



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
**ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ**  
**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)**  
**«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ»**

**Μελέτη ρεολογικών χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων σκυροδέματος με  
ρευστοποιητές πολυκαρβοξυλικής και λιγνοσουλφονικής βάσης**

**Μαρία Δουρίδα**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: Ευστράτιος Γ. Μπαδογιάννης-Λέκτορας Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2016



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**  
ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ  
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ (Δ.Π.Μ.Σ.)  
«ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΥΛΙΚΩΝ»

**Μελέτη ρεολογικών χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων σκυροδέματος με  
ρευστοποιητές πολυκαρβοξυλικής και λιγνοσουλφονικής βάσης**

**Μαρία Δουρίδα**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή**

Μπαδογιάννης Ε., Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Τσιβιλής Σ., Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αργυρούσης Χ., Αναπληρωτής Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΑΘΗΝΑ, ΦΕΒΡΟΥΑΡΙΟΣ 2016

## Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας τη μεταπτυχιακή μου εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσους με βοήθησαν και με στήριξαν σε αυτήν την πορεία.

Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας κ. Μπαδογιάννη Ε., Λέκτορα της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, για την ανάθεση του συγκεκριμένου θέματος, την άμεση βοήθεια καθώς και την πολύτιμη καθοδήγησή του, συμβάλλοντας με την άρτια επιστημονική του κατάρτιση στην εκπόνηση της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

Ευχαριστίες επίσης οφείλω στο Διευθυντή του Τμήματος Τεχνικών Υλικών και Στοιχείων του Κεντρικού Εργαστηρίου Δημοσίων Έργων κ. Μαλακάτα Ν. καθώς και στο προσωπικό του εργαστηρίου, για τη βοήθεια που μου παρείχαν στη διεξαγωγή σημαντικού τμήματος του πειραματικού μέρους.

Ιδιαίτερος θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Αριστείδη Ασπρογέρακα Δρ. Χημικό Μηχανικό, τόσο για τη συνδρομή του στην παρασκευή των συνθέσεων και την πειραματική μελέτη των δοκιμών, όσο και για την υποστήριξη σε όλο το χρονικό διάστημα που διήρκεσε η εκπόνηση της παρούσας εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κ. Τσιβιλή Σ., Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. καθώς και τον κ. Αργυρούση Χ., Απαληρωτή Καθηγητή της Σχολής Χημικών Μηχανικών του Ε.Μ.Π. για τη συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας.

Τέλος, οφείλω ένα μεγάλο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για τη στήριξη της, με κάθε δυνατό τρόπο, στη μέχρι τώρα πορεία μου.

## Περίληψη

Η συμπεριφορά του σκυροδέματος χαρακτηρίζεται σε μεγάλο βαθμό από τις ρεολογικές και τις μηχανικές του ιδιότητες. Στην παρούσα μεταπτυχιακή εργασία μελετάται η ρεολογική και η μηχανική συμπεριφορά του σκυροδέματος με ρευστοποιητές πολυκαρβοξυλικής και λιγνοσουλφονικής βάσης. Μελετήθηκε επίσης η επίδραση των ρευστοποιητών σε πάστες τσιμέντου και σε κονιάματα.

Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν αφορούσαν αρχικά στις πάστες, έπειτα στα κονιάματα και τέλος στο σκυρόδεμα. Οι συνθέσεις ήταν κοινές για κάθε κατηγορία δοκιμών, διαφοροποιούνταν μόνο ως προς τα ποσοστά ρευστοποιητή στο είδος τους και στις απαιτήσεις της κάθε δοκιμής.

Με βάση τα αποτελέσματα και αναφορικά με τη δοκιμή κάθισης των παστών τσιμέντου παρατηρήθηκε πως τα ποσοστά προσθήκης ρευστοποιητών κυμάνθηκαν όπως ήταν αναμενόμενο σε χαμηλές τιμές για τους PCE ρευστοποιητές και σε δεκαπλάσιες τιμές για τους LS ρευστοποιητές. Στη δοκιμή της μεθύτερης προσθήκης, ευνοήθηκε κατά βάση η ρευστότητα των παστών με τους ρευστοποιητές, ενώ αντίθετα για τους επιβραδυντές ήταν απαραίτητη η άμεση εφαρμογή τους. Ως προς την επίδραση του χρόνου, παρατηρήθηκε μία ομαλή μείωση της τιμής της, με την πάροδο του χρόνου. Εξάιρεση αποτελεί ο επιβραδυντής HR 50, ο οποίος ήταν ο μοναδικός που παρουσίασε σημαντική αύξηση της εξάπλωσης. Σχετικά με τον προσδιορισμό του χρόνου πήξης, οι PCE ρευστοποιητές είχαν μικρή επίδραση στο χρόνο πήξης. Όμως οι πάστες με LS ρευστοποιητές παρουσίασαν καθυστερημένη πήξη ενώ αυτές με επιβραδυντές παρουσίασαν άμεση πήξη. Τέλος, μικρές σχετικά τιμές διαχωρισμού (<5%) παρατηρήθηκαν στις πάστες με PCE ρευστοποιητές και τον επιβραδυντή HR 50. Οι πάστες με LS επιβραδυντές έπηξαν αμέσως, ενώ αυτές με LS ρευστοποιητές παρουσίασαν επιφανειακή πήξη.

Σχετικά με τη θλιπτική αντοχή των δοκιμίων κονιαμάτων, παρατηρήθηκε πως η προσθήκη των PCE ρευστοποιητών είχε γενικά θετική ή ουδέτερη επίδραση. Σε κάποιες περιπτώσεις ρευστοποιητών LS, μειώθηκε η αντοχή των δοκιμίων.

Τέλος, κατά την εφαρμογή τους στο σκυρόδεμα, όσον αφορά την περιεκτικότητα σε εγκλωβισμένο αέρα του νωπού σκυροδέματος, οι PCE ρευστοποιητές μείωσαν το ποσοστό εγκλωβισμένου αέρα. Ο ρευστοποιητής D 50 είχε τη χειρότερη επίδραση καθώς αύξησε κατακόρυφα το ποσοστό του εγκλωβισμένου αέρα. Οι LS ρευστοποιητές καθώς και οι επιβραδυντές αύξησαν το ποσοστό του εγκλωβισμένου αέρα. Σχετικά με τη θλιπτική αντοχή

του σκυροδέματος, παρατηρήθηκε ότι η προσθήκη των PCE ρευστοποιητών δεν είχε αρνητική επίδραση, ενώ οι LS ρευστοποιητές μείωσαν ελαφρώς τις θλιπτικές αντοχές. Ο επιβραδυντής RTC 15 ήταν ο μοναδικός που είχε θετική επίδραση καθώς αύξησε τις αντοχές κατά 10% περίπου. Η προσθήκη των ρευστοποιητών οδήγησε κυρίως σε μείωση του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης. Μοναδική εξαίρεση αποτέλεσε η σύνθεση με τον επιβραδυντή RTC 15, η οποία παρουσίασε αύξηση της τριχοειδούς απορρόφησης σε ποσοστό 14.46% σε σύγκριση με το αμιγές σκυρόδεμα. Τέλος, παρατηρήθηκε μείωση του ανοικτού πορώδους σε όλες τις συνθέσεις σε σχέση με το αμιγές σκυρόδεμα σε ποσοστά από 0.13 έως 11.36 %.

**Λέξεις κλειδιά:** Τσιμέντο, κονίαμα, σκυρόδεμα, ρεολογία, ρευστοποιητής, επιβραδυντής

## **Abstract**

The performance of the concrete is greatly characterized by its rheological and mechanical properties. In this dissertation, the rheological and mechanical behavior of concrete with polycarboxylate and lignosulphonate superplasticizers is studied. It is also studied, the effect of superplasticizers in cement pastes and mortars..

The experiments were performed initially to pastes, mortars, and finally to the concrete. The syntheses were common for each category of experiments, and they were varied in the type and addition percentage of the superplasticizers.

Based on the results and regarding to the slump test of cement pastes, it was observed that the rates of superplasticizers' addition ranged, at low values for PCE superplasticizers as it was expected and at tenfold values for LS superplasticizers. In the delayed slump test, the fluidity of cement pastes with superplasticizers was benefited, while for the retarders their direct addition proved to be necessary. In the time-dependent slump test, a smooth reduction of the spread was observed over time. The only exception was of the retarder HR 50, which significantly increased the spread. Regarding the determination of setting time, the PCE superplasticizers had an insignificant effect on the setting time. However, pastes with LS superplasticizers showed a delayed setting, while those with retarders showed an immediate setting. Finally, low rates of segregation (<5%) were observed in the pastes with PCE superplasticizers and retarder HR 50. The pastes with LS retarders were set immediately, while those with LS superplasticizers showed pseudo setting behavior.

Concerning the compressive strength of mortars, it is observed that the addition of PCE superplasticizers had generally positive or neutral effect. Only some types of LS superplasticizers decreased the compressive strength.

Finally, regarding the air content of the fresh concrete, the PCE superplasticizers reduced the percentage of entrapped air. The superplasticizer D 50 had the worst effect, as it sharply increased the percentage of entrapped air. The LS superplasticizers and retarders increased the percentage of entrapped air. As to the compressive strength of the concrete, the addition of PCE superplasticizers had no negative effect, while the LS superplasticizers slightly reduced compressive strength. The retarder RTC 15 was the only one that had a positive effect, as it increased its strength about 10%. The addition of superplasticizers led mainly to reduction of sorptivity. The only exception was the synthesis of the retarder RTC 15, which it increased the rate of sorptivity at 14.46% compared to pure concrete. Finally,

reduction of the open porosity was observed in all syntheses compared to the reference concrete mixture, at rates varied from 0.13 up to 11.36%.

**Keywords:** Cement, mortar, concrete, rheology, plasticizer, retarder.

## ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	1
1.1 Σκυρόδεμα.....	1
1.1.1. Γενικά.....	1
1.1.2 Πρώτες ύλες σκυροδέματος .....	2
1.1.2.1. Το τσιμέντο .....	2
1.1.2.2. Τα αδρανή υλικά .....	2
1.1.2.3. Το νερό ανάμειξης.....	3
1.1.2.4. Πρόσμικτα.....	4
1.1.2.5. Πρόσθετα.....	5
1.2 Ρευστοποιητές .....	6
1.2.1 Γενικά.....	6
1.2.2 Είδη και κατηγορίες .....	6
1.2.3 Η Εμφάνιση των υπερρευστοποιητών και η εξέλιξή τους .....	11
1.2.4 Μηχανισμός Δράσης .....	12
1.2.4.1 Ηλεκτροστατική άπωση .....	13
1.2.4.2 Στερεοχημική παρεμπόδιση .....	14
1.2.4.3 Συνάφεια στερεού-υγρού.....	14
1.2.5 Επίδραση των ρευστοποιητών στην εργασιμότητα.....	14
1.2.5.1 Εργασιμότητα και ρεολογικές παράμετροι .....	14
1.2.5.2 Επίδραση των ρευστοποιητών στην αρχική εργασιμότητα.....	14
1.2.5.3 Επίδραση των ρευστοποιητών στη διατήρηση της εργασιμότητας.....	15
1.2.6 Επίδραση των ρευστοποιητών στο πορώδες .....	17
1.2.6.1 Επίδραση των πολυκαρβοξυλικών ρευστοποιητών (PCE) .....	17
1.2.6.2 Επίδραση των σουλφονιωμένων συμπτυκνωμάτων ναφθαλίνης-φορμαλδεΰδης (SNF)....	17
1.2.6.3 Επίδραση των λιγνοσουλφονικών ρευστοποιητών (LS).....	18
1.3 Βιβλιογραφική Ανασκόπηση.....	19



2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	27
2.1 Τοποθέτηση του αντικειμένου .....	27
2.2 Υλικά, πειραματικές μέθοδοι και διατάξεις .....	27
2.2.1 Υλικά.....	27
2.2.2 Παρασκευή μειγμάτων .....	28
2.2.2.1 Παρασκευή πάστας τσιμέντου .....	28
2.2.2.2 Παρασκευή κονιάματος.....	29
2.2.2.3 Παρασκευή σκυροδέματος.....	30
2.2.3 Πειραματική μελέτη των χαρακτηριστικών των μειγμάτων με ρευστοποιητές.....	33
2.2.3.1 Πάστες και κονιάματα.....	33
2.2.3.2 Σκυρόδεμα.....	37
2.3 Σχολιασμός – Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων.....	39
2.3.1 Πάστες και κονιάματα.....	39
2.3.2 Σκυρόδεμα.....	50
3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	58
Βιβλιογραφία.....	60

## Κατάλογος πινάκων

<b>Πίνακας 1:</b> Τυπικές επιδράσεις των πρόσμικτων μείωσης νερού.	6
<b>Πίνακας 2:</b> Κατηγορίες κατά ASTM 494-2.	7
<b>Πίνακας 3:</b> Κωδικοποίηση υπερρευστοποιητών.	28
<b>Πίνακας 4:</b> Σύσταση συνθέσεων παστών τσιμέντου.	29
<b>Πίνακας 5:</b> Σύνθεση κονιαμάτων.	30
<b>Πίνακας 6:</b> Είδος, πλήθος και διαστάσεις κάθε μήτρας.	30
<b>Πίνακας 7:</b> Σύνθεση σκυροδέματος.	31
<b>Πίνακας 8:</b> Είδος, πλήθος και διαστάσεις κάθε μήτρας.	31
<b>Πίνακας 9:</b> Προδιαγραφές της δοκιμής κάθισης, σύμφωνα με τι EN 12350-2.	31
<b>Πίνακας 10:</b> Ποσοστά περιεκτικότητας ρευστοποιητή (% , κ.β. τσιμέντου).	35
<b>Πίνακας 11:</b> Δοκιμές εξάπλωσης και προσδιορισμός ποσότητας νερού P0.	39
<b>Πίνακας 12:</b> Εξάπλωση και προσδιορισμός ποσότητας ρευστοποιητή.	40
<b>Πίνακας 13:</b> Εξάπλωση και προσδιορισμός ποσότητας ρευστοποιητή στη μεθύτερη προσθήκη.	42
<b>Πίνακας 14:</b> Χρονικά εξαρτώμενη (time-dependent) εξάπλωση.	44
<b>Πίνακας 15:</b> Προσδιορισμός εξάπλωσης και χρόνου πήξης παστών τσιμέντου.	46
<b>Πίνακας 16:</b> Εξάπλωση και ποσοστό διαχωρισμού παστών τσιμέντου.	47
<b>Πίνακας 17:</b> Θλιπτική αντοχή πρισματικών δοκιμίων σε ηλικία 2,7 και 28 ημερών και μέση τιμή (M.T) της κάθε σύνθεσης.	48
<b>Πίνακας 18:</b> Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος όλων των συνθέσεων.	50
<b>Πίνακας 19:</b> Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος.	51
<b>Πίνακας 20:</b> Θλιπτική αντοχή κυβικών δοκιμίων σε ηλικία 7 και 28 ημερών και μέση τιμή (M.T) της κάθε σύνθεσης.	52
<b>Πίνακας 21:</b> Αποτελέσματα δοκιμής τριχοειδούς απορρόφησης.	55
<b>Πίνακας 22:</b> Πειραματικές μετρήσεις ανοικτού πορώδους για όλα τα δοκίμια.	56
<b>Πίνακας 23:</b> Αποτελέσματα ανοικτού πορώδους.	57

## Κατάλογος εικόνων

<b>Εικόνα 1:</b> (α) συμπτυκνώματα μελαμίνης-φορμαλδεΐδης (SMF), (β) συμπτυκνώματα ναφθαλίνης- φορμαλδεΐδης (SNF), (γ) επαναλαμβανόμενη μονάδα λιγνοσουλφονικού μορίου (LS), μοριακή δομή πολυκαρβοξυλικών, [(γ), Hewlett, 1998, (α, β, δ), Borregaard admixture handbook, 2006]	8
<b>Εικόνα 2:</b> (α) Κροκίδωση των σωματιδίων τσιμέντου και δέσμευση νερού ανάμειξης (β) Διάσπαση συσσωματωμάτων τσιμέντου λόγω της δράσης των ρευστοποιητών και απελευθέρωση του νερού (Law, 2004).	13
<b>Εικόνα 3:</b> Άπωση των σωματιδίων τσιμέντου λόγω (α) ηλεκτροστατικής άπωσης (β) στερεοχημικής παρεμπόδισης. (Ramachandran et al, 1998)	14
<b>Εικόνα 4:</b> Απεικόνιση της δοκιμής κάθισης. (Κόλιας Στ. 2013-2014)	32
<b>Εικόνα 5:</b> Συσκευής μέτρησης εγκλωβισμένου άερα, με τη μέθοδο εξισορρόπησης πίεσης. (Sica Hellas A.B.E.E, 2007)	32
<b>Εικόνα 6:</b> Αναδευτήρας.	34
<b>Εικόνα 7:</b> Κώνος Vicat.	34
<b>Εικόνα 8:</b> Εκτέλεση δοκιμών κάθισης.	34
<b>Εικόνα 9:</b> Πειραματική διάταξη και εκτέλεση του προσδιορισμού χρόνου πήξης.	35
<b>Εικόνα 10:</b> Πειραματική διάταξη και εκτέλεση του διαχωρισμού.	36
<b>Εικόνα 11:</b> Εκτέλεση μετρήσεων για τον προσδιορισμό της τριχοειδούς απορρόφησης.	37
<b>Εικόνα 12:</b> Μέτρηση βάρους υπό αιώρηση.	
<b>Εικόνα 13:</b> Ποσοστά (%) ρευστοποιητών από τη δοκιμή κάθισης.	41
<b>Εικόνα 14:</b> Μέση τιμή δομικών εξάπλωσης (delayed addition).	42
<b>Εικόνα 15:</b> Εκτέλεση δοκιμής εξάπλωσης ετεροχρονισμένης προσθήκης ρευστοποιητή πάστας P2.	43
<b>Εικόνα 16:</b> Εκτέλεση δοκιμής εξάπλωσης ετεροχρονισμένης προσθήκης ρευστοποιητή πάστας P2.	43
<b>Εικόνα 17:</b> Μεταβολή εξάπλωσης με το χρόνο στη δοκιμή της χρονικά εξαρτώμενης (time-dependent) εξάπλωσης. (ρευστοποιητές)	44
<b>Εικόνα 18:</b> Μεταβολή εξάπλωσης με το χρόνο στη δοκιμή της χρονικά εξαρτώμενης (time-dependent) εξάπλωσης. (επιβραδυντές)	45
<b>Εικόνα 19:</b> Χρόνος πήξης παστών τσιμέντου.	46
<b>Εικόνα 20:</b> Μέση τιμή θλιπτικής αντοχής πρισματικών δοκιμίων στις 2, 7 και 28 ημέρες.	49

