται καθαρά και στο **Διάγραμμα 2.16**. Επίσης, η θλιπτική αντοχή της σύνθεσης που περιέχει 10000 ppm λούμης και καθόλου filler βρίσκεται αρκετά υψηλότερα από την αντίστοιχη θλιπτική αντοχή της σύνθεσης που δεν περιέχει λούμη. Ένα συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί από το γεγονός αυτό, σε σχέση και με τα όσα ειπώθηκαν στο σχολιασμό των δύο προηγούμενων διαγραμμάτων, είναι πως όταν απουσιάζει το filler στην άμμο, η λούμη βοηθάει την ανάπτυξη των πρωίμων και των ύστερων αντοχών, αλλά όχι των μέσων (7 ημερών), γεγονός που παρατηρείται και στην πρώτη σειρά πειραμάτων. Επίσης, για περιεκτικότητα σε filler 15% οι τιμές των δύο αντίστοιχων συνθέσεων είναι σχεδόν ίσες, όπως διαπιστώθηκε και στις καμπύλες των δύο ημερών. Ίσως εδώ κάποιος μπορεί να πει, πως η προσθήκη 10000 ppm λούμης σε κονίαμα όπου η περιεκτικότητα σε filler είναι 15 % επηρεάζει, και μάλιστα αρνητικά, μόνο τις αντοχές των 7 ημερών και όχι των 2 και των 28. Για περιεκτικότητες σε filler 20 και 25 %, οι θλιπτικές αντοχές των συνθέσεων που περιέχουν λούμη είναι υψηλότερες από αυτές που δεν περιέχουν.



**Διάγραμμα 2.17.** Ραβδόγραμμα Θλιπτικών αντοχών-% filler συνθέσεων χωρίς λούμη Σειράς 2 (σταθερή εξάπλωση), Αντοχές 2, 7 και 28 ημερών.

Στα **Διαγράμματα 2.17** και **2.18** δίνονται, υπο τύπου ραβδογράμματος, οι θλιπτικές αντοχές όλων των ηλικιών και όλων των περιεκτικότητων % σε filler των συνθέσεων που δεν περιέχουν λούμη και αυτών που περιέχουν 10000 ppm λούμης αντίστοιχα. Και στα δύο ραβδογράμματα είναι ξεκάθαρη η πτώση των θλιπτικών αντοχών, σε όλες τις ηλικίες, για αύξηση της περιεκτικότητας σε filler, επομένως και για αύξηση του w/c.



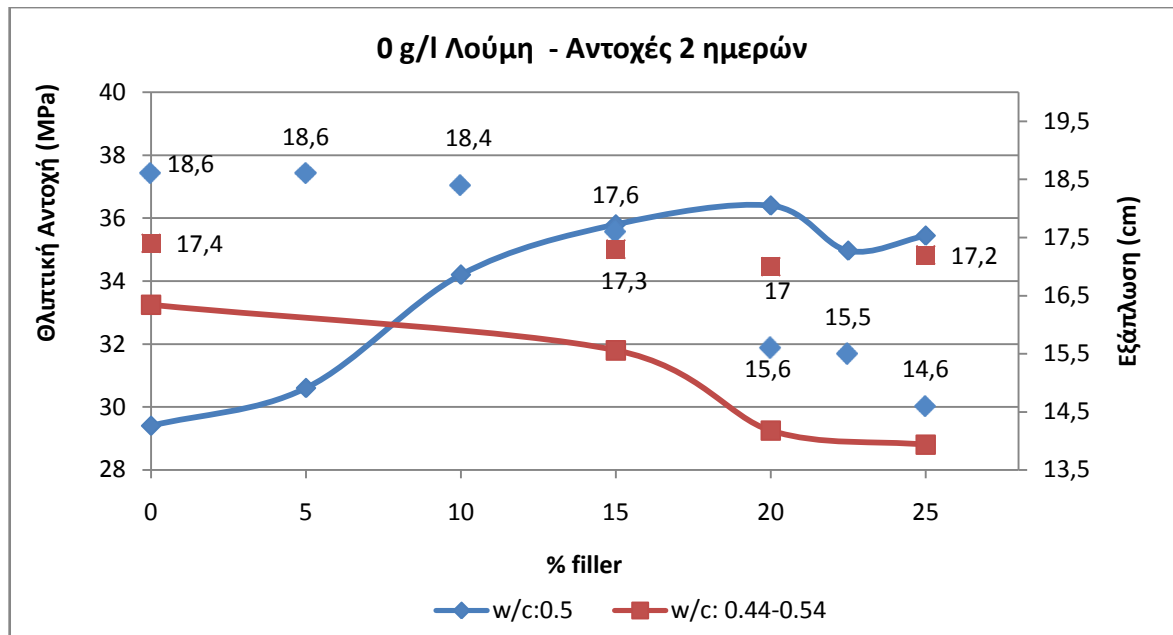
**Διάγραμμα 2.18.** Ραβδόγραμμα Θλιπτικών αντοχών-% filler συνθέσεων περιεκτικότητας 10000 ppm λούμης Σειράς 2(σταθερή εξάπλωση), Αντοχές 2, 7 και 28 ημερών.

#### 2.3.4. Σύγκριση Αποτελεσμάτων 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> Σειράς

Παρακάτω παρατίθενται τα διαγράμματα σύγκρισης των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από τα πειράματα της 1<sup>ης</sup> και της 2<sup>ης</sup> σειράς.