<b>Εικόνα 21:</b> Μέση τιμή θλιπτικής αντοχής κυβικών δοκιμίων στις 7 ημέρες.	53
<b>Εικόνα 22:</b> Μέση τιμή θλιπτικής αντοχής κυβικών δοκιμίων στις 28 ημέρες.	53
<b>Εικόνα 23:</b> Διάγραμμα απορρόφησης νερού συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου, για το δοκίμιο C0 A.	54
<b>Εικόνα 24:</b> Τριχοειδής απορρόφηση S (mm/min <sup>0.5</sup> ) ανά σύνθεση.	55
<b>Εικόνα 25:</b> Ανοικτό πορώδες OP (%) για κάθε σύνθεση.	57

## 1. ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 1.1 Σκυρόδεμα

#### 1.1.1. Γενικά

Το σκυρόδεμα είναι ένα τεχνητό δομικό υλικό που προκύπτει από την ανάμειξη τσιμέντου, αδρανών και νερού. Χρησιμοποιείται με ένα εκτεταμένο εύρος κατηγορίας αντοχών για να καλύψει τις διαφορετικές απαιτήσεις των κατασκευαστικών έργων. Η προδιαγραφή των ιδιοτήτων του σκυροδέματος, εξαρτάται από το είδος της κατασκευής, το περιβάλλον που θα εκτεθεί και την ειδική χρήση που πιθανώς θα έχει. Οι ιδιότητες του σκυροδέματος εξαρτώνται από τη μεθοδολογία της παρασκευής του, την ποιότητα των πρώτων υλών του και χαρακτηρίζονται σε μεγάλο βαθμό από τη βασική του ιδιότητα που είναι η αντοχή του σε θλίψη. Η υψηλή αντοχή και η ανθεκτικότητά του σκυροδέματος, καθώς επίσης το χαμηλό του κόστος και η μεγάλη και άμεση διαθεσιμότητα των συστατικών του, το καθιστούν το πιο διαδεδομένο δομικό υλικό παγκοσμίως.

Συνεπώς, υπάρχουν πολλοί παράγοντες που καθορίζουν την ποιότητα του σκυροδέματος. Για την προτυποποίηση του σκυροδέματος ακολουθούνται συγκεκριμένες αρχές και εφαρμόζονται πρότυπες δοκιμασίες. Η βασική ορολογία του σκυροδέματος αναφέρεται στο:

- Νωπό σκυρόδεμα είναι το σκυρόδεμα που μόλις έχει παρασκευασθεί περιέχοντας όλα τα συστατικά του και το οποίο είναι ακόμα σε ρευστή-πλαστική κατάσταση ώστε μπορεί να συμπτυκνωθεί και να μορφοποιηθεί στα καλούπια, διατηρώντας την ομοιογένειά του.
- Σκληρυμένο σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται το σκυρόδεμα που έχει στερεοποιηθεί και έχει αναπτύξει μηχανικές αντοχές.
- Επιτόπου παρασκευασμένο σκυρόδεμα είναι αυτό που δημιουργείται στον τόπο της εφαρμογής.
- Έτοιμο σκυρόδεμα είναι αυτό που έχει παρασκευασθεί σε ένα σταθερό ή κινούμενο αναμικτήρα και προσάγεται φρέσκο στον τόπο της εφαρμογής του.

## 1.1.2. Πρώτες ύλες σκυροδέματος

### 1.1.2.1. Το τσιμέντο

Το τσιμέντο είναι μια υδραυλική κονία, δηλαδή ένα λεπτοαλεσμένο ανόργανο υλικό, το οποίο όταν αναμειχθεί με νερό σχηματίζει μια πάστα που λόγω των αντιδράσεων ενυδάτωσης πήζει και σκληραίνει έχοντας έκτοτε την ικανότητα να διατηρεί τις αντοχές της και τη σταθερότητα της ακόμα και κάτω από το νερό.

Τα κύρια συστατικά για την παραγωγή του τσιμέντου είναι ο ασβεστόλιθος και η άργιλος. Αυτά τα δυο υλικά αν ψηθούν σε υψηλή θερμοκρασία (1380-1420°C) σχηματίζουν μια ουσία σε μορφή πετρώματος, το λεγόμενο κλίνκερ. Το κλίνκερ, αφού αλεστεί για να αποκτήσει την επιθυμητή κοκκομετρία, και με την προσθήκη γύψου για τον έλεγχο της πήξης, σχηματίζει το τελικό προϊόν, που είναι το τσιμέντο Πόρτλαντ.

Η σημαντικότερη ιδιότητα του τσιμέντου, που το κάνει τόσο χρήσιμο, είναι η χημική του αντίδραση με το νερό, η ενυδάτωση του τσιμέντου. Αποτέλεσμα αυτής, είναι προϊόντα με χαρακτηριστικά πήξης και σκλήρυνσης, όπως και ο τσιμεντοπολτός, ο οποίος αποτελεί τη συνδετική ουσία μεταξύ των αδρανών για την παραγωγή του σκυροδέματος.

### 1.1.2.2. Τα αδρανή υλικά

Αδρανή ονομάζονται τα κοκκώδη υλικά που χρησιμοποιούνται στην παρασκευή του σκυροδέματος και καταλαμβάνουν το 60-80% του συνολικού όγκου. Πρόκειται για υλικά, τα οποία προέρχονται από φυσικά ορυκτά πετρώματα και έχουν υποστεί μείωση μεγέθους με φυσικό ή τεχνητό τρόπο. Εάν έχουν υποστεί μείωση με φυσικό τρόπο τα ονομάζουμε φυσικά αδρανή και αν έχουν υποστεί μείωση μεγέθους μέσω διαφόρων θραυστήρων ονομάζονται τεχνητά. Διακρίνονται σε κανονικού βάρους με πυκνότητα σωματιδίων μεταξύ 2000 και 3000 Kg/m<sup>3</sup> όταν προσδιορίζονται σύμφωνα με το πρότυπο EN 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 3000 Kg/m<sup>3</sup>.

Για αδρανή υλικά μπορούν να χρησιμοποιηθούν θεωρητικά οποιαδήποτε υλικά συγκεντρώνουν τις τρεις βασικές απαιτήσεις: επαρκή αντοχή, επαρκή πρόσφυση και χημική ανεκτικότητα με την τσιμεντοκονία. Τα καταλληλότερα πετρώματα είναι τα ασβεστολιθικά ή τα πυριτικά.

Τα κύρια χαρακτηριστικά των αδρανών που επηρεάζουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος είναι: η αντοχή τους (αντοχή του μητρικού πετρώματος), η καθαρότητα (η ύπαρξη δηλαδή ή όχι πρόσμικτων ουσιών), η πρόσφυση με την κονία, η χημική συμπεριφορά τους με άλλα συστατικά του σκυροδέματος, η κοκκομετρική τους διαβάθμιση, (σχήμα και μέγεθος των κόκκων) και η θλιπτική αντοχή τους.

Η επιλογή των αδρανών για τη χρήση τους στο σκυρόδεμα είναι καθοριστικής σημασίας, προκειμένου να παραχθεί ένα δομικό υλικό που θα εξασφαλίζει την καλή συμπεριφορά μιας κατασκευής σε δεδομένες συνθήκες. Τα ανθρακικά πετρώματα συγκαταλέγονται μεταξύ των πετρωμάτων που θεωρούνται ως τα πλέον κατάλληλα για την παραγωγή σκυροδέματος, αρκεί να μην περιέχουν βλαπτικά συστατικά (προσμίξεις). Σαν βλαπτικά συστατικά χαρακτηρίζονται ορισμένα ορυκτά ή ουσίες τα οποία, ανάλογα με την ποσότητα και την κατανομή τους, μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά την παραγωγή ενός καλού σκυροδέματος, γιατί εμποδίζουν την ομαλή εξέλιξη της πήξης και της σκλήρυνσης, μειώνουν την πυκνότητα, προκαλούν διογκώσεις, ρηγματώσεις, αποκολλήσεις, ή ευνοούν τη διάβρωση του οπλισμού.

### **1.1.2.3. Το νερό ανάμειξης**

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

Η καταλληλότητα του νερού ανάμειξης εξαρτάται από την προέλευσή του. Σύμφωνα με το πρότυπο EN 1008 έχουμε τις εξής κατηγορίες:

- Πόσιμο νερό: Κατάλληλο για σκυρόδεμα. Δεν απαιτείται έλεγχός του.
- Νερό που έχει ανακτηθεί από επεξεργασία σε βιομηχανίες παραγωγής σκυροδέματος (π.χ. νερά εκπλύσεων). Είναι γενικά κατάλληλο για σκυρόδεμα, αλλά πρέπει να ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις του παραρτήματος Α του προτύπου .
- Υπόγεια ύδατα: Πρέπει να ελεγχθεί η καταλληλότητά τους.
- Νερό φυσικών πόρων και νερό βιομηχανικών διεργασιών. Πρέπει να ελεγχθεί η καταλληλότητά του.

- Θαλασσινό ή υφάλμυρο νερό. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε άοπλο σκυρόδεμα . Δεν είναι κατάλληλο για οπλισμένο ή προεντεταμένο σκυρόδεμα.
- Νερό αποβλήτων: Δεν είναι κατάλληλα για σκυρόδεμα.

#### **Λόγος w/c**

Η τιμή του λόγου του βάρους του νερού (w) προς το βάρος του τσιμέντου (c) έχει μεγάλη σημασία για την τελική ποιότητα του σκυροδέματος.

Μεγάλη τιμή του λόγου μπορεί να σημαίνει τη δημιουργία κενών εντός της μάζας του σκυροδέματος, λόγω παγιδευμένου αέρα ή πλεονάζοντος νερού, άρα και μειωμένη αντοχή. Μικρή τιμή του λόγου σημαίνει αυξημένη αντοχή του σκυροδέματος, όμως και μειωμένη εργασιμότητα.

Σε κάθε περίπτωση, η τιμή του λόγου εξαρτάται και από άλλους παράγοντες, όπως η φυσική υγρασία των αδρανών και οι συνθήκες του περιβάλλοντος της μελλοντικής κατασκευής, όμως δεν πρέπει να είναι μικρότερη από 0.35.

#### **1.1.2.4. Πρόσμικτα**

Ως πρόσμικτα ορίζονται τα χημικά λεπτόκοκκα υλικά, τα οποία προστίθενται σε μικρές ποσότητες σε σχέση με τη μάζα του τσιμέντου, κατά τη διάρκεια της ανάμειξης του σκυροδέματος με σκοπό την τροποποίηση των ιδιοτήτων του νωπού ή του σκληρυμένου σκυροδέματος.

Η κατηγοριοποίηση των πρόσμικτων είναι αρκετά δύσκολη, καθώς μπορεί να δρουν ταυτόχρονα με περισσότερους από ένα τρόπο. Έτσι η κατηγοριοποίησή τους μπορεί να απλουστευθεί ως εξής: α) στα πρόσμικτα που δρουν απευθείας στην επιφάνεια των κόκκων του τσιμέντου και β) στα πρόσμικτα που επηρεάζουν τις αντιδράσεις τσιμέντου και νερού από λίγα λεπτά έως και λίγες ώρες μετά την προσθήκη τους.

α) Πρόσμικτα επιφανειακής δράσης. Χωρίζονται στις εξής υποκατηγορίες:

- Αερακτικά. Δρουν με σκοπό τη δημιουργία και τον εγκλωβισμό φυσαλίδων αέρα στη μάζα του τσιμεντοπολτού. Τα κενά που δημιουργούνται έχουν ως αποτέλεσμα το σκυρόδεμα να είναι πιο ανθεκτικό σε εναλλαγές ψύξης-απόψυξης και να έχει μεγαλύτερη εργασιμότητα.
- Ρευστοποιητικά. Επιβραδύνουν την πήξη, ενώ βελτιώνουν ταυτόχρονα την εργασιμότητα και την αντοχή. Η χρήση του ρευστοποιητικού γίνεται αντί της



προσθήκης νερού, για την επίτευξη της επιθυμητής εργασιμότητας. Έτσι, κρατώντας κατά το δυνατόν χαμηλό το λόγο w/c επιτυγχάνεται υψηλότερη αντοχή και ανθεκτικότητα του σκυροδέματος.

- Υπερρευστοποιητικά. Έχουν την ίδια εργασιμότητα με τα ρευστοποιητικά, όμως αντί για επιβράδυνση προκαλούν επιτάχυνση της πήξης και μεγαλύτερα ρευστότητα (3-4 φορές περισσότερο) από τα απλά ρευστοποιητικά.

β) Πρόσμικτα ελέγχου της πήξης. Χωρίζονται στις εξής υποκατηγορίες:

- Επιταχυντικά πήξης. Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις έργων χαμηλής θερμοκρασίας περιβάλλοντος ή μικρού χρόνου περάτωσης. Αποτέλεσμα της χρήσης τους είναι η αύξηση της θερμοκρασίας του μίγματος, η αύξηση της συστολής ξήρανσης και σε ορισμένες περιπτώσεις η μείωση της αντοχής του σκυροδέματος.
- Επιβραδυντικά πήξης. Χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις έργων υψηλής θερμοκρασίας περιβάλλοντος ή όταν απαιτείται επιβράδυνση του ρυθμού ενυδάτωσης του σκυροδέματος. Αποτέλεσμα της χρήσης τους μπορεί να είναι η αύξηση της αντοχής του σκυροδέματος, αφού τα επιβραδυντικά λειτουργούν και ως ρευστοποιητικά.
- Στεγανοποιητικά. Χρησιμοποιούνται για να μειώσουν την υδατοπερατότητα του σκυροδέματος.
- Αναστολείς διάβρωσης. Χρησιμοποιούνται για την προστασία του χάλυβα του σκυροδέματος από τη διάβρωση.

#### 1.1.2.5. Πρόσθετα

Ως πρόσθετα ορίζονται τα λεπτομερώς διαμερισμένα ανόργανα υλικά, τα οποία χρησιμοποιούνται με στόχο είτε τη βελτίωση κάποιων ιδιοτήτων του, είτε την επίτευξη κάποιων άλλων συγκεκριμένων ιδιοτήτων.

Σύμφωνα με το πρότυπο EN 206-1 τα πρόσθετα χωρίζονται στις εξής κατηγορίες:

- Τύπου I. Είναι τα σχεδόν αδρανή πρόσθετα, όπου υπάγονται τα φύλλερ αδρανών, με προδιαγραφές σύμφωνες με το EN 12620, και τα χρώματα.
- Τύπου II. Είναι τα πρόσθετα που έχουν ποζολανικές ή λανθάνουσες υδραυλικές ιδιότητες. Εδώ υπάγονται οι ιπτάμενες τέφρες σύμφωνα με το EN 450, η πυριτική παιπάλη κατά EN 13263 και η σκωρία υψικαμίνου σύμφωνα με το EN 15167.

## 1.2 Ρευστοποιητές

### 1.2.1. Γενικά

Οι ρευστοποιητές είναι τα πιο διαδεδομένα πρόσμικτα μείωσης νερού της σύνθεσης σκυροδέματος, η μείωση του οποίου έχει ως τεχνολογικό στόχο την επίτευξη επιθυμητών ιδιοτήτων. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν με τους ακόλουθους τρεις τρόπους. Πρώτον, μειώνοντας την ποσότητα νερού και κρατώντας σταθερή την ποσότητα του τσιμέντου. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ένα σημαντικά χαμηλό λόγο νερού / τσιμέντο, που συνεπάγεται τη βελτίωση τόσο της αντοχής όσο και της διαπερατότητας. Δεύτερον, κρατώντας σταθερό το λόγο νερού / τσιμέντο, επιτυγχάνεται αύξηση της εργασιμότητας. Τέλος, μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη μείωση του περιεχομένου τσιμέντου, είτε για οικονομικούς (το τσιμέντο είναι το πιο ακριβό συστατικό στο σκυρόδεμα) είτε για τεχνικούς λόγους (μείωση της θερμότητας ενυδάτωσης του τσιμέντου, ιδιαίτερα όταν πρόκειται για μαζική σκυροδέτηση), διατηρώντας αμετάβλητη την αναλογία νερού / τσιμέντο.