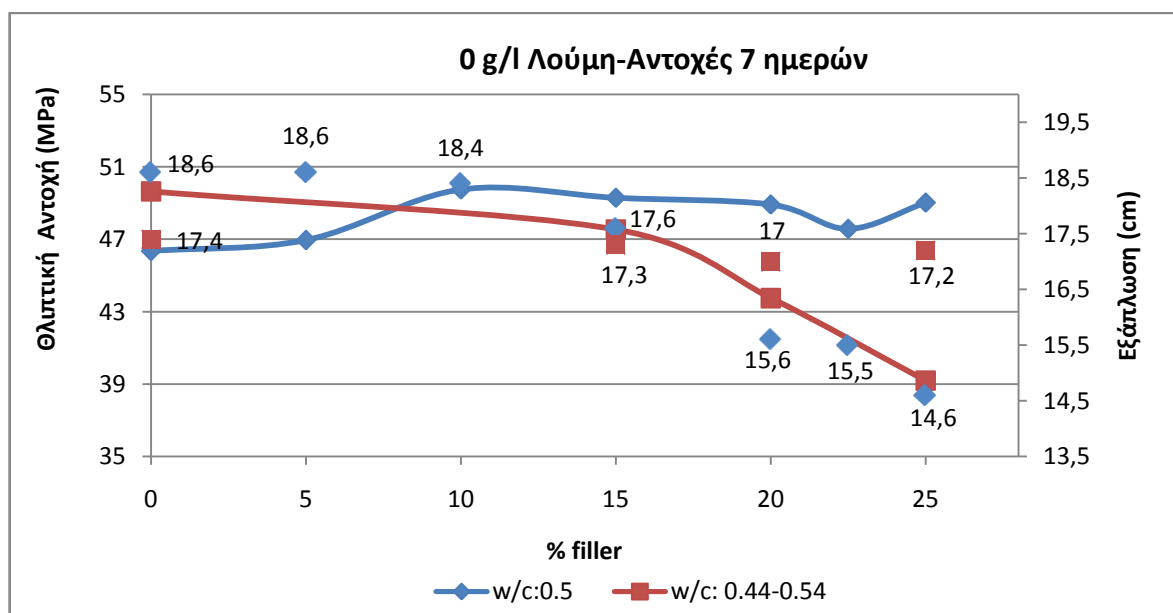
Στο **Διάγραμμα 2.19** γίνεται σύγκριση των θλιπτικών αντοχών 2 ημερών, των συνθέσεων της 1<sup>ης</sup> και 2<sup>ης</sup> σειράς που δεν περιέχουν λούμη. Η σύνθεση που δεν περιέχει filler της 1<sup>ης</sup> σειράς παρουσιάζει μικρότερη θλιπτική αντοχή από την αντίστοιχη της 2<sup>ης</sup> σειράς. Αυτό ενδεχομένως να οφείλεται στο μεγαλύτερο λόγο w/c της πρώτης (μεγαλύτερη εξάπλωση, βλ. **Διάγραμμα 2.19**). Ίσως λοιπόν, όταν μία σύνθεση δεν περιέχει μεγάλη ποσότητα ασβεστολιθικών και παρουσιάζει μεγάλο λόγο w/c, τότε η ενυδάτωση καθυστερεί και οι πρώιμες αντοχές είναι χαμηλές. Για 15 % filler η κατάσταση είναι αντίθετη. Εδώ μπορεί να ειπωθεί ότι στη σύνθεση σταθερής εξάπλωσης όπου ο λόγος w/c είναι μικρότερος (w/c=0,49 έναντι 0,5) η ποσότητα του νερού ανάμιξης είναι ανεπαρκείς για την έγκαιρη έναρξη της ενυδάτωσης ώστε να αναπτυχθούν οι βέλτιστες πρώιμες αντοχές. Όσο αφορά τις συνθέσεις με περιεκτικότητα 20 και 25 % αντίστοιχα η αύξηση του w/c φαίνεται να οδηγεί σε μείωση των θλιπτικών αντοχών. Αυτό οφείλεται στη υπερβολική ποσότητα νερού ανάμιξης.





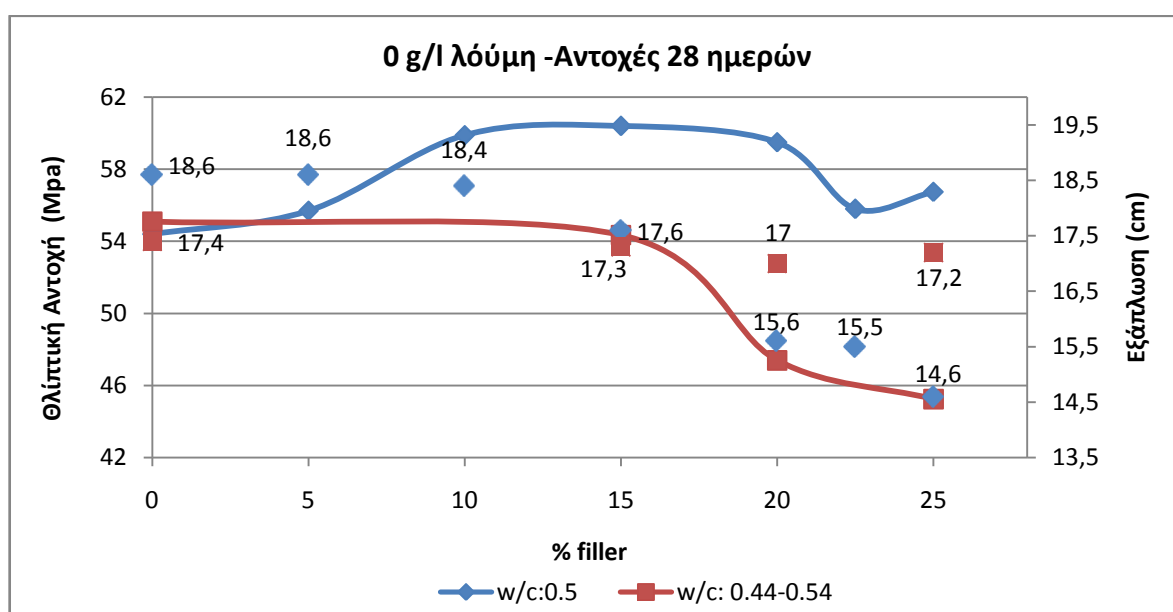
**Διάγραμμα 2.19.** Συσχέτιση θλιπτικών αντοχών 2 ημερών-%filler-εξάπλωσης συνθέσεων που δεν περιέχουν λούμη, 1<sup>η</sup> και 2<sup>η</sup> σειρά.

Από το διάγραμμα των 7 ημερών, **Διάγραμμα 2.20**, τα συμπεράσματα είναι παρόμοια με αυτά που αναφέρθηκαν παραπάνω στον σχολιασμό του **Διαγράμματος 2.19**. Εδώ, η πτώση των θλιπτικών αντοχών με την αύξηση του λόγου w/c είναι πιο προφανής. Επίσης, ενώ για σταθερό w/c 0,5 οι θλιπτικές αντοχές φαίνεται να μην επηρεάζονται πολύ από την αύξηση της περιεκτικότητας filler, με την αύξηση του λόγου w/c οι αντοχές πέφτουν κατακόρυφα. Επίσης, στις συνθέσεις που δεν περιέχουν filler η τάση αύξησης των αντοχών με τη μείωση το λόγου w/c φαίνεται να είναι μικρότερη από ότι στις 2 ημέρες.



**Διάγραμμα 2.20.** Συσχέτιση θλιπτικών αντοχών 7 ημερών-%filler-εξάπλωσης συνθέσεων που δεν περιέχουν λούμη, 1<sup>η</sup> και 2<sup>η</sup> σειρά.

Το **Διάγραμμα 2.21** αφορά τη σύγκριση των θλιπτικών αντοχών 28 ημερών των συνθέσεων που δεν περιέχουν λούμη. Σχετικά με τη σύγκριση των δύο συνθέσεων που δεν περιέχουν καθόλου filler, οι θλιπτικές αντοχές τους είναι σχεδόν ίσες. Άρα κατ' επέκταση των όσων αναφέρθηκαν παραπάνω, η αύξηση του λόγου w/c σε συνθέσεις που έχουν μικρή ποσότητα σε ασβεστολιθική παιπάλη επηρεάζει αρνητικά τις πρώιμες και τις μέσες αντοχές, δεν επηρεάζει όμως ιδιαίτερα τις ύστερες. Επίσης, φαίνεται η καμπύλη σταθερού w/c να βρίσκεται άνω της καμπύλης σταθερής εξάπλωσης και για μικρότερες περιεκτικότητες filler (5 %) από ότι στα δύο προηγούμενα διαγράμματα. Ίσως αυτό να οφείλεται στο γεγονός ότι η αρνητική επίδραση του μεγάλου λόγου w/c στις θλιπτικές αντοχές 28 ημερών είναι σημαντικότερη από την θετική επίδραση της αυξημένης περιεκτικότητας σε ασβεστολιθική παιπάλη.

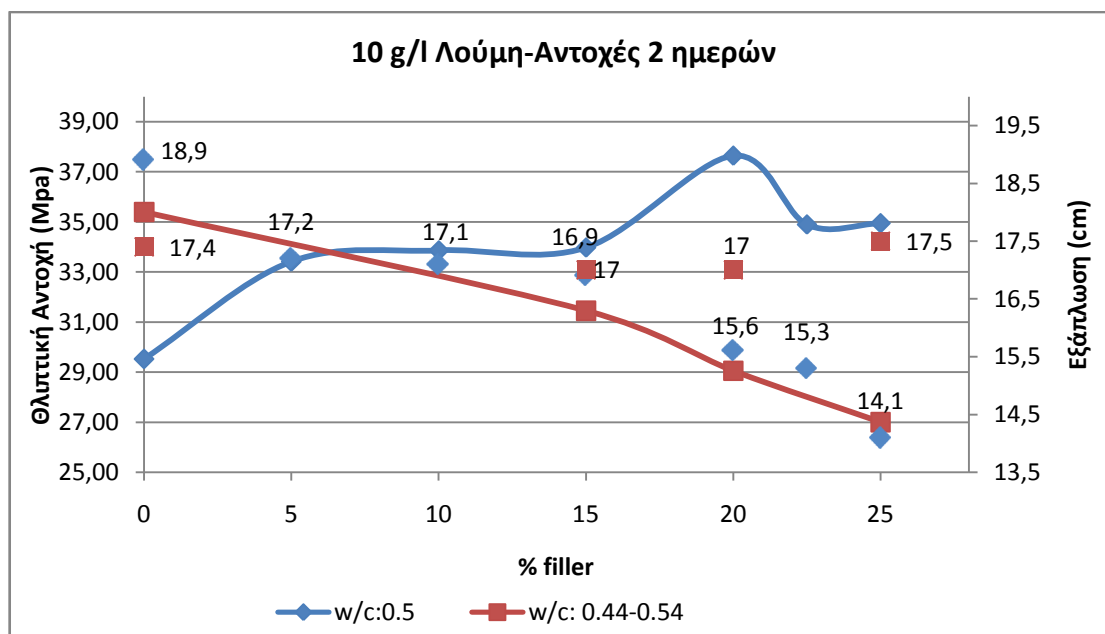


**Διάγραμμα 2.21.** Συσχέτιση θλιπτικών αντοχών 28 ημερών-%filler-εξάπλωσης συνθέσεων που δεν περιέχουν λούμη, 1<sup>η</sup> και 2<sup>η</sup> σειρά.

Για περιεκτικότητα filler 15% η θλιπτική αντοχή της σύνθεσης που έχει w/c 0,5 είναι αρκετά υψηλότερη από αυτή που ο λόγος w/c είναι 0,41, ενώ στις 7 ημέρες η διαφορά αυτή ήταν πολύ μικρή. Άρα φαίνεται, πως η μείωση λόγου w/c σε συνθέσεις που η περιεκτικότητα filler στην άμμο είναι 15 %, επηρεάζει τις πρώιμες και τις ύστερες αντοχές, δεν επηρεάζει όμως τις μέσες. Για τις συνθέσεις που περιέχουν filler 20 και 25 % αντίστοιχα, φαίνεται πως η αύξηση του w/c επηρεάζει αρνητικά τις θλιπτικές αντοχές.

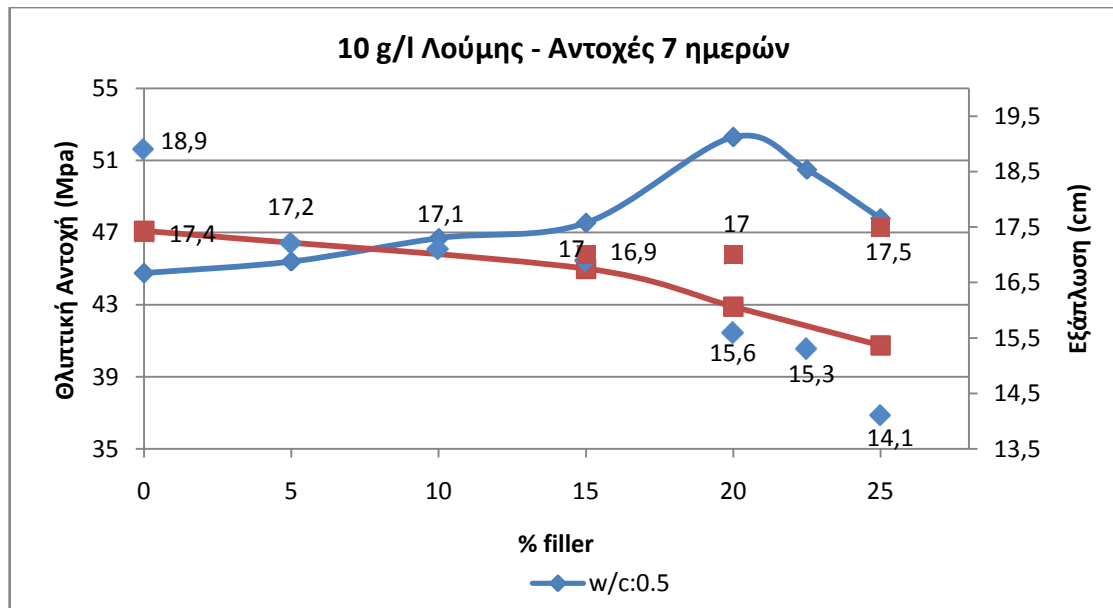
Όσον αφορά την ανάπτυξη θλιπτικών αντοχών 2 ημερών για τις συνθέσεις που περιέχουν 10000 ppm λούμης (**Διάγραμμα 2.22**), η εικόνα είναι παρόμοια με αυτή που παρουσιάζεται για τις συνθέσεις που δεν περιέχουν λούμη. Για τις συνθέσεις που δεν περιέχουν καθόλου filler, φαίνεται, όπως και στις συνθέσεις χωρίς λούμη, πως όταν έχουμε μικρότερο λόγο w/c οι θλιπτικές αντοχές αυξάνονται αρκετά. Έτσι, ενισχύεται το συμπέρασμα, πως για μικρή περιεκτικότητα σε ασβεστολιθικά, μείωση του λόγου w/c (συγκεκριμένα εδώ, από 0,5 σε 0,44) αυξάνει τις πρώιμες θλιπτικές αντοχές. Όπως και στις συνθέσεις χωρίς λούμη, με