### 1.2.2. Είδη και κατηγορίες

Τα πρόσμικτα μείωσης νερού μπορούν να ταξινομηθούν στα χαμηλής δραστηριότητας ή κανονικά (WRA, ικανότητα μείωσης νερού 5% και πάνω) και στα υψηλής δραστηριότητας (HRWRA, ικανότητα μείωσης νερού 12-30%) (Πίνακας 1), σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C494. Τα υψηλής δραστηριότητας συνήθως αναφέρονται ως υπερρευστοποιητές (SPS). Το Πρότυπο ASTM C494 κατηγοριοποιεί διάφορους τύπους τέτοιων πρόσμικτων ανάλογα με τις λειτουργίες τους. Οι τύποι A, D (επιβράδυνση) και E (επιτάχυνση) είναι πρόσμικτα χαμηλής δραστηριότητας (Πίνακας 1) ενώ οι τύποι F και G (επιβράδυνση) είναι οι υπερρευστοποιητές.

**Πίνακας 1:** Τυπικές επιδράσεις των πρόσμικτων μείωσης νερού (ASTM C494).

Κατηγορία	Κοινή ονομασία	Τυπική δοσολογία (%)	Αύξηση της κάθισης (mm)	Μείωση νερού	
				(%)	w/c
Χαμηλής δραστηριότητας	Κανονικοί (WRA)	0.1	50-85	5-10	-0.05
Μεσαίας δραστηριότητας	Μεσαίου εύρους	0.5	50-100	10-15	-0.10
Υψηλής δραστηριότητας	Υπερρευστοποιητές (SPS)	1.0	>100	15-30	-0.15

**Πίνακας 2:** Κατηγορίες κατά ASTM 494-2.

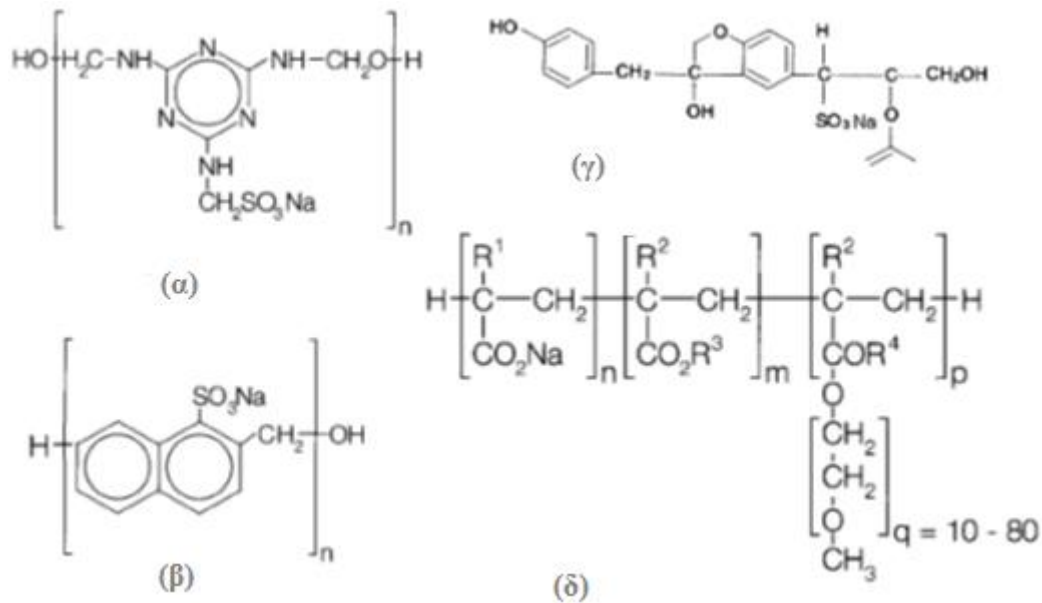
Τύπος πρόσμικτου μείωσης νερού	Λειτουργία πρόσμικτου μείωσης νερού
<b>A</b>	Ρευστοποιητές
<b>D</b>	Ρευστοποιητές και Επιβραδυντές
<b>E</b>	Ρευστοποιητές και Επιταχυντές
<b>F</b>	Υπερρευστοποιητές
<b>G</b>	Υπερρευστοποιητές και Επιβραδυντές

Οι υπερρευστοποιητές είναι πολυμερή που περιέχουν οργανικές σουλφονικές ενώσεις, με γενικό τύπο RSO- 3, όπου το R είναι μία σύνθετη οργανική ομάδα με υψηλό μοριακό βάρος, η οποία συνδέεται σε τακτά διαστήματα με την κύρια αλυσίδα του πολυμερούς (**Verbeck 1968**). Είναι υδατοδιαλυτές οργανικές ενώσεις και από ρεολογικής απόψεως κατατάσσονται στα ιξωδοελαστικά πολυμερή.

Οι υπερρευστοποιητές προσροφώνται από τα σωματίδια του τσιμέντου, ενώ τα προϊόντα της ενυδάτωσης του, όπως το υδροξείδιο του ασβεστίου (CH) και το ένυδρο πυριτικό ασβέστιο (C-S-H), απορροφούν ακόμα περισσότερο μόρια υπερρευστοποιητών. Ο ρυθμός προσρόφησης των υπερρευστοποιητών επηρεάζεται από αρκετούς παράγοντες όπως η ποσότητα του C<sub>3</sub>A, η περιεκτικότητα σε διαλυτά θειικά, και η λεπτότητα του τσιμέντου.

Οι υπερρευστοποιητές δεν προκαλούν εγκλωβισμό αέρα και δεν έχουν επιβραδυντική δράση. Δεν προκαλούν εγκλωβισμό αέρα, γιατί δεν καθιστούν υδρόφοβα τα σωματίδια του τσιμέντου. Ομοίως δεν επιβραδύνουν την ενυδάτωση γιατί αφομοιώνονται από τα σωματίδια του τσιμέντου (**Taylor, 1997**).

Από πλευρά σύνθεσης και με βάση το κύριο συστατικό, υπάρχουν τέσσερις μεγάλες κατηγορίες υπερρευστοποιητών: σουλφονιωμένα συμπκνώματα μελαμίνης-φορμαλδεΐδης (SMF), σουλφονιωμένα συμπκνώματα ναφθαλίνης- φορμαλδεΐδης (SNF), τροποποιημένοι λιγνοσουλφονικοί (MLS) και υπερρευστοποιητές με βάση πολυκαρβοξυλικού εστέρα (PCE). Οι μοριακές δομές τους φαίνονται στην **Εικόνα 1**. Για δεκαετίες, οι λιγνοσουλφονικοί (LS) ήταν από τους πιο συχνά χρησιμοποιούμενους μειωτές νερού στη βιομηχανία σκυροδέματος παγκοσμίως λόγω των ανταγωνιστικών τιμών τους και των επιδόσεων τους.



**Εικόνα 1:** Μοριακή δομή ρευστοποιητών: (α) συμπυκνώματα μελαμίνης-φορμαλδεΐδης (SMF), (β) συμπυκνώματα ναφθαλίνης- φορμαλδεΐδης (SNF), (γ) επαναλαμβανόμενη μονάδα λιγνοσουλφονικού μορίου (LS), μοριακή δομή πολυκαρβοξυλικών, [(γ), Hewlett, 1998, (α, β, δ), Borregaard admixture handbook, 2006]

- **Τροποποιημένοι λιγνοσουλφονικοί ρευστοποιητές (MLS)**

Οι τροποποιημένοι λιγνοσουλφονικοί ρευστοποιητές είναι υψηλότερου μοριακού βάρους λιγνοσουλφονικοί ρευστοποιητές, οι οποίοι είναι σημαντικά βελτιωμένοι εξαιτίας της επεξεργασίας του ακατέργαστου υποπροϊόντος για την απομάκρυνση των προσμίξεων υδατάνθρακα. Αν και η διαδικασία δύλισης μπορεί να βελτιώσει την απόδοση των λιγνοσουλφονικών, τους κάνει επίσης πιο επιρρεπείς στον εγκλωβισμό αέρα (**Hewlett, 1998**).

Ο **Ramachandran (1995)** σχολίασε ότι οι προσαρμοσμένοι λιγνοσουλφονικοί ρευστοποιητές μπορούν να χαρακτηριστούν ως υπερρευστοποιητές, αν λυθούν κάποια προβλήματα που σχετίζονται με τη χρήση τους. Επισήμανε επίσης, πως το σκυρόδεμα με υψηλή δόση λιγνοσουλφονικού ρευστοποιητή θα παρουσίαζε χαμηλότερη πρώιμη θλιπτική αντοχή, κάτι που θα μπορούσε να αντισταθμιστεί με τη χρήση συμβατικών επιταχυντών.

Τυπικά, τα πρόσμικτα που έχουν λιγνοσουλφονική βάση έχουν μια πιο επιβραδυντική δράση από άλλους τύπους πρόσμικτων. Γενικά, όσο μεγαλύτερη είναι η περιεκτικότητα σε σάκχαρα στα πρόσμικτα, τόσο μεγαλύτερους χρόνους πήξης παρουσιάζουν (**Ramachandran, 1995**). Η εργασιμότητα του σκυροδέματος μειώνεται με το χρόνο, φαινόμενο γνωστό και ως απώλεια κάθισης. Τα ποσοστά απώλειας κάθισης είναι διαφορετικά για σκυροδέματα που

περιέχουν πρόσμικτα με λιγνοσουλφονική, ναφθαλινική και πολυκαρβοξυλική βάση. Ως εκ τούτου, σκυροδέματα που περιέχουν διαφορετικά πρόσμικτα μείωσης νερού έχουν διαφορετικούς χρόνους πήξης.

Τα πρόσμικτα μείωσης νερού μπορούν επίσης να επηρεάσουν την ενυδάτωση του τσιμέντου καθώς και την άνοδο της θερμοκρασίας στο σκυροδέμα. Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η μικροδομή της πάστας του τσιμέντου και του σκυροδέματος μπορεί να επηρεάζεται από τη χρήση διαφορετικών ειδών πρόσμικτων, η οποία με τη σειρά της θα επηρεάσει τις μηχανικές ιδιότητες, τη διαπερατότητα και την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος.

- **Σουλφονιωμένα συμπυκνώματα μελαμίνης/ναφθαλίνης-φορμαλδεΐδης (SMF/SNF)**

Σουλφονιωμένα συμπυκνώματα μελαμίνης-φορμαλδεΐδης (SMF) αναπτύχθηκαν για πρώτη φορά στη Γερμανία και διατέθηκαν στο εμπόριο τη δεκαετία του 1960. Περίπου την ίδια εποχή, σουλφονιωμένα συμπυκνώματα ναφθαλίνης-φορμαλδεΐδης (SNF) αναπτύχθηκαν για πρώτη φορά στην Ιαπωνία. Και οι δύο υπερρυστοποιητές είναι γραμμικά ανιονικά πολυμερή με σουλφονικές ομάδες και συγκεκριμένη περιοδικότητα. Και οι δύο τύποι υπερρυστοποιητών τείνουν να δίνουν 16 έως 25% μείωση του νερού. Σε σύγκριση με τους SNF, οι SMF διαθέτουν υψηλότερο μοριακό βάρος. Οι υπερρυστοποιητές με βάση τη μελαμίνη έχουν την τάση να μειώνουν τη συνοχή στο μείγμα, προκαλώντας μικρή ή καθόλου καθυστέρηση, γεγονός που τους κάνει αποτελεσματικούς σε χαμηλές θερμοκρασίες ή όπου οι πρώιμες αντοχές είναι κρίσιμες (Newman και Choo, 2003). Από την άλλη πλευρά, τα SNF τείνουν να αυξάνουν τον εγκλωβισμένο αέρα ώστε να παρέχουν συνοχή και επίσης καθυστερούν περισσότερο την ενυδάτωση του τσιμέντου από ότι οι SMF ρυστοποιητές (Newman και Choo, 2003).

- **Υπερρυστοποιητές με πολυκαρβοξυλική βάση (PCE)**

Ένας άλλος κοινός τύπος υπερρυστοποιητών είναι αυτός με πολυκαρβοξυλική βάση. Υπάρχουν πολυκαρβοξυλικά χωρίς συνδεδεμένες αλυσίδες (graft chains), αλλά η ικανότητα διασποράς τους είναι συνήθως περιορισμένη και έτσι αυτό το είδος πρόσμικτου δεν χρησιμοποιείται ευρέως (Hanehara και Yamada, 2007).

Μπορούν να μειώσουν το νερό περίπου 20 έως 35%, διατηρώντας την εργασιμότητα. Είναι πολύ ισχυροί μειωτές νερού και έτσι χρησιμοποιούνται σε χαμηλή δόση (Newman και

**Choo, 2003**). Είναι ουσιαστικά σχεδιασμένοι για την υψηλή ικανότητα διασποράς και την υψηλή διατήρηση εργασιμότητας. (**Houston et al, 2005**). Οι υπερρρευστοποιητές θα μπορούσαν να ταξινομηθούν περαιτέρω σε ομοπολυμερή ή συμπολυμερή. Αυτή η ταξινόμηση σχετίζεται με την κύρια αλυσίδα του πολυμερούς.

Στα ομοπολυμερή, η κύρια δομική μονάδα, αποτελείται από ένα μόνο είδος μονομερούς, ενώ στα συμπολυμερή αποτελείται από δύο τύπους μονομερών. Και οι δύο τύποι υπερρρευστοποιητών έχουν πλευρικές αλυσίδες που αποτελούνται από πολυαιθέρες. Η εισαγωγή των πολυαιθερικών πλευρικών αλυσίδων βελτιώνει τις επιδόσεις των υπερρρευστοποιητών, οι οποίοι παρουσιάζουν ιδιαίτερη μείωση νερού σε χαμηλή δοσολογία.

Οι **Li et al (2005)** ανέφεραν επίσης ότι οι ιδιότητες της υψηλής διασποράς και της διατήρησης της ρευστότητας των υπερρρευστοποιητών PCE εξαρτώνται από το μήκος των πλευρικών αλυσίδων που λειτουργούν μέσω της στερεοχημικής απωστικής δύναμης. Ομοίως οι **Sugamata et al (2003)** αναφέρουν ότι η διατήρηση της εργασιμότητας, εξαρτάται από την ποσότητα του PCE υπερρρευστοποιητή που προσροφάται από τα σωματίδια του τσιμέντου και από την ύπαρξη των πλευρικών αλυσίδων των μορίων PCE που επεκτείνονται για να σχηματίζουν ένα παχύ στρώμα στα σωματίδια τσιμέντου, εξασφαλίζοντας περαιτέρω την απόθεση.

Οι υπερρρευστοποιητές με πολυκαρβοξυλική βάση χρησιμοποιούνται συνήθως σε δοσολογία μέχρι περίπου 1% κατά βάρος του τσιμέντου. Μπορούν να μειώσουν ουσιαστικά την ποσότητα του αέρα που εγκλωβίζεται με αποτέλεσμα τη μεγαλύτερη ρευστότητα του μείγματος (**Taylor, 1997**). Όταν χρησιμοποιηθεί υπερδοσολογία των υπερρρευστοποιητών, μπορεί να παρατηρηθούν ανεπιθύμητες επιπτώσεις όπως υπερβολική καθυστέρηση και υπερβολική απώλεια κάθισης.

Οι υπερρρευστοποιητές με πολυκαρβοξυλική βάση μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν μαζί με άλλα ορυκτά πρόσμικτα ώστε να παράγουν υψηλότερης ποιότητας σκυρόδεμα. Αρκετοί διαφορετικοί τύποι χημικών και ορυκτών προσμίξεων όπως ιπτάμενη τέφρα, σκωρία υψικαμίνων, επιβραδυντές, επιταχυντές και αερακτικά είναι συμβατοί με αυτούς τους υπερρρευστοποιητές (**Ramachandran et al, 1998**). Έχει αναφερθεί ότι οι πολυκαρβοξυλικοί υπερρρευστοποιητές εξασφαλίζουν υψηλή πλαστικότητα σε δοσολογίες που πλησιάζουν περίπου το ένα τρίτο των συμβατικών SNF υπερρρευστοποιητών (**Faliman et al, 2005**).

### 1.2.3. Η Εμφάνιση των υπερρυστοποιητών και η εξέλιξή τους

Η ανάπτυξη των υπερρυστοποιητών είναι μία σημαντική ανακάλυψη των τελευταίων δεκαετιών που έχει ουσιαστική επίδραση στην παραγωγή και χρήση του σκυροδέματος με το πέρασμα των χρόνων. Αυτό φαίνεται και στην ανάπτυξη και τη χρήση μίας συνεχώς αυξανόμενης κατηγορίας προϊόντων υψηλής ρευστότητας, όπως το σκυρόδεμα με παρατεταμένη χρονικά ρευστότητα, το σκυρόδεμα υψηλής απόδοσης με ιπτάμενη τέφρα και σκωρία, το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα, το σκυρόδεμα υποβρύχιας σκυροδέτησης.