αύξηση της περιεκτικότητας σε filler, παρατηρείται πως οι συνθέσεις που έχουν λόγο w/c 0,5 βρίσκονται άνω των τιμών των συνθέσεων που παρουσιάζουν σταθερή εξάπλωση, μάλιστα η καμπύλη των δευτέρων παρουσιάζει σχεδόν γραμμική πτωτική τάση. Άρα επαναλαμβάνοντας το παραπάνω συμπέρασμα, και εδώ γίνεται αντιληπτή η μείωση των αντοχών με την αύξηση του λόγου w/c. Επίσης για 15% περιεκτικότητα σε filler, όπως και στις συνθέσεις που δεν περιέχουν λούμη, οι συνθέσεις που έχουν μικρότερο λόγο w/c παρουσιάζουν μειωμένες αντοχές λόγω της καθυστέρησης της ενυδάτωσής τους.



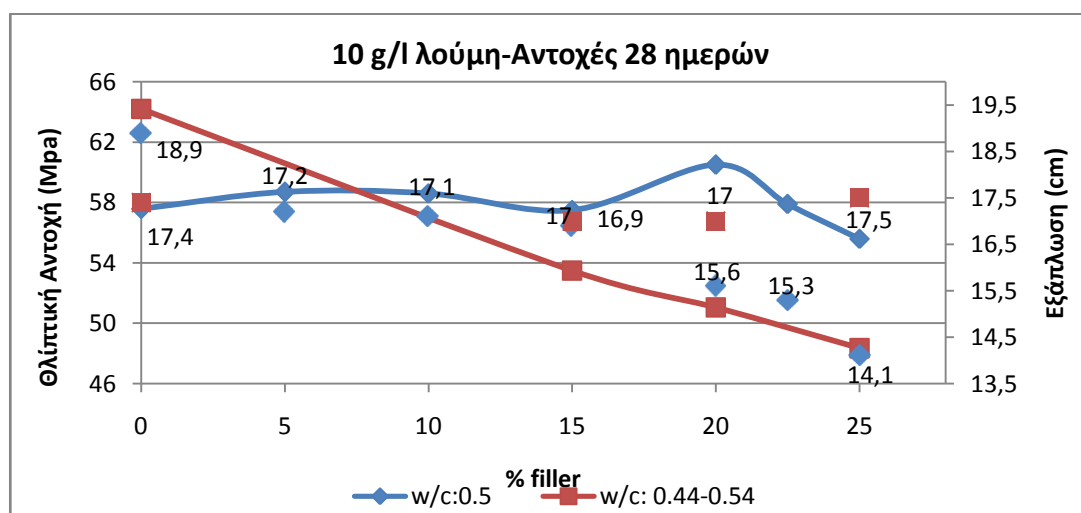
**Διάγραμμα 2.22.** Συσχέτιση θλιπτικών αντοχών 2 ημερών-%filler-εξάπλωσης συνθέσεων που περιέχουν 10000 ppm λούμης, 1<sup>η</sup> και 2<sup>η</sup> σειρά.

Παρόμοια με αυτή των συνθέσεων που δεν περιέχουν λούμη είναι η εικόνα για τις θλιπτικές αντοχές των 7 ημερών (**Διάγραμμα 2.23**). Βέβαια, όσο αφορά την πτώση των θλιπτικών αντοχών με την μείωση του λόγου w/c και την αύξηση της περιεκτικότητας σε filler, φαίνεται να μην εξελίσσεται τόσο ραγδαία όσο στις αντίστοιχες συνθέσεις που δεν περιέχουν λούμη.



**Διάγραμμα 2.23.** Συσχέτιση θλιπτικών αντοχών 7 ημερών-%filler-εξάπλωσης, συνθέσεων που περιέχουν 10000 ppm λούμης, 1<sup>η</sup> και 2<sup>η</sup> σειρά.

Και για τις 28 ημέρες η εικόνα είναι αντίστοιχη με αυτή των συνθέσεων που δεν περιέχουν λούμη, **Διάγραμμα 2.24**. Ωστόσο, για τις συνθέσεις που περιέχουν 10000 ppm λούμης και 0% filler οι θλιπτικές αντοχές αυξάνονται σημαντικά με την μείωση του λόγου w/c ενώ για τις συνθέσεις που δεν περιέχουν λούμη (**Διάγραμμα 2.21**) η αύξηση των αντοχών με την μείωση του λόγου w/c είναι αμελητέα. Ίσως λοιπόν, στα αναμίγματα κονιαμάτων που δεν περιέχουν πολλές ασβεστολιθικές ενώσεις η προσθήκη μικρής περιεκτικότητας λούμης (10000 ppm) παράλληλα με τη μείωση του λόγου w/c να βελτιώνει αρκετά τις θλιπτικές αντοχές. Επίσης, εδώ φαίνεται ξεκάθαρα η αυξημένη επίδραση του λόγου w/c στη μείωση των θλιπτικών αντοχών από την μεγάλη κλίση της καμπύλης των συνθέσεων σταθερής εξάπλωσης.



**Διάγραμμα 2.24.** Συσχέτιση θλιπτικών αντοχών 28 ημερών-%filler-εξάπλωσης, συνθέσεων που περιέχουν 10000 ppm λούμης, 1<sup>η</sup> και 2<sup>η</sup> σειρά.

### 2.3.5. Ποσοτικοποίηση των Ποιοτικών Συμπερασμάτων-Στατιστική Μέθοδος Taguchi

Παραπάνω παρατέθηκαν οι 2 σειρές πειραμάτων, οι πίνακες των αποτελεσμάτων τους, τα διαγράμματα που συνοδεύουν αυτά, καθώς και σχόλια πάνω στα πειραματικά ευρήματα. Βάσει των παραπάνω έγινε δυνατή η συσχέτιση των θλιπτικών αντοχών και της εξάπλωσης, με την περιεκτικότητα των συνθέσεων σε filler και σε λούμη και με τον λόγο w/c. Βέβαια, γίνεται άμεσα αντιληπτή η ανάγκη ποσοτικοποίησης της επίδρασης του κάθε μεταβλητού παράγοντα (w/c, % filler, ppm λούμης) στις θλιπτικές αντοχές και στην εξάπλωση. Έτσι είναι δυνατό να απαντηθεί με σαφήνεια το ερώτημα που τέθηκε από την αρχή αυτής της ερευνητικής προσπάθειας, δηλαδή κατά πόσο η περιεκτικότητα ασβεστολιθικής παιπάλης επηρεάζει τις ιδιότητες των συνθέσεων.

Έτσι γίνεται αναγκαία η χρήση μίας στατιστικής μεθόδου. Επιλέχθηκε ως πιο κατάλληλη η μέθοδος Taguchi, η οποία βρίσκει εφαρμογή σε πολλούς τομείς τόσο της έρευνας όσο και της παραγωγής για την στατιστική επεξεργασία δεδομένων. Ο τρόπος λειτουργίας της μεθόδου αυτής βασίζεται στις παρακάτω αρχές:

- ✓ Κατασκευή μιας κλίμακας μέτρησης, βασισμένης στα χαρακτηριστικά εισόδου του συστήματος, προκειμένου να μετρηθεί ο βαθμός «ανωμαλίας» ή παρατυπίας διαφόρων καταστάσεων.
- ✓ Ποσοτικοποίηση της λειτουργικότητας του συστήματος με το κατάλληλο μέτρο.
- ✓ Ελαχιστοποίηση του αριθμού των διαστάσεων (μεταβλητών) για μία πιο αποτελεσματική διάγνωση – λήψη απόφασης.
- ✓ Πρόβλεψη της απόδοσης του συστήματος υπό διαφορετικές συνθήκες.
- ✓ Αντιμετώπιση προβλημάτων που εμφανίζονται συχνά στα συστήματα πολλών διαστάσεων, όπως πολυσυγγραμμικότητα και χαμηλές συσχετίσεις.

Ο στόχος είναι η εύρεση του ποσοστού εξάρτησης % των θλιπτικών αντοχών και της εξάπλωσης από την περιεκτικότητα σε filler, την περιεκτικότητα λούμης και τον λόγο w/c. Έτσι λοιπόν, με τη χρήση ηλεκτρονικού υπολογιστή και την συνδρομή του σχετικού προγράμματος έγινε δυνατή η στατιστική επεξεργασία των αποτελεσμάτων. Πρώτον ορίζονται στο σύστημα ως ανεξάρτητες μεταβλητές ο λόγος w/c, η περιεκτικότητα σε filler και η περιεκτικότητα σε λούμη. Ως εξαρτημένες μεταβλητές ορίζονται οι θλιπτικές αντοχές 2, 7 και 28 ημερών και η εξάπλωση. Εν συνεχεία, δίνονται στο σύστημα τα δεδομένα τις κάθε σύνθεσης (ποσότητες πρώτων υλών και αποτελέσματα εξάπλωσης και θλιπτικών αντοχών).

Το πρόγραμμα, αφού επεξεργαστεί τα δεδομένα, καταλήγει στην επιλογή 9 χαρακτηριστικών πειραμάτων, η επεξεργασία των οποίων είναι ικανή να δώσει με αρκετά καλή προσέγγιση την επίδραση των μεταβλητών από κάθε παράγοντα. Τρία από αυτά τα πειράματα έχουν ήδη πραγματοποιηθεί και είναι τα πειράματα  $1b_{0,5}$ ,  $4c_{0,5}$  και  $7a_{0,5}$ . Τα υπόλοιπα 6 προτείνονται ως συμπληρωματικά πειράματα από το σύστημα και είναι τα πειράματα  $1a_{0,54}$ ,  $4b_{0,54}$ ,  $7c_{0,54}$ ,  $1c_{0,44}$ ,  $4a_{0,44}$  και  $7b_{0,44}$ . Εκτός από τα 6 συμπληρωματικά πειράματα επαναλήφθηκαν και τα τρία που είχαν ήδη πραγματοποιηθεί την ίδια εργαστηριακή ημέρα. Αυτό έγινε διότι με την πραγματοποίηση όλων των πειραμάτων την ίδια ημέρα ελαχιστοποιείται η ύπαρξη διαφοροποιήσεων μεταξύ των θλιπτικών αντοχών

των συνθέσεων που οφείλονται σε μεταβολή των περιβαλλοντικών παραγόντων. Στον **Πίνακα 2.10** φαίνονται οι περιεκτικότητες της κάθε σύνθεσης σε άμμο, σε filler άμμου, τσιμέντο, νερό και λούμη.

**Πίνακας 2.10.** Περιεκτικότητες άμμου, % filler στην άμμο, τσιμέντου και ποσότητα νερού των συνθέσεων που παρασκευάστηκαν για επεξεργασία με τη στατιστική μέθοδο Taguchi.

α/α	% filler στην άμμο	w/c	ppm λούμης στο νερό	gr ξηρής λούμης στο ανάμιγμα	gr filler άμμου στο ανάμιγμα	gr χονδρόκοκκης άμμου στο ανάμιγμα	gr τσιμέντου στο ανάμιγμα	gr νερού στο ανάμιγμα
1a <sub>0,54</sub>	0	0,54	0	0	0	1156,5	540	290
4b <sub>0,54</sub>	15	0,54	10.000	2,7	173,5	983,0	540	290
7c <sub>0,54</sub>	25	0,54	50.000	13,5	289,1	867,4	540	290
1b <sub>0,5</sub>	0	0,50	10.000	2,7	0	1156,5	540	270
4c <sub>0,5</sub>	15	0,50	50.000	13,5	173,5	983,0	540	270
7a <sub>0,5</sub>	25	0,50	0	0	289,1	867,4	540	270
1c <sub>0,44</sub>	0	0,44	50.000	13,5	0	1156,5	540	240
4a <sub>0,44</sub>	15	0,44	0	0	173,5	983,0	540	240
7b <sub>0,44</sub>	25	0,44	10.000	2,7	289,1	867,4	540	240

Στον πίνακα που ακολουθεί, **Πίνακα 2.11**, δίδονται οι εξαπλώσεις και οι θλιπτικές αντοχές 2, 7 και 28 ημερών των εννέα πειραμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην στατιστική μέθοδο Taguchi. Αυτές οι τιμές δόθηκαν στο πρόγραμμα ώστε να γίνει η στατιστική επεξεργασία και να προσδιοριστεί η % επιρροή, του λόγου w/c, της περιεκτικότητας σε filler και της περιεκτικότητας σε λούμη στην εξάπλωση και στις θλιπτικές αντοχές 2, 7 και 28 ημερών.

Τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης Taguchi φαίνονται στον **Πίνακα 2.12**. Όπως φαίνεται η εξάπλωση επηρεάζεται σε ποσοστό 55,35 % από τον λόγο w/c και σε ποσοστό 42,22 % από την περιεκτικότητα σε filler. Η λούμη επηρεάζει την εξάπλωση σε πολύ μικρό ποσοστό, συγκεκριμένα 2,37%. Με την ποσοτικοποίηση των αποτελεσμάτων φαίνεται πως κάποια συμπεράσματα που έχουν προκύψει από τον σχολιασμό των διαγραμμάτων επιβεβαιώνονται απόλυτα. Η επίδραση του λόγου w/c στην εξάπλωση, πέρα από τα διαγράμματα, έγινε άμεσα αντιληπτή και κατά τη διαδικασία της δοκιμής εξάπλωσης, με την αύξηση του περιεχόμενου νερού στη σύνθεση η εξάπλωση μεγάλωνε. Η μεγάλη επίδραση της περιεκτικότητας % σε filler επιβεβαιώνεται από το **Διάγραμμα 1** το οποίο έχει σχολιαστεί πιο πάνω. Επίσης, κάτι που έχει ήδη σχολιαστεί είναι η μικρή εξάρτηση της εξάπλωσης από την περιεκτικότητα σε λούμη.