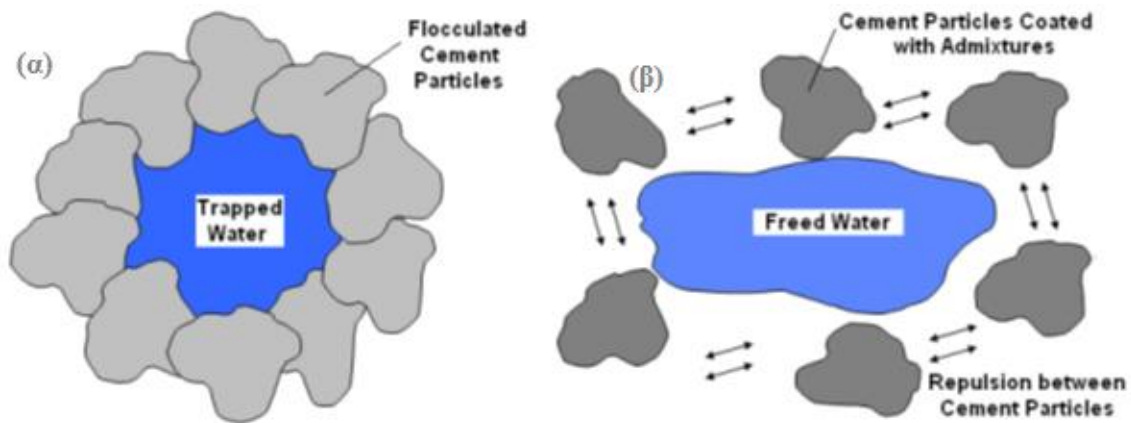
Στο τέλος της δεκαετίας του '60, προϊόντα βασισμένα σε σουλφονικά ναφθαλίνης αναπτύχθηκαν στην Ιαπωνία, και ταυτόχρονα τα προϊόντα σουλφονικών μελαμινών πρωτοπαρουσιάστηκαν στη Δυτική Γερμανία. Στις ΗΠΑ έκαναν την εμφάνιση τους αργότερα στα μέσα της δεκαετίας του '70. Σύμφωνα με τον **S. Nagataki**, οι πρώτες εφαρμογές του σκυροδέματος υψηλής ρευστότητας στην Ιαπωνία, ήταν για την παραγωγή σκυροδέματος κατάλληλου για την προκατασκευή.

Στα μείγματα υπερρυστοποιητών που περιέχουν σουλφονικά ναφθαλίνης ή μελαμίνης, η επίδραση τους διαρκεί μόνο 30 με 60 λεπτά και στη συνέχεια σημειώνεται γρήγορη απώλεια ρευστότητας. Έτσι ενώ παρατηρείται μεγάλη αύξηση της ρευστότητας του μείγματος για τα πρώτα 5 με 10 λεπτά μετά την προσθήκη του ρυστοποιητή, ακολουθεί γρήγορη απώλεια ρευστότητας, η οποία εξαρτάται από το είδος του ρυστοποιητή που έχει χρησιμοποιηθεί. Σε μια μελέτη της συμπεριφοράς του φρέσκου σκυροδέματος που περιέχει ρυστοποιητές και υπερρυστοποιητές, οι **Whiting** και **Dziedzic (1989)** διαπίστωσαν ότι η απώλεια ρευστότητας με το χρόνο είναι πολύ πιο γρήγορη στους υπερρυστοποιητές, από ότι στους απλούς ρυστοποιητές. Για την αντιμετώπιση του προβλήματος αυτού το 1986, αναπτύχθηκαν στην Ιαπωνία υπερρυστοποιητές "μακράς διάρκειας". Σύμφωνα με τον **A. Yonezawa**, ένας χαρακτηριστικός "μακράς διάρκειας" υπερρυστοποιητής περιέχει μια αδιάλυτη στο νερό ένωση που περιλαμβάνει καρβοξυλικά όξινα άλατα, αμίδιο, και καρβοξυλικό ανυδρίτη. Το αλκαλικό διάλυμα που είναι αποτέλεσμα ενυδάτωσης του τσιμέντου Πόρτλαντ, υδρολύει σταδιακά τον υπερρυστοποιητή και έτσι επιτυγχάνεται η διατήρηση της ρευστότητας. Σήμερα, οι "μακράς διάρκειας" υπερρυστοποιητές βασισμένοι σε σουλφονικά πολυμερή ναφθαλίνης ή μελαμινών μπορούν να διατηρήσουν τη ρευστότητά τους για περισσότερο από 2 ώρες.

#### 1.2.4. Μηχανισμός Δράσης

Υπάρχουν τρεις βασικοί μηχανισμοί δράσης που εξηγούν την ικανότητα μείωσης νερού που παρουσιάζουν οι υπερρυστοποιητές. Πρόκειται για την ηλεκτροστατική άπωση, τη στερεοχημική παρεμπόδιση, και τη συνάφεια στερεού-υγρού. Τα λεπτά σωματίδια, όπως οι κόκκοι του τσιμέντου έχουν την τάση να συσσωματώνονται όταν αναμειγνύονται με νερό. Όταν συσσωματώνονται, μια ορισμένη ποσότητα νερού συχνά παγιδεύεται μέσα στα συσσωματώματα που έχουν δημιουργηθεί. Τα πρόσμικτα μείωσης νερού χρησιμοποιούνται για να ελευθερώσουν το παγιδευμένο νερό. Ωστόσο, η επίδραση των εν λόγω πρόσμικτων στη συμπεριφορά του σκυροδέματος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως ο τύπος του τσιμέντου, οι αναλογίες ανάμειξης, η φύση και δοσολογία του πρόσμικτου, η θερμοκρασία και ο χρόνος.

Η παρουσία των υπερρυστοποιητών αποτρέπει την κροκίδωση των σωματιδίων του τσιμέντου, με αποτέλεσμα τόσο την απελευθέρωση του νερού που παγιδεύεται μεταξύ των συσσωματωμάτων του τσιμέντου όσο και την αύξηση της εργασιμότητας του. Χωρίς την ενσωμάτωση αυτών των προσμίξεων, τα θετικά και αρνητικά φορτισμένα σωματίδια του τσιμέντου θα προσελκύνονταν μεταξύ τους, οδηγώντας στη δημιουργία συσσωματωμάτων όπως φαίνεται στην **Εικόνα 2**.



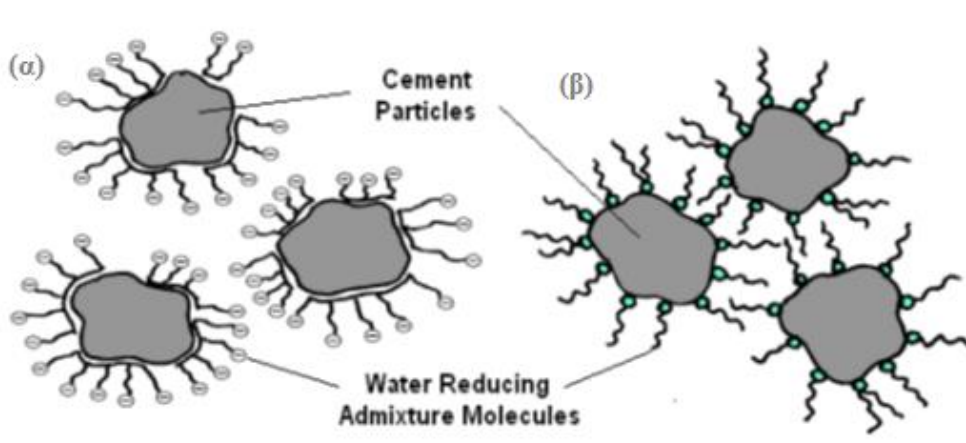
**Εικόνα 2:** (α) Κροκίδωση των σωματιδίων τσιμέντου και δέσμευση νερού ανάμειξης  
(β) Διάσπαση συσσωματωμάτων τσιμέντου λόγω της δράσης των ρυστοποιητών και απελευθέρωση του νερού (Law, 2004).



Η συσσωμάτωση αυτών των σωματιδίων του τσιμέντου παγιδεύει μέρος του νερού ανάμειξης, με αποτέλεσμα τη μείωση του διαθέσιμου νερού για την εργασιμότητα και την ενυδάτωση του τσιμέντου. Με την ενσωμάτωση αυτών των προσμίξεων, η συσσωμάτωση των σωματιδίων του τσιμέντου αποτρέπεται ή ελαχιστοποιείται. Αυτές οι χημικές προσμίξεις είναι επιφανειακής δράσης που όταν απορροφώνται από τα σωματίδια του τσιμέντου, τα φορτίζουν αρνητικά και προκαλούν τη μεταξύ τους απόθεση. Με τη διάσπαση των συσσωματωμάτων τσιμέντου, το παγιδευμένο νερό απελευθερώνεται και είναι πλέον διαθέσιμο για την εργασιμότητα και την ενυδάτωση του τσιμέντου. Με αυτόν τον τρόπο, αυξάνεται επίσης η συνολική ενεργή επιφάνεια των σωματιδίων του τσιμέντου, που εκτίθεται στη διαδικασία της ενυδάτωσης. Γενικά, η δράση των ρευστοποιητών απεικονίζεται σχηματικά στην **Εικόνα 2**.

#### 1.2.4.1. Ηλεκτροστατική άπωση

Η ηλεκτροστατική άπωση είναι αποτέλεσμα του αυξημένου μεγέθους του  $\zeta$  δυναμικού. Ελλείψει των ρευστοποιητών, το συνολικό φορτίο των σωματιδίων του τσιμέντου είναι πολύ χαμηλό για να καθορίσει το  $\zeta$  δυναμικό του διαλύματος. Ωστόσο, με τη χρήση των ρευστοποιητών, το  $\zeta$  δυναμικό αυξάνεται, εξαιτίας της αύξησης των αρνητικών φορτίων στα σωματίδια του τσιμέντου. Όταν όλα αυτά τα σωματίδια του τσιμέντου φέρουν στην επιφάνειά τους επαρκές και ομόσημο φορτίο, απωθούνται μεταξύ τους, με αποτέλεσμα την ηλεκτροστατική άπωση όπως απεικονίζεται στην **Εικόνα 3**.



**Εικόνα 3:** Άπωση των σωματιδίων τσιμέντου λόγω (α) ηλεκτροστατικής άπωσης (β) στεροχημικής παρεμπόδισης. (Ramachandran et al, 1998)

#### 1.2.4.2. Στερεοχημική παρεμπόδιση

Η στερεοχημική παρεμπόδιση, που φαίνεται στην **Εικόνα 3 (β)**, οφείλεται στην προσανατολισμένη προσρόφηση των μορίων των πρόσμικτων που αποδυναμώνουν την έλξη μεταξύ των σωματιδίων του τσιμέντου. Η μία πλευρά των μορίων των προσμίξεων θα πρέπει να προσκολλάται στα σωματίδια του τσιμέντου ενώ η άλλη πλευρά στο νερό. Ως αποτέλεσμα αυτής της προσκόλλησης, μια υδαρής και λιπαρή επικάλυψη σχηματίζεται γύρω από τα σωματίδια του τσιμέντου, αποδυναμώνοντας τις δυνάμεις έλξης μεταξύ τους. Ο μηχανισμός της στερεοχημικής παρεμπόδισης παρατηρείται κυρίως στα πρόσμικτα μείωσης νερού που έχουν διακλαδισμένη μοριακή δομή (**Ramachandran et al, 1998**).

#### 1.2.4.3. Συνάφεια στερεού-υγρού

Η ικανότητα μείωσης νερού αυτών των προσμίξεων θα μπορούσε επίσης να εξηγηθεί από την αύξηση της συνάφειας στερεού-υγρού. Όταν η συνάφεια στερεού-υγρού αυξάνεται εξαιτίας της προσρόφησης των ρευστοποιητών στα σωματίδια του τσιμέντου, αυτά έλκονται περισσότερο από το νερό παρά μεταξύ τους. Έτσι αποτρέπεται η κροκίδωση των σωματιδίων του τσιμέντου.

### 1.2.5. Επίδραση των ρευστοποιητών στην εργασιμότητα

#### 1.2.5.1. Εργασιμότητα και ρεολογικές παράμετροι

Οι ρεολογικές παράμετροι του νωπού σκυροδέματος έχουν μεγάλη σημασία για την κατανόηση της εργασιμότητάς του. Η τάση διαρροής και το πλαστικό ιξώδες είναι δύο ρεολογικές παράμετροι, οι οποίες εξαρτώνται από τη διάρκεια και το ρυθμό εφαρμογής των διατμητικών τάσεων (**Banfill, 2003**). Αυτές επηρεάζονται από τη χρήση χημικών προσμίξεων όπως τα αερακτικά και οι ρευστοποιητές (**Gjornv, 1994**).

#### 1.2.5.2. Επίδραση των ρευστοποιητών στην αρχική εργασιμότητα

Γενικά οι υπερρευστοποιητές μειώνουν σημαντικά την αρχική τάση διαρροής. Οι **Golaszewski** και **Szwabowski (2004)** διαπίστωσαν ότι υπερρευστοποιητές PCE μειώνουν την τάση διαρροής και αυξάνουν το ιξώδες περισσότερο από όσο οι υπερρευστοποιητές SNF στην ίδια αναλογία. Έχει αναφερθεί επίσης πως οι τροποποιημένοι LS παρουσιάζουν

συγκρίσιμη ρευστότητα με τους SNF υπερρρευστοποιητές (Ouyang et al, 2006). Για άοπλο σκυρόδεμα με αναλογία  $w/c=0.40$  ή ακόμα υψηλότερη  $w/c=0.5$ , η αποτελεσματικότητα των PCE και SNF ήταν παρόμοια (Golaszewski και Szwabowski, 2004).

Μείγματα με υπερρρευστοποιητές PCE έχουν γενικά μεγαλύτερη εργασιμότητα από αυτά με ίδια δοσολογία SNF και LS. Η απόδοση των τροποποιημένων LS υπερρρευστοποιητών εξαρτάται από τη διαδικασία τροποποίησης και την περιεκτικότητα σε σάκχαρα καθώς και από το μέσο μοριακό βάρος των προϊόντων. Η απόδοση τους θεωρείται συγκρίσιμη με αυτή των υπερρρευστοποιητών SNF, όσον αφορά στην επίδρασή τους στην αρχική εργασιμότητα του κονιάματος και του σκυροδέματος.

Πολλοί παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν την εργασιμότητα της πάστας τσιμέντου, του κονιάματος και του σκυροδέματος, όπως για παράδειγμα, η χημική σύσταση του τσιμέντου, η φύση και η δοσολογία των προσμίξεων, η θερμοκρασία και η ηλικία. Οι **Lombois-Burger κ.ά. (2006)** διαπίστωσαν ότι η τάση διαρροής των παστών τσιμέντου, ελέγχεται από το ρυθμό προσρόφησης των υπερρρευστοποιητών, η οποία ανταγωνίζεται την προσρόφηση των θεικών που απορροφώνται από τα σωματίδια του τσιμέντου. Ανακάλυψαν ότι όταν χρησιμοποιείται ημιανυδρίτης γύψου, παρατηρείται μια ταχεία μείωση της συγκέντρωσης των θεικών, που έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της προσρόφησης των SNF υπερρρευστοποιητών, η οποία με τη σειρά της οδηγεί σε μικρότερη απώλεια ρευστότητας της πάστας του τσιμέντου. Παρόμοιες παρατηρήσεις έχουν αναφερθεί και από τους **Hanehara και Yamada (1999)**, **Nakajima και Yamada (2004)** και **Zhor (2006)**, οι οποίοι μελέτησαν την επίδραση του είδους της λειτουργικής ομάδας των ρευστοποιητών σε πάστες τσιμέντου και διαπίστωσαν ότι η διασπορά έχει μικρή συσχέτιση με τη σουλφονική ομάδα, ενώ έχει πολύ μεγάλη με την καρβοξυλική.

### 1.2.5.3. Επίδραση των ρευστοποιητών στη διατήρηση της εργασιμότητας

Παρόλο που οι ρευστοποιητές μπορούν να μειώσουν την αρχική τάση διαρροής, η δράση τους φθίνει με το χρόνο και οι πάστες τσιμέντου με ή χωρίς ρευστοποιητές παρουσιάζουν ίδια απώλεια ρευστότητας. Οι **Bjornstrom και Chandra (2003)** ανέφεραν ότι τόσο η τάση διαρροής όσο και το ιξώδες αυξήθηκαν αμέσως μετά την ανάμειξη και για χρόνο 45 λεπτών, για πάστες τσιμέντου με αναλογία  $w/c = 0.3$  και με υπερρρευστοποιητές LS, SNF και PCE. Ωστόσο, καθώς δεν μπορούσε να επιτευχθεί κοινή αρχική τάση διαρροής και καθώς

δεν χρησιμοποιήθηκε ίδια δοσολογία ρευστοποιητών, δεν προκύπτει ασφαλές συμπέρασμα, καθώς η διατήρηση της εργασιμότητας εξαρτάται από την αρχική της τιμή.

Είναι γενικά αποδεκτό ότι το σκυρόδεμα με SNF υπερρευστοποιητή έχει πολύ υψηλή απώλεια κάθισης (**Houst et al, 1999 Ouyang et al, 2006**). Οι **Lim et al (1999)** ανέφεραν ότι οι πάστες τσιμέντου με SNF υπερρευστοποιητή χάνουν πάνω από το 50% της αρχικής κάθισης σε 120 λεπτά. Οι **Nawa et al (2000)** βρήκαν ότι μείγματα με υπερρευστοποιητές SNF παρουσιάζουν σημαντική απώλεια ρευστότητας, αλλά αυτή η απώλεια μειώνεται με την αύξηση της δοσολογίας τους.

Ο ρυθμός απώλειας είναι διαφορετικός για ρευστοποιητές διαφορετικής φύσης. Οι **Chan et al (1996)** μελέτησαν υπερρευστοποιητές PCE και SNF στις αντίστοιχες δοσολογίες κορεσμού τους, και διαπίστωσαν ότι η διατήρηση εργασιμότητας των PCE ήταν καλύτερη από εκείνη των SNF. Η δοσολογία κορεσμού ορίζεται ως η δόση του ρευστοποιητή πέραν της οποίας, δεν παρατηρείται καμία σημαντική αύξηση στην εργασιμότητα. Για αυτή τη δοσολογία, οι **Golaszewski και Szwabowski (2004)** βρήκαν την ίδια διατήρηση εργασιμότητας στα κονιάματα με PCE και SNF υπερρευστοποιητές. Οι μεταβολές στη ροή σε σχέση με το χρόνο, στις πάστες (**Uchikawa et al, 1995**) και τα κονιάματα (**Houst et al, 1999**) με PCE υπερρευστοποιητές, είναι μικρές.

Οι **Houst et al (2005)** ανέφεραν ότι οι πρόσφατα αναπτυγμένοι LS υπερρευστοποιητές ήταν πολύ πιο αποτελεσματικοί από την άποψη της εργασιμότητας του σκυροδέματος σε συνάρτηση με τη δόση, σε σύγκριση με τους SNF υπερρευστοποιητές. Οι **Chandra και Bjornstrom (2002)** παρατήρησαν ότι η απώλεια κάθισης, που μετράται με την εξάπλωση, ήταν υψηλότερη στους SNF υπερρευστοποιητές σε σύγκριση με εκείνη των LS, όταν η αρχική εξάπλωση ήταν παρόμοια.

Οι αιτίες για την απώλεια της εργασιμότητας δεν έχουν ακόμα διευκρινιστεί πλήρως. Οι **Bonen και Sarkar (1995)** κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι όσο μεγαλύτερη είναι η αγωγιμότητα του διαλύματος πάστας SNF υπερρευστοποιητή, τόσο ταχύτερη είναι η απώλεια κάθισης. Οι **Hanehara και Yamada (1999)** υπέδειξαν ότι η απώλεια κάθισης προκαλείται από την παραγωγή μεγάλων ποσοτήτων ετρινγκίτη. Ο **Myrvold (2007)** πρότεινε ότι η διατήρηση της εργασιμότητας της πάστας τσιμέντου με LS ρευστοποιητές μπορεί να αποδοθεί στην προσρόφηση των LS από τις πυριτικές φάσεις ( $C_3S$  και  $C_2S$ ) και από τα προϊόντα ενυδάτωσης (ιδιαίτερα CH, AFt) που προκαλούν καθυστέρηση.

### 1.2.6. Επίδραση των ρευστοποιητών στο πορώδες

Είναι γενικά κατανοητό ότι το πορώδες της πάστας τσιμέντου με ή χωρίς προσμίξεις μειώνεται με το χρόνο ενυδάτωσης και όσο μεγαλύτερος είναι ο ρυθμός ενυδάτωσης, τόσο πιο γρήγορα μειώνεται το πορώδες. Ωστόσο, η ανάπτυξη της δομής των πόρων επηρεάζεται από την επίδραση του ρευστοποιητή και μπορεί να διαφοροποιείται μεταξύ παστών, ακόμη και αν ο λόγος w/c διατηρείται σταθερός (**Ramachandran et al, 1998**).

#### 1.2.6.1. Επίδραση των πολυκαρβοξυλικών ρευστοποιητών (PCE)

Οι **Xu** και **Beaudoin (2000)** διαπίστωσαν ότι οι υπερρευστοποιητές PCE μειώνουν το συνολικό πορώδες του κονιάματος στις 28 ημέρες σε σύγκριση με το αμιγές κονίαμα. Οι **Puertas et al (2005)** παρατήρησαν ότι η παρουσία των PCE δεν επηρεάζει ούτε την αντοχή των 2, ούτε των 28 ημερών. Οι **Ndimubanzi** και **Aïtcin (2004)** βρήκαν ότι η πρώιμη θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος με PCE επηρεάζεται λιγότερο, συγκριτικά με την επίδραση άλλων υπερρευστοποιητών, λόγω της χαμηλότερης δοσολογίας που απαιτείται από τους PCE για την επίτευξη παρόμοιων τιμών κάθισης. Ο **Farrington (2007)** διαπίστωσε ότι οι PCE καθυστερούν την πρώιμη ενυδάτωση του τσιμέντου, αλλά δεν επιβραδύνουν την ανάπτυξη πρώιμων αντοχών όταν χρησιμοποιούνται στην ίδια δοσολογία σε σκυρόδεμα. Είναι σημαντικό να τονιστεί πως η επίδραση των ρευστοποιητών στις ιδιότητες, είναι διαφορετική σε πάστα του τσιμέντου, σε κονίαμα και σε σκυρόδεμα.

#### 1.2.6.2. Επίδραση των σουλφονιωμένων συμπτυκνωμάτων ναφθαλίνης-φορμαλδεΐδης (SNF)

Οι **Gu et al (1994)** διερεύνησαν την επίδραση των SNF υπερρευστοποιητών στην ανάπτυξη της δομής του πορώδους της πάστας τσιμέντου σε διάφορες ηλικίες από την 1<sup>η</sup> έως την 28<sup>η</sup> ημέρα. Η διαφοροποίηση του πορώδους, μεταξύ των παστών με τους SNF υπερρευστοποιητές και των αμιγών παστών, ήταν σημαντική στις πρώιμες ηλικίες, αλλά σχετικά ασήμαντη αργότερα. Βρήκαν επίσης ότι οι πάστες με ρευστοποιητές έχουν μεγαλύτερο μέσο μέγεθος πόρων από τις αμιγείς σε διάφορες ηλικίες μέχρι την 28<sup>η</sup> ημέρα.

Ωστόσο, διαπιστώθηκε ότι η προσθήκη SNF υπερρευστοποιητών οδήγησε σε στένωση των πόρων (**Khalil, 1999**). Το συνολικό σύστημα πόρων της πάστας τσιμέντου με SNF περιέχει κυρίως μικρούς ή μεσαίους τριχοειδείς πόρους στις 28 ημέρες. Οι **Gu et al**

(1982) βρήκαν επίσης ότι οι SNF μειώνουν το όγκο των πόρων και το μέγεθος των τριχοειδών πόρων, όταν χρησιμοποιούνται για να μειώσουν την απαίτηση σε νερό, η οποία οδηγεί σε μια χαμηλότερη αναλογία  $w / c$ .

### 1.2.6.3. Επίδραση των λιγνοσουλφονικών ρευστοποιητών (LS)

Ο **Ramachandran (1995)** ανέφερε ότι το πορώδες της πάστας αυξάνεται ελαφρώς υπό την παρουσία των LS σε σύγκριση με την αμιγή. Οι **Pang et al (2005)** βρήκαν ότι ο συνολικός όγκος των πόρων της ενυδατωμένης πάστας τσιμέντου αυξάνεται με την αύξηση της δοσολογίας του LS. Μελετήθηκε επίσης πάστα τσιμέντου με τροποποιημένους LS ρευστοποιητές και βρέθηκαν τα ίδια αποτελέσματα με αυτά των LS. Ωστόσο, η ατελής ανάπτυξη των κρυστάλλων ανυδρίτη και η αύξηση του όγκου των πόρων στο τσιμέντο οδήγησε στη μείωση της αντοχής εντός 28 ημερών σε σύγκριση με το αμιγές δείγμα.

### 1.3. Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

Οι **K. Yoshiokaa, E. Tazawab, K. Kawaiib και T. Enohata** το **2002**, μελέτησαν τα χαρακτηριστικά προσρόφησης διάφορων υπερρρευστοποιητών από τα συστατικά του τσιμέντου Πόρτλαντ. Τα ανώτατα ποσοστά της προσρόφησης ποικίλουν ανάλογα με τα είδη των συστατικών και των υπερρρευστοποιητών. Αναφέρθηκε επίσης ότι το είδος των υπερρρευστοποιητών και η μέθοδος ανάμειξης μεταβάλλει τη ρευστότητα της πάστας τσιμέντου. Το τσιμέντο Πόρτλαντ αποτελείται κυρίως από τις ενώσεις  $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ,  $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ,  $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$  και  $\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$ , οι οποίες αναφέρονται συντομογραφικά  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$ ,  $\text{C}_3\text{A}$ ,  $\text{C}_4\text{AF}$ . Καθώς δεν αναμένεται ομοιόμορφη απορρόφηση των υπερρρευστοποιητών από τα συστατικά του τσιμέντου ήταν σημαντικό να μελετηθεί πώς οι υπερρρευστοποιητές απορροφώνται από κάθε συστατικό του τσιμέντου, προκειμένου να ελεγχθεί η ρευστότητα της πάστας του τσιμέντου και του σκυροδέματος. Για όλους τους τύπους υπερρρευστοποιητών η μεγαλύτερη ποσότητα υπερρρευστοποιητή προσροφήθηκε από τα  $\text{C}_3\text{A}$  και  $\text{C}_4\text{AF}$ , παρά από τα  $\text{C}_3\text{S}$  και  $\text{C}_2\text{S}$ .

Για τον προσδιορισμό της ρευστότητας, οι ερευνητές χρησιμοποίησαν πάστες τσιμέντου με αναλογία νερού / τσιμέντου 0.26 και ορισμένη ποσότητα υπερρρευστοποιητή που είχε προστεθεί στο νερό ανάμειξης εκ τω προτέρων. Τα μείγματα τοποθετήθηκαν σε έναν κώνο (JIS R5201) όπου μετά την απομάκρυνση του, μετρήθηκε η εξάπλωση τους (που αποτελεί τη μέση τιμή της μέγιστης διαμέτρου και της κάθετης της). Οι τιμές της εξάπλωσης αυξάνονταν με την αύξηση της συγκέντρωσης των υπερρρευστοποιητών. Η αύξηση αυτή διέφερε ανάλογα με τους τύπους των υπερρρευστοποιητών.

Οι **J. Plank, K. Pöllman, N. Zouaoui, P.R. Andres και C. Schaefer** το **2008** μελέτησαν τη σύνθεση και την απόδοση των νέων πολυκαρβοξυλικών υπερρρευστοποιητών με βάση το μεθακρυλικό εστέρα. Αυτοί οι νέοι υπερρρευστοποιητές έχουν υδροξυλική ρίζα στην πλευρική αλυσίδα αντί της συμβατικής μεθοξυλικής. Οι ιδιότητες των νέων υπερρρευστοποιητών σε πάστα τσιμέντου συγκρίθηκαν με εκείνες των συμβατικών. Έτσι για κάθε υπερρρευστοποιητή, προσδιορίστηκε πειραματικά η συγκεκριμένη δοσολογία κατά βάρος τσιμέντου, ώστε η ρευστότητα της πάστας να φτάσει την τιμή των  $26 \pm 0.5$  cm στη δοκιμή “mini slump”. Η αναλογία νερού/τσιμέντο της πάστας χωρίς την παρουσία υπερρρευστοποιητή ρυθμίστηκε ώστε να παράγει μια εξάπλωση  $18 \pm 0.5$  cm. Όπως επισημάνθηκε από τον **Roussel κ.ά.**, η δοκιμή ‘mini slump’ όχι μόνο αντιπροσωπεύει μια

εμπειρική δοκιμή, αλλά σε χαμηλό ιξώδες αποτελεί ένα πραγματικό ρεολογικό εργαλείο που επιτρέπει στους χρήστες του να έχουν πρόσβαση σε ένα ουσιαστικό μέγεθος (τάση διαρροής) του υπό δοκιμή υλικού. Λαμβάνοντας υπόψη την ακρίβεια της μεθόδου, περίπου οι ίδιες δόσεις είναι απαραίτητες για τους υπερρρευστοποιητές με υδροξυλική και μεθοξυλική ρίζα προκειμένου να φτάσουν την απαιτούμενη εξάπλωση των  $26 \pm 0.5$  cm. Αυτά τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι δεν υπάρχει καμία διαφορά στην απόδοση μεταξύ των δυο διαφορετικών ειδών υπερρρευστοποιητών.

Το 2005 οι **X. Ouyanga**, **X. Qiu** και **P. Chenb**, ερεύνησαν τις ιδιότητες του λιγνοσουλφονικού ασβεστίου με διαφορετικά μοριακά βάρη, προκειμένου να το χρησιμοποιήσουν ως ρευστοποιητή. Διαπιστώθηκε ότι η απορροφητική ικανότητα στην επιφάνεια των σωματιδίων του τσιμέντου και η επιφανειακή τάση αυξάνονται με την αύξηση του μοριακού βάρους. Ωστόσο, το ζ δυναμικό και επομένως το επιφανειακό φορτίο των σωματιδίων του τσιμέντου, παρουσιάζει υψηλότερες τιμές σε χαμηλότερο μοριακό βάρος. Οι φυσικοχημικές ιδιότητες των ρευστοποιητών συσχετίστηκαν με μερικές από τις πιο σημαντικές ιδιότητες του σκυροδέματος.

Πολλές αναφορές δείχνουν ότι η μείωση του νερού εξαρτάται από τις ηλεκτροστατικές απωθητικές δυνάμεις μεταξύ των σωματιδίων του τσιμέντου που απορροφώνται από τα μόρια των υπερρρευστοποιητών. Προκειμένου να αξιολογηθεί η επίδραση των ηλεκτροστατικών απωθητικών δυνάμεων στο ποσοστό μείωσης του νερού και η διασπορά των λιγνοσουλφονικών στα σωματίδια του τσιμέντου, καθορίστηκε η ρευστότητα της πάστας που ήταν αναμειγμένη με λιγνοσουλφονικά διαφορετικών μοριακών βαρών. Η αναλογία μάζας νερού προς τσιμέντο ήταν 0.35. Παρατηρήθηκε πως οι υπερρρευστοποιητές με υψηλό μοριακό βάρος έχουν ισχυρότερη επίδραση μέσω στερεοχημικής παρεμπόδισης. Ωστόσο, στην πραγματικότητα δεν χρησιμοποιείται ποτέ υπερρρευστοποιητής σε ποσότητα μεγαλύτερη από 0.5.% κατά βάρος, λόγω των υπερβολικά καθυστερημένων χρόνων πήξεως.

Διαπιστώθηκε επίσης, πως η επίδραση ρευστοποιητών δεν μπορεί να εξηγηθεί μόνο από τις ηλεκτροστατικές απωθητικές δυνάμεις μεταξύ των σωματιδίων του τσιμέντου. Οι υπερρρευστοποιητές με μοριακό βάρος 5.00-10.000 συνεισφέρουν σε ισχυρές ηλεκτροστατικές απωθητικές δυνάμεις μεταξύ των σωματιδίων του τσιμέντου. Οι ρευστοποιητές με μοριακά βάρη 10.000-30.000 συμβάλλουν στην καλύτερη ρευστότητα της πάστας, ακόμη και όταν η δοσολογία είναι μικρότερη από 0.5% κ.β. του τσιμέντου.



Η αποτελεσματικότητα των ρευστοποιητών δεν καθορίζεται μόνο από την αύξηση της ρευστότητας του σκυροδέματος, αλλά προσδιορίζεται επίσης από την αύξηση της αντοχής σε θλίψη μετά την προσθήκη τους. Μελετήθηκε η επίδραση της προσθήκης των λιγνοσουλφονικών με διαφορετικά μοριακά βάρη, στον περιεχόμενο αέρα και στην αντοχή σε θλίψη. Παρατηρήθηκε πως με την αύξηση του μοριακού βάρους, αυξάνεται η περιεκτικότητα του αέρα στο σκυρόδεμα και μειώνεται η αντοχή σε θλίψη. Η αύξηση του περιεχόμενου αέρα οδηγεί σίγουρα σε αύξηση του πορώδους του σκυροδέματος, και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της αντοχής.

Όπως συζητήθηκε ανωτέρω, τα λιγνοσουλφονικά με χαμηλό ή μεσαίο μοριακό βάρος αναπτύσσουν ισχυρές ηλεκτροστατικές απωστικές δυνάμεις και προκαλούν εγκλωβισμό αέρα σε χαμηλό ποσοστό. Από την άλλη πλευρά, τα λιγνοσουλφονικά με υψηλότερο μοριακό βάρος αναπτύσσουν χαμηλότερης έντασης ηλεκτροστατικές απωθητικές δυνάμεις, αλλά και μειωμένη αντοχή σκυροδέματος. Προκύπτει λοιπόν πως η χρήση των λιγνοσουλφονικών ρευστοποιητών είναι περιορισμένη καθώς κανένα από τα κλάσματα τους δεν μπορεί να δώσει καλά αποτελέσματα στη ρευστότητα και στην αντοχή ταυτόχρονα. Θα πρέπει να τροποποιηθούν ώστε να βελτιστοποιηθεί η δυνατότητα μείωσης νερού που προσφέρουν.