**Πίνακας 2.11.** Εξαπλώσεις και θλιπτικές αντοχές των συνθέσεων που παρασκευάστηκαν για επεξεργασία με τη στατιστική μέθοδο Taguchi.

a/a	w/c	%filler	Λούμη (g/L)	Εξάπλωση (cm)	Θλιπτικές αντοχές 2 ημερών	Θλιπτικές αντοχές 7 ημερών	Θλιπτικές αντοχές 28 ημερών
1a <sub>0,54</sub>	0,54	0	0	22,3	20,7	34,75	48,1
4b <sub>0,54</sub>	0,54	15	10	19,1	24,65	41,85	46,3
7c <sub>0,54</sub>	0,54	25	50	16,3	29,7	39,9	48,9
1b <sub>0,5</sub>	0,50	0	10	18,4	29,52	44,75	57,58
4c <sub>0,5</sub>	0,50	15	50	16,6	35,1	48,05	56,6
7a <sub>0,5</sub>	0,50	25	0	14,6	35,45	49,025	56,75
1c <sub>0,44</sub>	0,44	0	50	15,7	34,4	43,35	56,5
4a <sub>0,44</sub>	0,44	15	0	14,2	35,4	47,8	59,75
7b <sub>0,44</sub>	0,44	25	10	10,0 <sup>1</sup>	43,55	50,1	61,4

**Πίνακας 2.12.** Μέθοδος Taguchi, ποσοστά επιρροής του λόγου w/c, του filler και της λούμης στην εξαπλώση και στις θλιπτικές αντοχές των 2, των 7 και των 28 ημερών αντίστοιχα.

Ανάλυση Taguchi				
Ιδιότητα	Επιρροή w/c	Επιρροή filler	Επιρροή λούμης	Συνολική Επιρροή
Εξάπλωση	55,35%	42,22%	2,37%	99,94%
Θλιπτικές Αντοχές 2 ημερών	69,00%	26,59%	3,00%	98,59%
Θλιπτικές Αντοχές 7 ημερών	69,73%	26,90%	3,09%	99,72%
Θλιπτικές Αντοχές 28 ημερών	93,04%	2,03%	0,84%	95,91%

Όσο αφορά τις θλιπτικές αντοχές 2 ημερών, η επίδραση του λόγου w/c σε αυτές φαίνεται να είναι αρκετά μεγαλύτερη, 69%. Η μεγάλη επίδραση του λόγου w/c στις θλιπτικές αντοχές 2 ημερών έχει αναφερθεί πιο πάνω στο σχολιασμό των **Διαγραμμάτων 2.19** και **2.22** όπου φαίνεται καθαρά η πτώση των θλιπτικών αντοχών με την αύξηση του w/c (σύγκριση καμπύλης σταθερού w/c και καμπύλης σταθερής εξάπλωσης).

Από την άλλη, η επίδραση του filler στις θλιπτικές αντοχές των 2 ημερών φαίνεται να είναι μικρότερη από ότι στην εξαπλώση (26,59 %) αλλά διόλου αμελητέα όπως προκύπτει και από τον σχολιασμό όλων των **Διαγραμμάτων 2.7, 2.14, 2.19** και **2.22**. Η επίδραση της

<sup>1</sup> Λόγω της πολύ μεγάλης ποσότητας λεπτόκοκκων υλικών και του μικρού λόγου w/c στην συγκεκριμένη σύνθεση, δεν ήταν δυνατό να μετρηθεί η εξαπλώση και η τοποθέτηση της σε μήτρα έγινε με δόνηση. Η τιμή 10 είναι μία αυθαίρετη τιμή που δόθηκε ώστε να μπορέσει να ολοκληρωθεί ο υπολογισμός της μεθόδου Taguchi.

λούμης φαίνεται να είναι επίσης πάρα πολύ μικρή 3%, όπως φαίνεται και στα **Διαγράμματα 2.7 και 2.14**.

Σχεδόν ίδια ποσοστά επίδρασης των τριών παραγόντων παρουσιάζουν και οι θλιπτικές αντοχές των 7 ημερών, επιρροή λόγου w/c 69,73%, επιρροή filler 26,9% και επιρροή λούμης 3,09%. Η μεγάλη επίδραση του λόγου w/c στις θλιπτικές αντοχές 7 ημερών έχει ήδη σχολιαστεί πιο πάνω στα **Διαγράμματα 2.20 και 2.23** όπου φαίνεται καθαρά η πτώση των θλιπτικών αντοχών με την αύξηση του w/c (σύγκριση καμπύλης σταθερού w/c και καμπύλης σταθερής εξάπλωσης). Η επίδρασή του filler φαίνεται από τα **Διαγράμματα 2.8, 2.15, 2.20 και 2.23**. Η μικρή επίδραση της λούμης φαίνεται από τα **Διαγράμματα 2.8 και 2.15**.

Στις θλιπτικές αντοχές 28 ημερών η επίδραση του λόγου w/c είναι καθοριστικής σημασίας, 93,04%. Φαίνεται λοιπόν, πως ο λόγος w/c είναι ο κύριος παράγοντας για την ανάπτυξη χαμηλών ή υψηλών τελικών αντοχών, όπως προκύπτει και από τα **Διαγράμματα 2.21 και 2.24**. Η επίδραση της περιεκτικότητας % του filler φαίνεται να είναι πολύ μικρή, 2,03 %, ενώ της λούμης σχεδόν αμελητέα, 0,84%.