Ο **B. Felekoglu** και ο **H. Sarikahya** το **2007** μελέτησαν την επίδραση της χημικής δομής των υπερρευστοποιητών πολυκαρβοξυλικής βάσης, στη διατήρηση της εργασιμότητας στο αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα. Στη μελέτη σύνθεσης αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος, οι υπερρευστοποιητές πολυκαρβοξυλικής βάσης είναι αυτοί που συνήθως εγγυώνται την αρχική εργασιμότητα. Ωστόσο, η διατήρηση στο χρόνο της εργασιμότητας των μειγμάτων εξαρτάται κυρίως από τη χημική δομή των πολυκαρβοξυλικών και τη συμβατότητά τους με το τσιμέντο. Οι υπερρευστοποιητές πολυκαρβοξυλικής βάσης, είναι ωστόσο πολυμερή τα οποία έχουν τη δυνατότητα να τροποποιηθούν, προκειμένου να βελτιώσουν τις επιδόσεις τους.

Οι ερευνητές συνέθεσαν τρεις υπερρευστοποιητές και μελέτησαν τις επιδράσεις τους στο χρόνο πήξης της πάστας τσιμέντου, στην εξαρτώμενη από το χρόνο εργασιμότητα και στην ανάπτυξη αντοχών. Τα αποτελέσματα των δοκιμών έδειξαν ότι, η διατήρηση της εργασιμότητας μπορεί να επιτευχθεί με την τροποποίηση του δεσμού μεταξύ της κύριας αλυσίδας και της πλευρικής αλυσίδας του πολυμερούς. Οι υπερρευστοποιητές με δεσμό εστέρα δεν ήταν αποτελεσματικοί στη διατήρηση της εργασιμότητας στο νωπό σκυρόδεμα, λόγω της ευαισθησίας αυτής της δομής απέναντι στη δράση των αλκαλίων. Από την άλλη

πλευρά, όταν υφίσταται άμεσος δεσμός πολυοξυαιθυλενίου μεταξύ πλευρικής και κύριας αλυσίδας του πολυμερούς, η εργασιμότητα του νωπού σκυροδέματος μπορεί να διατηρηθεί αποτελεσματικά για τουλάχιστον δυο ώρες. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι, εκτός από τον τύπο των υπερρυστοποιητών, η αναλογία νερού / τσιμέντο των μειγμάτων, έχει μεγάλη επίδραση στη διατήρηση της εργασιμότητας. Τα καλύτερα αποτελέσματα προέκυψαν από τα μίγματα που περιείχαν 2.3% κ.β. του ρυστοποιητή που ήταν πολυμερές καρβοξυλικού-πολυοξυαιθυλενίου.

Οι **F. Winnefeld, S. Becker, J. Pakusch** και **T. Gotz** το **2007** προσπάθησαν να συσχετίσουν τη μοριακή δομή των υπερρυστοποιητών με πολυκαρβοξυλικό αιθέρα με την απόδοση των τσιμεντοειδών συστημάτων με σκοπό την ανάπτυξη νέων προϊόντων με βελτιωμένες ιδιότητες, π.χ. μειωμένη χρήση νερού, ή καθυστέρηση των αντιδράσεων ενυδάτωσης. Για το σκοπό αυτό συντέθηκαν διάφοροι πειραματικοί υπερρυστοποιητές με ποικίλο μήκος, πυκνότητα πολυαιθερικής αλυσίδας καθώς και μοριακό βάρος πολυμερούς. Η επίδραση αυτών των πολυμερών στις ιδιότητες των παστών τσιμέντου και των κονιαμάτων προσδιορίστηκε χρησιμοποιώντας διάφορες μεθόδους χαρακτηρισμού όπως η ρυστότητα του κονιάματος, ρεολογικές μετρήσεις, θερμότητα ενυδάτωσης, η προσρόφηση και η θλιπτική αντοχή. Χαρακτηριστικές σχέσεις μεταξύ μοριακής δομής των πολυκαρβοξυλικών ρυστοποιητών, απορρόφησης, εργασιμότητας και επίδρασης επιβράδυνσης έχουν προσδιοριστεί, επιτρέποντας τη σύνθεση νέων υπερρυστοποιητών με βελτιωμένη απόδοση.

Διαπιστώθηκε, ότι η μειωμένη πυκνότητα του οξειδίου του πολυαιθυλενίου στην πλευρική αλυσίδα ενισχύει την εργασιμότητα (αυξημένη εξάπλωση του κονιάματος, μείωση της φαινομενικής τάσης διαρροής και του ιξώδους της πάστας τσιμέντου). Τα μήκη των πλευρικών αλυσίδων και το μοριακό βάρος των πολυμερών είχαν ελάχιστη επιρροή.

Η προσρόφηση των πολυμερών από την επιφάνεια των σωματιδίων του τσιμέντου έχει σημαντικό ρόλο στην επίτευξη της εργασιμότητας για τα τσιμεντοειδή συστήματα. Οι μετρήσεις προσρόφησης αποκάλυψαν ότι τα πολυμερή με υψηλότερο φορτίο προσροφώνται σε μεγαλύτερο βαθμό σε σύγκριση με τα πολυμερή με χαμηλότερο. Η πυκνότητα φορτίου των πολυκαρβοξυλικών αυξάνεται με την παρουσία ενός αυξανόμενου αριθμού ελεύθερων ομάδων καρβοξυλίου, δηλαδή μειώνοντας το μήκος και την πυκνότητα της πλευρικής αλυσίδας. Έτσι, τα πολυμερή με χαμηλότερη πυκνότητα φορτίου, μακριές πολυκαρβοξυλικές πλευρικές αλυσίδες και υψηλό αριθμό πλευρικών αλυσίδων απορροφώνται λιγότερο από τα πολυμερή με υψηλότερη πυκνότητα φορτίου.

Στη μελέτη χρησιμοποιήθηκαν υπερρρευστοποιητές που καθυστερούν την ενυδάτωση του τσιμέντου Πόρτλαντ. Το μοριακό βάρος του πολυμερούς βρέθηκε να μην έχει σημαντική επίδραση στον καθορισμό του χρόνου πήξης. Αντίθετα, η ποσότητα του προσροφημένου πολυμερούς και η επιφάνεια κάλυψης των σωματιδίων του τσιμέντου από τους υπερρρευστοποιητές μπορούν να συσχετιστούν με το φαινόμενο επιβράδυνσης.

Όλα τα παραπάνω δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της δομής των υπερρρευστοποιητών με πολυκαρβοξυλική βάση. Οι κατευθυντήριες γραμμές είναι: (i) χρήση πολυμερών με μικρό αριθμό πλευρικών αλυσίδων για να επιτευχθεί καλή εργασιμότητα, (ii) χρήση μακρών πλευρικών αλυσίδων για να αποφευχθεί ανεπιθύμητη καθυστέρηση, και (iii) βελτίωση της κατανομής του μοριακού βάρους του πολυμερούς.

Οι **M.M. Alonso, M. Palacios** και **F. Puertas** το **2012** ερεύνησαν τη συμβατότητα μεταξύ των πρόσμικτων πολυκαρβοξυλικής βάσης και των σύνθετων τσιμέντων. Η συμβατότητα μεταξύ τριών δομικά διαφορετικών υπερρρευστοποιητών και τεσσάρων εμπορικών τσιμέντων (ένα συμβατικό τσιμέντο και τρία σύνθετα τσιμέντα), μελετήθηκε μέσω της προσρόφησης, του ζ δυναμικού, ρεολογικών και θερμοδομετρικών μεθόδων.

Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των καμπυλών προσρόφησης, όσο υψηλότερο είναι το ποσοστό των καρβοξυλικών ομάδων τόσο πιο έντονα απορροφάται από τις πάστες τσιμέντου.

Από ρεολογική άποψη, η βέλτιστη αναλογία καρβοξυλικής ομάδας /ομάδας εστέρα για τις προσμίξεις που χρησιμοποιούνται στην παρούσα μελέτη, διαπιστώθηκε ότι κυμαίνεται από 0.7 έως 1.2. Η επίδραση των προσμίξεων στη ρευστότητα των παστών τσιμέντου εξαρτάται από την παρουσία των ορυκτών προσθέτων. Παρά τα χαμηλά ποσοστά προσρόφησης των προσμίξεων στα σκωριοτσιμέντα, η προσθήκη των πολυκαρβοξυλικών υπερρρευστοποιητών δημιούργησε πιο απότομη πτώση των ρεολογικών παραμέτρων. Η παρουσία των υπερρρευστοποιητών μειώνει γενικά την τάση διαρροής της πάστας τσιμέντου. Η μείωση της τάσης διαρροής εξαρτάται από τη δοσολογία του υπερρρευστοποιητή και την αναλογία καρβοξυλικής ομάδας/ομάδας εστέρα. Η καθυστέρηση της ενυδάτωσης του τσιμέντου εντείνεται με την αύξηση της δοσολογίας των πολυκαρβοξυλικών υπερρρευστοποιητών. Η επιβραδυντική επίδραση των προσμίξεων παρατηρήθηκε επίσης να ποικίλει ανάλογα με τη φύση του προσθέτου, και ήταν πιο έντονη στα σκωριοτσιμέντα.

Οι μελετητές χρησιμοποίησαν τέσσερα συμβατικά Πόρτλαντ τσιμέντα (European standard EN 197-1:2000). Ένα CEM I 42.5R που χρησιμοποιήθηκε ως αναφορά, και τρία σύνθετα τσιμέντα με διαφορετική περιεκτικότητα ορυκτών προσθέτων: CEM II/BL 32.5N

(ασβεστολιθικό), CEM II/AV 42.5R (ιπτάμενη τέφρα) και CEM III/B 32.5R (σκωρία). Χρησιμοποιήθηκαν επίσης τρία ορυκτά πρόσθετα, (ιπτάμενη τέφρα, ασβεστόλιθος, σκωρία υψικαμίνων) που δεν ήταν τα ίδια με αυτά των παραπάνω σύνθετων τσιμέντων. Τέλος, χρησιμοποιήθηκαν τρία πρόσμικτα, παράγωγα πολυακρυλικού οξέος.

Τα κύρια συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση της παρουσίας ορυκτών πρόσθετων (ιπτάμενη τέφρα, ασβεστόλιθο και σκωρία υψικαμίνου) είναι τα ακόλουθα. Καταρχήν, τα πρόσμικτα προσροφώνται όχι μόνο από τα σωματίδια του τσιμέντου, αλλά και από τα πρόσθετα που έχουν χρησιμοποιηθεί στα τσιμέντα. Σημαντικά μικρότερες ποσότητες του μείγματος απορροφώνται από την ιπτάμενη τέφρα και τη σκωρία υψικαμίνων, και ελαφρώς μεγαλύτερες από τον ασβεστόλιθο. Επίσης, η προσρόφηση των τριών υπερρρευστοποιητών από το CEM II / AV 42.5R είναι παρόμοια με την προσρόφησή τους από το απλό τσιμέντο. Αντίθετα, οι τιμές προσρόφησης είναι ελαφρώς υψηλότερες στα ασβεστολιθικά τσιμέντα CEM II / BL 32.5R και σημαντικά χαμηλότερες στα σκωριοτσιμέντα CEM III/B 32.5R. Τέλος, η διασπορά που προκαλείται από τους υπερρρευστοποιητές στο CEM II/AV που περιέχει ιπτάμενη τέφρα, είναι παρόμοια με την επίδραση που παρατηρήθηκε στο απλό τσιμέντο αναφοράς. Το CEM III/B με προσθήκη σκωρίας υψικαμίνου, επιδεικνύουν την υψηλότερη αύξηση σε ρευστότητα, ακόμη και σε χαμηλές δοσολογίες όπως 0.2 mg ανά g τσιμέντου.

Όσον αφορά στην επίδραση των υπερρρευστοποιητών στη διαδικασία ενυδάτωσης των τσιμέντων, μπορούμε να συμπεράνουμε τα ακόλουθα. Η καθυστέρηση της ενυδάτωσης του τσιμέντου εντείνεται με την αύξηση της δοσολογίας των υπερρρευστοποιητών. Στα τσιμέντα που περιέχουν ιπτάμενη τέφρα, η καθυστέρηση στις αντιδράσεις ενυδάτωσης που προκαλείται από τα πρόσμικτα, είναι παρόμοια με την καθυστέρηση που παρατηρείται σε απλές πάστες τσιμέντου. Αυτές οι αντιδράσεις επιβραδύνονται λιγότερο στα τσιμέντα με ασβεστόλιθο, και πιο πολύ στα τσιμέντα που περιέχουν σκωρία. Τέλος, η παρουσία όλων των προσμίξεων αυξάνει ελαφρώς τη συνολική θερμότητα ενυδάτωσης. Αυτό μπορεί να συμβαίνει επειδή διασπείρονται καλύτερα τα σωματίδια του τσιμέντου και απελευθερώνεται το εγκλωβισμένο νερό, οπότε επιταχύνεται η ενυδάτωση.

Οι **M. Heikal** και **I. Aiad** το **2007** μελέτησαν την επίδραση της μεθύστερης προσθήκης των υπερρρευστοποιητών στη χημική διαδικασία και στις ιδιότητες της πάστας τσιμέντου. Συγκεκριμένα, μελετήθηκε η επίδραση της μεθύστερης προσθήκης υδατοδιαλυτών πολυμερών που βασίζονται σε προϊόντα συμπυκνωμάτων δηλαδή,

σουλφονική μελαμίνη (SMFF) και ουρία μελαμίνης φορμαλδεΐδης (SMUFF), στις φυσικοχημικές ιδιότητες των παστών τσιμέντου. Οι υπερρρευστοποιητές προστέθηκαν με δύο διαφορετικές μεθόδους, είτε μαζί με το νερό ανάμειξης (ταυτόχρονος χρόνος προσθήκης), είτε μεταγενέστερα, μετά από καθορισμένο χρονικό διάστημα (μεθύτερος χρόνος προσθήκης). Η τιμή της κάθισης (mini-slump) προσδιορίστηκε σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα των 30, 60, 90, και 120 λεπτών. Μελετήθηκε επίσης η ηλεκτρική αγωγιμότητα των παστών τσιμέντου με και χωρίς υπερρευστοποιητές. Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αρχική ηλεκτρική αγωγιμότητα μειώνεται με την καθυστέρηση του χρόνου προσθήκης. Η καθυστέρηση του χρόνου προσθήκης από 10 έως 15 λεπτά είχε ως αποτέλεσμα τη μέγιστη αύξηση του ύψους της ηλεκτρικής αγωγιμότητας. Επιπλέον, η καθυστέρηση του χρόνου προσθήκης ενισχύει τη ρευστότητα της πάστας τσιμέντου από την ταυτόχρονη προσθήκη.

Σύμφωνα με τους **Uchikawa et al** , τα SNF πολυμερή προσροφώνται κυρίως από τα προϊόντα ενυδάτωσης του C<sub>3</sub>A, στην ταυτόχρονη προσθήκη τους. Στη μεθύτερη προσθήκη των SNF παρατηρείται μείωση της ικανότητας προσρόφησης του πολυμερούς από τα προϊόντα ενυδάτωσης του C<sub>3</sub>A. Οι **Flatt** και **Houst** περιγράφουν τις αλληλεπιδράσεις και την κατάσταση των υπερρευστοποιητών με τα αιωρήματα τσιμέντου σε τρία μέρη. Το πρώτο μέρος καταναλώνεται από τις χημικές αντιδράσεις, κυρίως κατά τον σχηματισμό του AFT και C-S-H. Το δεύτερο μέρος απορροφάται από την επιφάνεια των σωματιδίων του τσιμέντου και βοηθά στη διασπορά των συσσωματωμάτων του τσιμέντου. Το τρίτο μέρος είναι ο υπερρευστοποιητής, ο οποίος παρέμεινε στην υδατική φάση μέχρι αρκετά πολυμερή να προστεθούν ώστε το σύστημα να μπορεί να θεωρηθεί κορεσμένο.

Σύμφωνα με τους ερευνητές, η αύξηση της ρευστότητας της πάστας τσιμέντου προκαλείται από την αύξηση των ηλεκτρικών απωθητικών δυνάμεων μεταξύ των σωματιδίων. Η ταυτόχρονη προσθήκη με το νερό ανάμειξης μείωσε την αποτελεσματικότητα του πρόσμικτου, εξαιτίας της μερικής επικάλυψης του από τα πρώιμα ένυδρα προϊόντα. Καθώς ο υπερρευστοποιητής προστέθηκε στις πάστες τσιμέντου ταυτόχρονα με το νερό ανάμειξης, η ταχεία προσρόφηση του πολυμερούς από τα σωματίδια του τσιμέντου προκαλεί ισχυρή διασπορά, δημιουργώντας έτσι μια αρχική, υψηλή ρευστότητα των παστών. Ταυτόχρονα, το πολυμερές προκαλεί μείωση του ρυθμού ενυδάτωσης του τσιμέντου, λόγω του σχηματισμού ενός φιλμ γύρω από τα σωματίδια τσιμέντου και τα ένυδρα προϊόντα.

Η ρευστότητα της πάστας τσιμέντου που παρασκευάστηκε με την παρουσία 0.50% SMF ή SMUFF παίρνει υψηλότερη τιμή στην περίπτωση της μεθύτερης προσθήκης.

Πιθανώς ο υπερρυστοποιητής δεν ενσωματώνεται με τα ενυδατωμένα προϊόντα και, ως εκ τούτου, ένα μεγαλύτερο κλάσμα του είναι διαθέσιμο για τη διασπορά των σωματιδίων του τσιμέντου. Κατά συνέπεια, η ρευστότητα των παστών είναι υψηλότερη στην ταυτόχρονη προσθήκη. Στη μεθύτερη προσθήκη ρυστοποιητή, η ποσότητα του πολυμερούς που προσροφάται από τα μη ενυδατωμένα σωματίδια του τσιμέντου είναι πολύ χαμηλότερη από ότι αυτή κατά την ταυτόχρονη προσθήκη.

Συνοψίζοντας, η μεθύτερη προσθήκη ενισχύει τη ρευστότητα της πάστας τσιμέντου, λόγω της περιεκτικότητας του  $C_3A$  που ελαχιστοποιείται με την ενυδάτωση μέσα σε 10-15 λεπτά. Η εξάπλωση αυξάνεται στην περίπτωση της μεθύτερης προσθήκης .

## 2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 2.1. Τοποθέτηση του αντικειμένου

Για τις ανάγκες των πειραμάτων στα πλαίσια της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας μελετήθηκαν συνολικά εννέα (9) διαφορετικές συνθέσεις πάστας τσιμέντου και εννέα (9) συνθέσεις κονιαμάτων οι οποίες παρασκευάστηκαν στο Τμήμα Τεχνικών Υλικών και Στοιχείων του Κεντρικού Εργαστηρίου Δημοσίων Έργων. Επίσης μελετήθηκαν δώδεκα (12) συνθέσεις σκυροδέματος που παρασκευάστηκαν στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου. Σκοπός των πειραμάτων ήταν η μελέτη της επιρροής της προσθήκης ρευστοποιητών πολυκαρβοξυλικής και λιγνοσουλφονικής βάσης στις ρεολογικές και μηχανικές ιδιότητες των παστών, των κονιαμάτων και του σκυροδέματος. Κατά την πειραματική διερεύνηση, πραγματοποιήθηκαν:

- Δοκιμή κάθισης (mini slump test) σε πάστες τσιμέντου
- Προσδιορισμός χρόνου πήξης (setting time) σε πάστες τσιμέντου
- Προσδιορισμός διαχωρισμού (segregation) σε πάστες τσιμέντου
- Δοκιμή θλίψης σε πρισματικά δοκίμια κονιαμάτων τσιμέντου
- Δοκιμή κάθισης σε νωπό σκυρόδεμα
- Προσδιορισμός περιεκτικότητας αέρα σε νωπό σκυρόδεμα
- Δοκιμή θλίψης σε κυβικά δοκίμια σκυροδέματος
- Προσδιορισμός τριχοειδούς απορρόφησης
- Προσδιορισμός ολικού πορώδους

Οι δοκιμές που αφορούσαν στις πάστες τσιμέντου και τα κονιάματα πραγματοποιήθηκαν στο Τμήμα Τεχνικών Υλικών και Στοιχείων του Κεντρικού Εργαστηρίου Δημοσίων Έργων και οι δοκιμές των σκυροδεμάτων στο Εργαστήριο Οπλισμένου Σκυροδέματος του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

### 2.2. Υλικά, πειραματικές μέθοδοι και διατάξεις

#### 2.2.1. Υλικά

Σε όλες τις συνθέσεις πάστας τσιμέντου, κονιάματος και σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε τσιμέντο CEM I 52.5, δηλαδή κοινό τσιμέντο Πόρτλαντ τύπου I (OPC,

Ordinary Portland Cement). Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν για την παρασκευή του σκυροδέματος, ήταν άμμος 0-4 mm, χαλίκι 4-8 mm και γαρμπίλι 8-16 mm.

Χρησιμοποιήθηκαν οι εμπορικοί υπερρρευστοποιητές Sika Viscocrete και Glenium C347. Πρόκειται για υπερρρευστοποιητές βασισμένους σε πολυμερή πολυκαρβοξυλικού αιθέρα (PCE) , όπου το κύριο χαρακτηριστικό τους είναι ο στοχευμένος σχεδιασμός τους για την επίτευξη συγκεκριμένων ιδιοτήτων. Η ειδική τους σύσταση επιτρέπει την καθυστέρηση της απορρόφησής τους από τους κόκκους του τσιμέντου, επιτυγχάνοντας έτσι την αποτελεσματική διασπορά τους. Σε σχέση με άλλους υπερρρευστοποιητές PCE, επιτρέπουν και την επίτευξη ενός μείγματος σκυροδέματος υψηλής ποιότητας, με γρήγορη ανάπτυξη αντοχών και παρατεταμένη εργασιμότητα, χωρίς να καθυστερείται η πήξη. Τα εν λόγω πρόσμικτα βελτιώνουν επίσης τις μηχανικές ιδιότητές του σκυροδέματος όπως αρχικές και τελικές αντοχές, το μέτρο ελαστικότητας, τη συνάφεια με το χάλυβα, τη συρρίκνωση και τον ερπυσμό. Επίσης βελτιώνουν παραμέτρους ανθεκτικότητας όπως το βάθος ενανθράκωσης, τη διαπερατότητα και την αντοχή τους σε επιθετικούς χημικούς παράγοντες.

Χρησιμοποιήθηκαν επίσης πειραματικοί υπερρρευστοποιητές. Πιο συγκεκριμένα χρησιμοποιήθηκε ο ρευστοποιητής D 50 που έχει πολυκαρβοξυλική βάση, οι FLC 35 και FLC 400 που έχουν λιγνοσουλφονική βάση και οι RTC 1, RTC 15 και HR 50 που είναι επιβραδυντές. Για τις ανάγκες της παρούσας εργασίας οι υπερρρευστοποιητές κωδικοποιούνται ως εξής (**Πίνακας 3**):

**Πίνακας 3:** Κωδικοποίηση υπερρρευστοποιητών.

Είδος	Glenium	RTC 15	RTC 1	FLC 35	FLC400	HR 50	D 50	Viscocrete
Κωδικός	1	2	3	4	5	6	7	8

## 2.2.2. Παρασκευή μειγμάτων

### 2.2.2.1. Παρασκευή πάστας τσιμέντου

Παρασκευάστηκαν εννέα (9) συνθέσεις πάστας τσιμέντου και συγκεκριμένα μια (1) σύνθεση αναφοράς χωρίς κανένα τύπο υπερρρευστοποιητή (P0) και οχτώ (8) συνθέσεις με τους υπερρρευστοποιητές, μια για κάθε υπερρρευστοποιητή. Αναλυτικότερα παρασκευάστηκε μια σύνθεση με υπερρρευστοποιητή Glenium με ποσοστό 0.24% κ.β. τσιμέντου που κωδικοποιείται ως P1 0.24, μια σύνθεση με RTC 15 με ποσοστό 2.50% κ.β. που



κωδικοποιείται ως P2 2.50, μια σύνθεση με RTC 1 με ποσοστό 3,50% κ.β. που κωδικοποιείται ως P3 3.50, μια σύνθεση με FLC 35 με ποσοστό 2.50% κ.β. που κωδικοποιείται ως P4 2.50, μια σύνθεση με FLC 400 με ποσοστό 2.00% κ.β. που κωδικοποιείται ως P5 2.00, μια σύνθεση με HR 50 με ποσοστό 1.10% κ.β. που κωδικοποιείται ως P6 1.10, σύνθεση με D 50 με ποσοστό 0.16% κ.β. που κωδικοποιείται ως P7 0.16 και τέλος μια σύνθεση με Viscocrete με ποσοστό 0.20% κ.β. που κωδικοποιείται ως P8 0.20. Στον **Πίνακα 4**, αναγράφονται αναλυτικά οι συνθέσεις που πραγματοποιήθηκαν.

**Πίνακας 4:** Σύσταση συνθέσεων παστών τσιμέντου.

Υλικά	P0	P1 0.24	P2 2.50	P3 3.50	P4 2.50	P5 2.00	P6 1.10	P7 0.16	P8 0.20
Τσιμέντο (g)	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Λόγος w/c	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
Υπερρυστοποιητής (g)		1.2	12.5	17.5	12.5	10.0	5.5	0.8	1.0

Η παρασκευή των μειγμάτων έγινε με βάση την παρακάτω διαδικασία: μέσα στον αναδευτήρα τοποθετήθηκε η ποσότητα του νερού μαζί με το ρυστοποιητή, έπειτα προστέθηκε το τσιμέντο και αναδεύτηκαν για 90 sec. Στη συνέχεια έμειναν σε ηρεμία για 1 min και τέλος αναδεύτηκαν και πάλι για 90 sec.

Η επιλογή των ποσοτήτων των ρυστοποιητών που χρησιμοποιήθηκαν, έγινε κατόπιν πλήθους δοκιμών που είχαν ως στόχο η εξάπλωση των παστών τσιμέντου να είναι  $26 \pm 0.5$  cm. Αυτό προσδιορίστηκε με τη δοκιμή κάθισης ‘mini-slump test’ που περιγράφεται αναλυτικά σε επόμενο κεφάλαιο.

#### 2.2.2.2. Παρασκευή κονιάματος

Παρασκευάστηκαν εννέα (9) συνθέσεις κονιαμάτων και συγκεκριμένα μια (1) σύνθεση αναφοράς χωρίς κανένα τύπο υπερρυστοποιητή (M0) και οχτώ (8) συνθέσεις με τους ρυστοποιητές, μια για κάθε ρυστοποιητή. Το ποσοστό προσθήκης των ρυστοποιητών διατηρήθηκε στα επίπεδα των παστών. Στον **Πίνακα 5**, αναγράφονται αναλυτικά οι συνθέσεις που πραγματοποιήθηκαν.

**Πίνακας 5:** Σύνθεση κονιαμάτων.

	<b>M0</b>	<b>M1</b> <b>0.24</b>	<b>M2</b> <b>2.50</b>	<b>M3</b> <b>3.50</b>	<b>M4</b> <b>2.50</b>	<b>M5</b> <b>2.00</b>	<b>M6</b> <b>1.10</b>	<b>M7</b> <b>0.16</b>	<b>M8</b> <b>0.20</b>
<b>Τσιμέντο (g)</b>	450	450	450	450	450	450	450	450	450
<b>Άμμος (g)</b>	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350	1350
<b>Λόγος w/c</b>	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51	0.51
<b>Συνολικό νερό (g)</b>	256.5	256.5	256.5	256.5	256.5	256.5	256.5	256.5	256.5
<b>Υπερρυστοποιητής (g)</b>	-	1.08	11.25	15.75	11.25	9.00	4.95	0.72	0.90

Για κάθε σύνθεση παρασκευάστηκαν συνολικά 6 δοκίμια. Άρα, συνολικά για τις οχτώ διαφορετικές συνθέσεις κονιαμάτων παρασκευάστηκαν  $9 \times 6 = 54$  μήτρες. Οι 6 μήτρες κάθε σύνθεσης παρουσιάζονται αναλυτικά στον **Πίνακα 6**.

**Πίνακας 6:** Είδος, πλήθος και διαστάσεις κάθε μήτρας.

<b>Είδος Μήτρας</b>	<b>Πλήθος</b>	<b>Διαστάσεις (mm)</b>
<b>Πρισματική</b>	6	40 x 40 x 160

Αρχικά έγινε η ανάδευση των υλικών σύμφωνα με το πρότυπο EN196-1. Στη συνέχεια το μείγμα τοποθετήθηκε στις μήτρες όπου και συμπυκνώθηκε στη μηχανή δόνησης. Για καλύτερη συμπύκνωση, οι μήτρες γεμίζονταν και δονούνταν σε 2 δόσεις. Την επόμενη ημέρα, τα δοκίμια απομακρύνθηκαν από τις μήτρες και συντηρήθηκαν σε δεξαμενή νερού για 28 ημέρες.

### **2.2.2.3. Παρασκευή σκυροδέματος**

Παρασκευάστηκαν δώδεκα (12) συνθέσεις σκυροδέματος και συγκεκριμένα μια (1) σύνθεση αναφοράς χωρίς κανένα τύπο ρυστοποιητή (C0) και έντεκα (11) συνθέσεις με τους υπερρυστοποιητές. Οι σκυροδετήσεις ήταν των 10 lt εκάστη με σταθερό λόγο νερού προς τσιμέντο και ποσότητα αδρανών. Η μόνη διαφορά ήταν στην ποσότητα του ρυστοποιητή. Στον **Πίνακα 7**, αναγράφονται αναλυτικά οι συνθέσεις που πραγματοποιήθηκαν.

Πίνακας 7: Σύνθεση σκυροδέματος.

	C0	C1 0.31	C2 3.25	C2 0.83	C3 4.55	C4 2.50	C5 2.60	C5 1.00	C6 1.43	C6 0.55	C7 0.21	C8 0.26
Τσιμέντο (kg)	3.60	3.60	3.60	3.60	3.60	3.60	3.60	3.60	3.60	3.60	3.60	3.60
Άμμος (kg)	9.79	9.79	9.79	9.79	9.79	9.79	9.79	9.79	9.79	9.79	9.79	9.79
Χαλίκι (kg)	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56	3.56
Γαρμπίλι (kg)	4.45	4.45	4.45	4.45	4.45	4.45	4.45	4.45	4.45	4.45	4.45	4.45
Λόγος w/c	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
Συνολικό νερό (kg)	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Υπερρευστοποιητής (kg)	-	1.12	11.7	3.00	16.38	11.7	9.36	3.60	5.15	1.98	0.75	0.94

Για κάθε σύνθεση παρασκευάστηκαν συνολικά 6 δοκίμια. Άρα, συνολικά για τις οχτώ διαφορετικές συνθέσεις σκυροδέματος παρασκευάστηκαν  $12 \times 6 = 72$  μήτρες. Οι 6 μήτρες κάθε σύνθεσης παρουσιάζονται αναλυτικά στον **Πίνακα 8**.

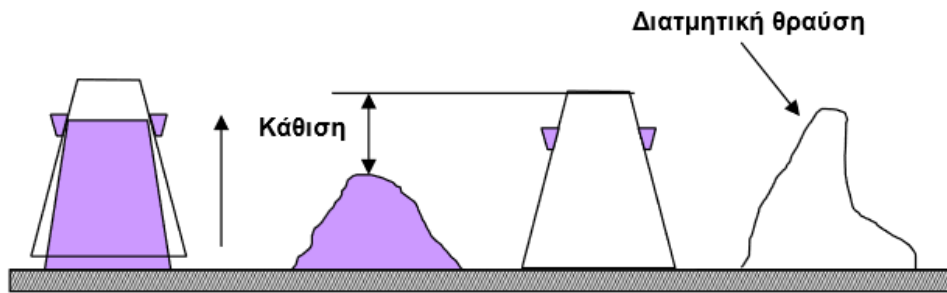
Πίνακας 8: Είδος, πλήθος και διαστάσεις κάθε μήτρας.

Είδος Μήτρας	Πλήθος	Διαστάσεις (mm)
Κοβική	6	100 x 100

Αρχικά έγινε ανάδευση όλων των υλικών στον αναδευτήρα. Στη συνέχεια για να χαρακτηριστεί η εργασιμότητα του σκυροδέματος πραγματοποιήθηκε η δοκιμή κάθισης έτσι όπως ορίζει το πρότυπο ΕΛΟΤ/ΕΝ 12350-2. Στον **Πίνακα 9** παρουσιάζονται τα δεδομένα για τη δοκιμή και στην **Εικόνα 4** απεικονίζεται η διενέργειά της.

Πίνακας 9: Προδιαγραφές της δοκιμής κάθισης, σύμφωνα με το EN 12350-2.