## 2.4. Συμπεράσματα

Συμπεράσματα σχετικά με τη σειρά συνθέσεων με σταθερό λόγο w/c 0,5:

- Η αύξηση της περιεκτικότητας ασβεστολιθικής παιπάλης στο μίγμα οδηγεί γενικά σε μείωση της εξάπλωσης άρα και της εργασιμότητας. Η τάση αυτή είναι αρκετά ξεκάθαρη για την αύξηση της περιεκτικότητας % σε filler. Όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα των λεπτόκοκκων υλικών (που παρουσιάζουν παρεμφερή κοκκομετρία με το τσιμέντο) στα αναμίγματα, τόσο μειώνεται η εξάπλωση.
- Η αύξηση της περιεκτικότητας της λούμης οδηγεί σε ελαφριά μείωση της εξάπλωσης του νωπού κονιάματος. Η μείωση αυτή παρατηρείται πιο έντονα στις συνθέσεις που περιέχουν μεγάλη περιεκτικότητα σε λούμη (50000 ppm).
- Ανοδική τάση των θλιπτικών αντοχών παρατηρείται με αύξηση της περιεκτικότητας σε filler. Η τάση αυτή φαίνεται να είναι πιο έντονη στις αντοχές των 2 ημερών, λιγότερο έντονη στις αντοχές των 7 ημερών και αμβλύνεται αρκετά για τις θλιπτικές αντοχές των 28 ημερών.
- Η περιεκτικότητα λούμης φαίνεται να μην επηρεάζει σημαντικά τις θλιπτικές αντοχές.
- Όταν δεν περιέχεται ασβεστολιθικό filler στις συνθέσεις και περιέχεται μικρή ποσότητα λούμης αιωρούμενης στο νερό, τότε η δεύτερη υποκαθιστά τις ευεργετικές ιδιότητες, σε σχέση με τις θλιπτικές αντοχές, του filler, λόγω της υψηλής της περιεκτικότητας σε ασβεστόλιθο.
- Για περιεκτικότητες σε filler 10 και 15% φαίνεται πως η αύξηση της περιεκτικότητας της λούμης οδηγεί σε μείωση των θλιπτικών αντοχών 28 ημερών.



- Οι θλιπτικές αντοχές της σύνθεσης που περιέχει 20 % σε filler και 10000 ppm λούμης παρουσιάζουν τις υψηλότερες τιμές θλιπτικών αντοχών 2, 7 και 28 ημερών.
- Φαίνεται πως, όταν δεν περιέχεται λούμη στο νερό ανάμιξης, μεγάλη περιεκτικότητα σε filler (20%) συμβάλει πιο πολύ στην ανάπτυξη πρώιμων αντοχών (2 ημερών), ενώ μία περιεκτικότητα σε filler (10%) συμβάλει κυρίως στην ανάπτυξη των μέσων αντοχών (7 ημερών). Επίσης περιεκτικότητα σε filler 15% , που είναι και η συνήθης περιεκτικότητα filler στην άμμο, συντελεί κυρίως στην ανάπτυξη ύστερων αντοχών (28 ημερών).
- Η μείωση ή η υπερβολική αύξηση των θλιπτικών αντοχών που παρατηρείται στις συνθέσεις που περιέχουν πολύ μεγάλη ποσότητα ασβεστολιθικής παιπάλης (filler από 25-30%, λούμη 10000 ή 50000 ppm) αποδίδεται σε ανομοιογένεια του υλικού λόγω ελλιπούς εξάπλωσης.

Συμπεράσματα σχετικά με τη σειρά συνθέσεων σταθερής εξάπλωσης (17,25±0,25cm):

- Ο λόγος w/c, με την αύξηση της περιεκτικότητας % σε filler, μεγαλώνει σχεδόν γραμμικά, διότι όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα των λεπτόκοκκων υλικών στο ανάμιγμα τόσο επηρεάζεται αρνητικά η εξάπλωση.
- Η ύπαρξη της λούμης (10000ppm) στις συνθέσεις σταθερής εξάπλωσης δεν επηρεάζει την εργασιμότητα του νωπού κονιάματος.
- Για αύξηση της περιεκτικότητας σε filler, επομένως και για αύξηση του w/c παρατηρείται πτώση των θλιπτικών αντοχών 2, 7 και 28 ημερών.
- Όταν απουσιάζει το filler στην άμμο, η λούμη ευνοεί την ανάπτυξη των πρώιμων και των ύστερων αντοχών.

Συμπεράσματα σχετικά με τη σύγκριση των συνθέσεων σταθερού λόγου w/c 0,5 και συνθέσεων σταθερής εξάπλωσης:

- Η αύξηση του λόγου w/c σε συνθέσεις που έχουν μικρή ποσότητα σε ασβεστολιθικά υλικά επηρεάζει αρνητικά τις πρώιμες και τις μέσες αντοχές, δεν επηρεάζει όμως τις ύστερες.
- Οι θλιπτικές αντοχές επηρεάζονται περισσότερο από τον λόγο w/c παρά από την περιεκτικότητα σε ασβεστολιθική παιπάλη. Αρκετά περισσότερο επηρεάζονται οι αντοχές των 28 ημερών.

Συμπεράσματα στατιστικής μεθόδου Taguchi:

- Η εξάπλωση επηρεάζεται σε ποσοστό 55,35 % από τον λόγο w/c και σε ποσοστό 42,22 % από την περιεκτικότητα σε filler. Η λούμη επηρεάζει την εξάπλωση σε πολύ μικρό ποσοστό, συγκεκριμένα 2,37%.
- Οι θλιπτικές αντοχές 2 ημερών επηρεάζονται από το λόγο w/c σε ποσοστό 69%, από την περιεκτικότητα του filler σε ποσοστό 26,59 % και από τη λούμη σε ποσοστό 3%.
- Οι θλιπτικές αντοχές 7 ημερών επηρεάζονται από το λόγο w/c σε ποσοστό 69,73%, από την περιεκτικότητα του filler σε ποσοστό 26,9 % και από τη λούμη σε ποσοστό 3,09%.
- Οι θλιπτικές αντοχές 28 ημερών επηρεάζονται από το λόγο w/c σε ποσοστό 93,04%. από την περιεκτικότητα του filler σε ποσοστό 2,03 % και από τη λούμη σε ποσοστό 0,84%.

Γενικά συμπεράσματα:

Έτσι λοιπόν, σαν κατακλείδα αυτής της ερευνητικής προσπάθειας και συγκεντρώνοντας τα πιο βασικά στοιχεία των συμπερασμάτων:

- ✓ Η αύξηση της περιεκτικότητας του ασβεστολιθικού filler, μέχρι του ποσοστού όπου για περιεκτικότητες μεγαλύτερες από αυτό μειώνεται πολύ η εργασιμότητα και το υλικό γίνεται ανομοιογενές, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των τιμών των θλιπτικών αντοχών.
- ✓ Οι θλιπτικές αντοχές επηρεάζονται περισσότερο από τον λόγο w/c παρά από την περιεκτικότητα σε ασβεστολιθική παιπάλη.
- ✓ Οι εξαπλώσεις μειώνονται με την αύξηση της περιεκτικότητας ασβεστολιθικής παιπάλης και τη μείωση του λόγου w/c.
- ✓ Η ύπαρξη αιωρούμενης λούμης στο νερό ανάμιξης, σε περιεκτικότητες 10000 και 50000 ppm, φαίνεται να μην επηρεάζει σημαντικά τις θλιπτικές αντοχές των παραγομένων τσιμεντοκονιαμάτων.
- ✓ Όταν απουσιάζει το filler στην άμμο, η λούμη ευνοεί την ανάπτυξη των πρωίμων και των ύστερων αντοχών.
- ✓ Η σύνθεση, με λόγο w/c 0,5 η οποία περιέχει 20 % filler και 10000 ppm λούμης, παρουσιάζει τις μεγαλύτερες θλιπτικές αντοχές 2, 7 και 28 ημερών.

## Βιβλιογραφία

- [1] Σταμάτης Τσίμας, «ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ (Τσιμέντο-Ασβέστης-Σκυρόδεμα-Κονιάματα)», ΕΜΠ 2001.
- [2] Σ.Τσίμας, « Σ.Τσιβιλής, Επιστήμη και Τεχνολογία Τσιμέντου», ΕΜΠ 2010
- [3] Αντωνόπουλος Αργύρης, «επιβλέπων: Πουλάκος Γεώργιος, Διπλωματική εργασία: Αδρανή Υλικά», Ε.Μ.Π. Μάρτιος 2011.
- [4] Joseph F. Lamond and James H. Pielert, «Significance of tests and properties of Concrete & Concrete Making Matirials», ASTM International, 2006.
- [5] A.M.Neville, J.J.Brooks, «Concrete Technology, Prentice Hall», 2nd Revised edition (June 17, 2010).
- [6] Adam Neville, «Concrete: Neville’s insights and issues», Thomas Thelford 2006.
- [7] M. Zervaki, M. Mappouridou, S. Tsimas, C. Leptokaridis, «Concrete sludge water recycling: An essential practice for the sustainability of a ready mix concrete plant», 3 International Symposium of Life-Cycle Civil Engineering, Vienna Austria, October 2012.
- [8] Μ. Ζερβάκη, Σ. Τσίμας και Χ. Λεπτοκαρίδης, «Επαναχρησιμοποίηση Νερού Έκπλυσης Οχημάτων Μεταφοράς Ετοιμού Σκυροδέματος, Ο Ρόλος Του pH», Τρίτο Διεθνές Συνέδριο «Εγκαταστάσεις Επεξεργασίας Νερού και Υγρών Αποβλήτων Μικρής Κλίμακας», Σκιάθος 14-16 Μαΐου 2010.
- [9] Feret, R., «Sur la compacite´ des mortiers hydrauliques, Annales des Ponts et Chaussées», 2nd semester, 1892, pp. 5—61.
- [10] Abrams, D.A., «Design of concrete mixtures (1925)», A Selection of Historic American Papers on Concrete 1876—1926, SP-52, H. Newlon, Jr, Editor, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1976, pp. 309—330.
- [11] Sandstedt, C.E., Ledbetter, W.B. and Gallaway, B.M., «Prediction of concrete strength from the calculated porosity of the hardened cement paste», ACI Journal Proceedings, 70, 2, Feb., 1973, pp. 115—116.
- [12] Rao, G.A., «Role of water—binder ratio on the strength development in mortars incorporated with silica fume», Cement and Concrete Research, 31, 2001, pp. 443—447.
- [13] Struble, L., «The performance of Portland cement, ASTM Standardization News», Jan., 1992, pp. 38—45.

- [14] Gaynor, R.D., «Cement strength and concrete strength — an apparition or a dichotomy?», *Cement, Concrete, and Aggregates*, ASTM, 1993, pp. 135—144.
- [15] Weaver, W.S., Isabelle, H.L. and Williamson, F., «A study of cement and concrete correlation», *Journal of Testing and Evaluation*, 2, 4, 1974, pp. 260—303.
- [16] Carino, N. and Tank, R.C., «Maturity functions of concrete made with various cements and admixtures, *ACI Materials Journal*», 89, 2, Mar.—Apr., 1992, pp. 188—196.
- [17] Koliass, S., «Investigation of the possibility of estimating concrete strength by porosity measurements», *Materials and Structures*, 2, 1994, pp. 265—272.
- [18] John Newman, Ban Seng Choo, «Advanced Concrete Technology: Constituent Materials», Copyright © 2003, Elsevier Ltd. All rights reserved .
- [19] John Newman, Ban Seng Choo, «Advanced Concrete Technology: Concrete Properties», Copyright © 2003, Elsevier Ltd. All rights reserved.
- [20] François de Larrard, «Concrete Mixture Proportioning: A Scientific Approach», E&FN Spon 1999.
- [21] S. N. Ghosh, «Advances in Cement Technology: Chemistry, Manufacture and Testing second edition», Tech books international 2002.
- [22] Federation International du Béton, «Environmental Design(State-of-art Report)»,2004.
- [23] S. O. Ekolu and A. Dawneerangen, «Evaluation of recycled water recovered from a ready-mix concrete plant for reuse in concrete», *JOURNAL OF THE SOUTH AFRICAN INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERING*, October 2010, Paper 714.
- [24] Abrams, D A 1924. «Tests of impure waters for mixing concrete». *Proceedings*, American Concrete Institute, 20: 442–486.
- [25] Borger, J, Carrasquillo, R L, Fowler, D W 1994. «Use of recycled wash water and returned plastic concrete in the production of fresh concrete.» *Advanced Cement Based Materials*, 1: 442–486.
- [26] Selih, J, Milost, E & Cuznar, A 2003. «Use of recycled rubble-based aggregate and recycled water in concrete.» *Proceedings*, International Symposium on Recycling and Reuse of Waste Materials, University of Dundee, Scotland, 9–11 September.
- [27] Sandrolini, F & Franzoni, E 2001. «Waste wash water recycling in ready-mix concrete plants.» *Cement and Concrete Research*, 31: 485–489.
- [28] Kuosa, H 2005. «Recycling of concrete, sludge and water in the concrete industry, *Proceedings*», 18th BIBM International Congress, 11–14 May, Amsterdam.

- [29] Chatveera, B, Lertwattanakul, P & Makul, «N 2006.Effect of sludge water from ready-mix concrete plant on properties and durability of concrete.» *Cement and Concrete Composites*, 28: 441–450.
- [30] ΕΛΟΤ 345, 1979. «Το Ύδωρ Αναμίξεως και Συντηρήσεως Σκυροδέματος», Ελληνικός Οργανισμός Τυποποιήσεως (ΕΛΟΤ), Αθήνα
- [31] EN 1008, 2002. «Mixing water for concrete – Specification for sampling, testing and assessing the suitability of water, including water recovered from processes in the concrete industry, as mixing water for concrete», European Committee for Standardization (CEN), Brussels.
- [32] ASTM C 1602/C 1602M, 2006. «Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete», ASTM International, United States.
- [33] EN 196-1. «Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength», European Committee for Standardization (CEN), Brussels.
- [34] EN 1015-3, 1999. «Methods of test for mortar for masonry – Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table)», European Committee for Standardization (CEN), Brussels.
- [35] EN 1015.11, 1999. Methods of test for mortar for masonry – Part 11: Determination of flexural and compressive strength of hardened mortar, European Committee for Standardization (CEN), Brussels.