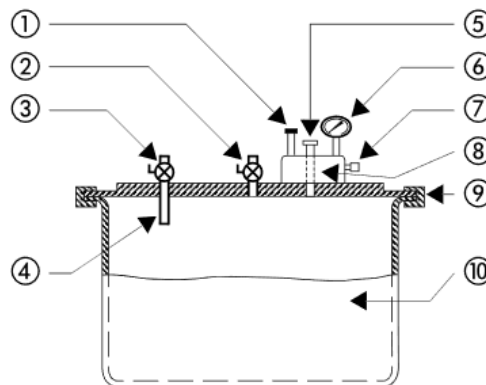
Δοκιμή	Πρότυπο ΕΛΟΤ/ΕΝ	Συνιστώμενη Περιοχή Μέτρησης (ΕΛΟΤ/ΕΝ 206)	Για τιμές	ανοχή
Κάθιση	12350-2	$\geq 10\mu\text{m}$ και $< 210\mu\text{m}$	$\leq 40\mu\text{m}$ $> 50\mu\text{m}$ $< 90\mu\text{m}$ $\geq 100\mu\text{m}$	$\pm 10\mu\text{m}$ $\pm 20\mu\text{m}$ $\pm 30\mu\text{m}$



**Εικόνα 4:** Απεικόνιση της δοκιμής κάθισης. (Κόλιας Στ. 2013-2014)

Εκτός της δοκιμής κάθισης μετρήθηκε ο περιεχόμενος αέρας. Γενικά, στο σκυρόδεμα παρά τη συμπύκνωση, εγκλωβίζεται αέρας. Για παράδειγμα σε σκυρόδεμα με μέγιστο κόκκο αδρανών 32 mm, ο περιεχόμενος αέρας καταλαμβάνει ποσοστό 1%-2% κ.ο και σε μερικές περιπτώσεις μπορεί να ανέλθει σε ποσοστό έως και 4% κ.ο, για σκυροδέματα με λεπτά αδρανή. Ο προσδιορισμός του περιεχόμενου κενού αέρα έγινε σύμφωνα με το πρότυπο EN 12350-7, βάσει της μεθόδου εξισορρόπησης της πίεσης. Σύμφωνα με αυτή, ένας γνωστός όγκος αέρα σε δεδομένη πίεση, εξισορροπείται με άγνωστο όγκο εγκλωβισμένου σε δείγμα σκυροδέματος αέρα, το οποίο δείγμα βρίσκεται εντός σφραγισμένου θαλάμου. Η ένδειξη του μανόμετρου της διάταξης έχει βαθμονομηθεί έτσι ώστε να αντιστοιχεί στο ποσοστό εγκλωβισμένου αέρα που βρίσκεται μέσα στο δείγμα. Στην **Εικόνα 5** αποδίδεται σε σκαρίφημα η συσκευή μέτρησης.

- 1 Αντλία
- 2 Βαλβίδα Β
- 3 Βαλβίδα Α
- 4 Θάλαμοι εκτόνωσης για έλεγχο κατά τη βαθμονόμηση
- 5 Κύρια βαλβίδα αέρα
- 6 Μετρητής πίεσης
- 7 Βαλβίδα εκτόνωσης
- 8 Χώρος αέρα
- 9 Κολάρο σφράγισης
- 10 Δοχείο



**Εικόνα 5:** Συσκευής μέτρησης εγκλωβισμένου αέρα, με τη μέθοδο εξισορρόπησης πίεσης. (Sica Hellas A.B.E.E, 2007)

Τα δοχεία μέτρησης για το συμβατικό σκυρόδεμα έχουν συνήθως χωρητικότητα 8lt, όπως και το δοχείο που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική. Η συμπύκνωση

πραγματοποιείται με δονητή χειρός ή τράπεζα δόνησης. Στην παρούσα διπλωματική, η συμπίκνωση έγινε σε τράπεζα δόνησης. Το βάρος του συμπυκνωμένου σκυροδέματος 8lt, χρησιμοποιήθηκε για τον προσδιορισμό της πυκνότητας νωπού σκυροδέματος.

Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων που αφορούν στο νωπό σκυρόδεμα σκυροδετήθηκαν τα δοκίμια στις μήτρες, όπου και συμπυκνώθηκαν στη μηχανή δόνησης ανά στρώση. Για καλύτερη συμπίκνωση, οι μήτρες γεμίζονταν και δονούνταν σε 2 δόσεις. Την επόμενη ημέρα, τα δοκίμια απομακρύνθηκαν από τις μήτρες και συντηρήθηκαν σε δεξαμενή νερού για 28 ημέρες.

### **2.2.3. Πειραματική μελέτη των χαρακτηριστικών των μειγμάτων με ρευστοποιητές**

#### **2.2.3.1. Πάστες και κονιάματα**

##### **Δοκιμές κάθισης παστών τσιμέντου**

Για τον προσδιορισμό της ρευστότητας της πάστας τσιμέντου, χρησιμοποιήθηκε δοκιμή κάθισης (mini slump test) σύμφωνα με το πρότυπο DIN EN 1015. Η εν λόγω δοκιμή διεξήχθη ως εξής: αρχικά, ορίστηκε ο λόγος νερού προς τσιμέντο (w/c) της πάστας χωρίς την προσθήκη ρευστοποιητή ώστε να δώσει μια εξάπλωση της τάξης των  $18 \pm 0.5\text{cm}$ . Σε αυτή την αναλογία w/c, προσδιορίστηκαν τα ποσοστά των υπερρευστοποιητών που απαιτούνται για να επιτευχθεί μια εξάπλωση της τάξης των  $26 \pm 0.5\text{ cm}$ .

Πιο συγκεκριμένα, μέσα στον αναδευτήρα τοποθετήθηκε η ποσότητα του νερού, έπειτα προστέθηκαν 500 g τσιμέντου και αναδεύτηκαν για 90 sec. Στη συνέχεια έμειναν σε ηρεμία για 1 min και τέλος αναδεύτηκαν και πάλι για 90 sec. Μετά την ανάδευση, η πάστα τσιμέντου χύθηκε αμέσως σε έναν κώνο Vicat (ύψους 40 mm, πάνω διαμέτρου 70 mm, κάτω διαμέτρου 80 mm), τοποθετήθηκε σε μια γυάλινη πλάκα και ο κώνος αφαιρέθηκε κάθετα. Η προκύπτουσα εξάπλωση της πάστας μετρήθηκε δύο φορές, η δεύτερη μέτρηση έγινε σε γωνία  $90^\circ$  ως προς την πρώτη και ο μέσος όρος τους έδωσε την τελική τιμή εξάπλωσης. Αφού προσδιορίστηκε η ποσότητα του νερού (255 g) και ο λόγος w/c =0.51 που απαιτείται για την εξάπλωση των  $18 \pm 0.5\text{cm}$ , ακολούθησαν οι δοκιμές με την προσθήκη των οχτώ διαφορετικών ρευστοποιητών μέχρι να επιτευχθεί εξάπλωση  $26 \pm 0.5\text{ cm}$ . Σε αυτές τις δοκιμές το νερό και ο ρευστοποιητής τοποθετήθηκαν μαζί στον αναδευτήρα και ακολούθησε ακριβώς η ίδια διαδικασία για τον προσδιορισμό της εξάπλωσης.



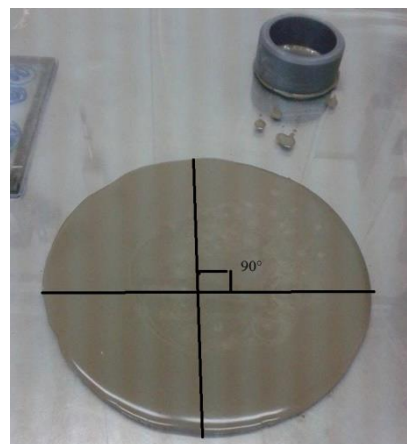
**Εικόνα 6** :Αναδευτήρας.



**Εικόνα 7**:Κώνος Vicat.

Στη δοκιμή που ακολούθησε, μελετήθηκε η επίδραση του χρόνου στην τιμή της κάθισης που είχε επιτευχθεί από την προηγούμενη δοκιμή. Για τη χρονικά εξαρτώμενη (time-dependent) συμπεριφορά ροής της πάστας, 500 g τσιμέντου αναμίχθηκαν με 255 g νερού και το ρευστοποιητή (που δίνει την εξάπλωση των  $26 \pm 0.5$  cm), όπως περιγράφηκε παραπάνω. Μετά από κάθε μέτρηση, η πάστα μεταφερόταν πίσω στον αναδευτήρα για 30 min και καλυπτόταν με μια υγρή πετσέτα για να αποφευχθεί η ξήρανση. Πριν από κάθε μέτρηση, η πάστα αναδευόταν και πάλι για 2 min. Έγιναν 5 μετρήσεις κάθισης με συνολική διάρκεια 120 min.

Τέλος, μελετήθηκε η επίδραση της μεθύστερης προσθήκης (delayed addition) ρευστοποιητή, δηλαδή η επίδραση της χρονικής στιγμής στην τιμή της εξάπλωσης. Στη δοκιμή αυτή, 500 g τσιμέντου αναμίχθηκαν με 255 g για 90 sec, έμειναν σε ηρεμία για 30 sec, προστέθηκε ο ρευστοποιητής και το μείγμα έμεινε χωρίς ανάδευση για 30 sec και τέλος αναδευόταν για 90 sec και τοποθετήθηκαν στον κώνο Vicat.



**Εικόνα 8**: Εκτέλεση δοκιμών κάθισης.

## Προσδιορισμός χρόνου πήξης παστών τσιμέντου

Ο προσδιορισμός του χρόνου πήξης έγινε με βάση το πρότυπο EN 196-3 με συσκευή Vicat για όλους τους τύπους ρευστοποιητών. Μελετήθηκε η επίδραση του ποσοστού των ρευστοποιητών στην τιμή του χρόνου πήξης. Η συσκευή αποτελείται από ένα μεταλλικό πλαίσιο και μια συρόμενη ράβδο. Μια ρυθμιζόμενη ένδειξη κινείται πάνω από μια διαβαθμισμένη κλίμακα.



**Εικόνα 9** :Πειραματική διάταξη και εκτέλεση του προσδιορισμού χρόνου πήξης.

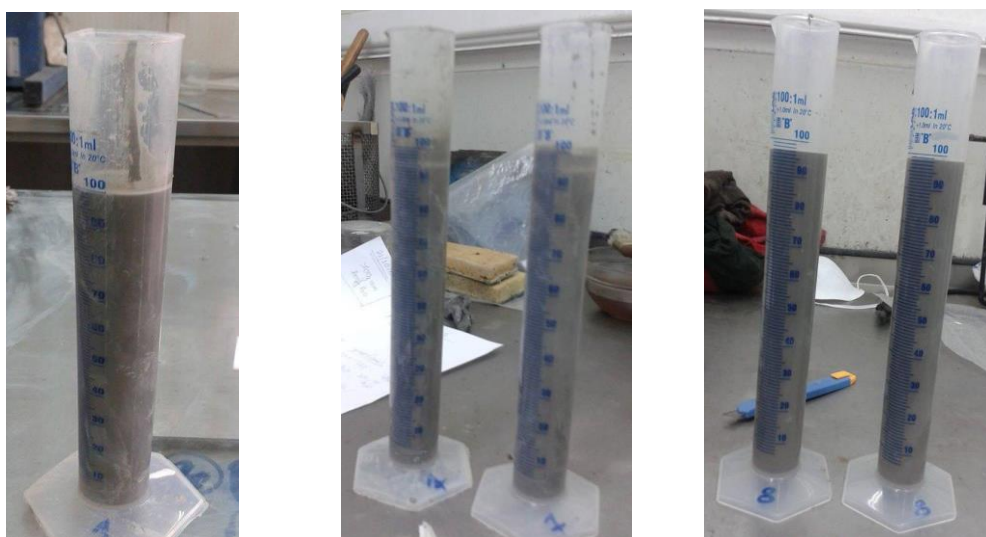
Τα ποσοστά ρευστοποιητών που χρησιμοποιήθηκαν στην εν λόγω δοκιμή είναι τα ελάχιστα ποσοστά 0.2% κ.β. και 2% κ.β. όπως αυτά αναφέρονται στον **Πίνακα 10**. Η ομαδοποίηση προέκυψε με βάση τη ρεολογική συμπεριφορά των παστών στις δοκιμές κάθισης που προηγήθηκαν, και χρησιμοποιήθηκε και στη διεξαγωγή της δοκιμής του διαχωρισμού.

**Πίνακας 10:** Ποσοστά περιεκτικότητας ρευστοποιητή (% κ.β. τσιμέντου).

Κωδικός	Ελάχιστο ποσοστό ρευστοποιητή	Μέγιστο ποσοστό ρευστοποιητή
P1	0.2	2.0
P6	0.2	2.0
P7	0.2	2.0
P8	0.2	2.0
P2	2.0	4.0
P3	2.0	4.0
P4	2.0	4.0
P7	2.0	4.0

### Προσδιορισμός διαχωρισμού παστών τσιμέντου

Στην ακόλουθη δοκιμή μελετήθηκε η επίδραση του ποσοστού του ρευστοποιητή στο ποσοστό του διαχωρισμού. Για τη μελέτη του ποσοστού (%) διαχωρισμού το δείγμα παρασκευάστηκε με την ίδια διαδικασία της δοκιμής χρόνου πήξης και με τα μέγιστα ποσοστά ρευστοποιητών δηλαδή 2.0% κ.β και 4.0% κ.β. (Πίνακας 10). Ύστερα τοποθετήθηκε σε 2 ογκομετρικούς σωλήνες των 100 ml και μετά από 1.30 h μετρήθηκε ο διαχωρισμός που είχε παρατηρηθεί. Ο μέσος όρος των δυο μετρήσεων μας δίνει το τελικό ποσοστό.



Εικόνα 10: Πειραματική διάταξη και εκτέλεση του διαχωρισμού.

### Δοκιμή θλίψης σε πρισματικά δοκίμια κονιαμάτων τσιμέντου

Ο προσδιορισμός αντοχής σε θλίψη έγινε με βάση το πρότυπο EN 196-1, σε μηχανή Matest, Cyber-plus Evolution μέγιστου θλιπτικού φορτίου 250 kN με ρυθμό φόρτισης  $2400 \pm 200$  N/sec. Για τις δοκιμές χρησιμοποιήθηκαν τα πρισματικά δοκίμια διαστάσεων 40 x 40 x 160 mm.



### 2.2.3.2. Σκυρόδεμα

#### Δοκιμή θλίψης σε κυβικά δοκίμια σκυροδέματος

Για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής, χρησιμοποιήθηκε η διάταξη μονοαξονικής φόρτισης Wykynham Farrance, μέγιστου θλιπτικού φορτίου 2500 kN, η οποία φέρει μονάδα ελέγχου της Matest. Η φόρτιση έγινε μέσω δύο πλακών φόρτισης, οι οποίες είναι κατάλληλα κατεργασμένες ώστε να είναι επίπεδες και είχαν μεγαλύτερη επιφάνεια από τις επιφάνειες των μητρών. Ο ρυθμός φόρτισης που χρησιμοποιήθηκε ήταν 5 KN/sec που αντιστοιχεί σε ρυθμό αύξησης της τάσης 0.5 MPa/s.

#### Προσδιορισμός τριχοειδούς απορρόφησης

Για τη διεξαγωγή του πειράματος χρησιμοποιήθηκαν τα κυβικά δοκίμια σκυροδέματος C0, C1 0.31, C8 0.26, C5 1.00, C2 0.83, C7 0.21 και C8 0.26 και μελετήθηκε η επίδραση του ποσοστού ρευστοποιητή στην τριχοειδή απορρόφηση. Τα δοκίμια αφαιρέθηκαν από τη δεξαμενή νερού που συντηρούνταν και στη συνέχεια ξηράθηκαν σε φούρνο στους 91°C μέχρι να σταθεροποιηθεί το βάρος τους (διαφορά δύο διαδοχικών μετρήσεων βάρους σε  $24 \pm 2$  h,  $< 0.1\%$ ). Η διαδικασία ξήρανσης των δοκιμίων διήρκησε από 6 έως 8 ημέρες.



**Εικόνα 11:** Εκτέλεση μετρήσεων για τον προσδιορισμό της τριχοειδούς απορρόφησης.

Η δοκιμή της τριχοειδούς απορρόφησης έγινε με την καταγραφή της αύξησης του βάρους του δοκιμίου, σε συνάρτηση με το χρόνο από την αρχική επαφή του δοκιμίου με το νερό. Πριν την έναρξη της δοκιμής καταγράφηκε το βάρος των δοκιμίων. Στη συνέχεια τοποθετήθηκε μια ειδικά διαμορφωμένη βάση στη δεξαμενή και συμπληρώθηκε με νερό σε στάθμη, ώστε η μέγιστη βύθιση των δοκιμίων να είναι 3 mm. Ακολούθησε η τοποθέτηση των δοκιμίων μέσα στη δεξαμενή, αφού είχαν έρθει σε θερμοκρασία δωματίου και ξεκίνησε η

μέτρηση του χρόνου. Η καταγραφή του βάρους πραγματοποιήθηκε σε χρόνους, ώστε η τους τετραγωνική ρίζα να είναι φυσικός αριθμός. Συνολικά έγιναν 16 μετρήσεις. Πριν από κάθε μέτρηση, η επιφάνεια που βρισκόταν σε επαφή με το νερό σκουπιζόταν ώστε να αφαιρεθεί η περίσσεια νερού, αλλά η επιφάνεια να συνεχίζει να παραμένει υγρή.

### Προσδιορισμός πορώδους

Για τον υπολογισμό του πορώδους χρησιμοποιήθηκαν τα ίδια δοκίμια με αυτά της τριχοειδούς απορρόφησης. Καταγράφηκε το βάρος του κάθε δοκιμίου σε τρεις διαφορετικές καταστάσεις. Αρχικά στην κορεσμένη κατάσταση, αμέσως μετά την έξοδο από τη δεξαμενή σε περιβάλλον αέρα και έπειτα σε περιβάλλον νερού υπό αιώρηση (**Εικόνα 12**). Τέλος, καταγράφηκε το βάρος των δοκιμίων αμέσως μετά την ξήρανση τους μέχρι τη σταθεροποίηση του βάρους τους.

Το ανοικτό πορώδες (OP) προκύπτει από το λόγο της διαφοράς του βάρους του κορεσμένου δοκιμίου από το βάρος του δοκιμίου μετά την ξήρανση του, προς τη διαφορά του βάρους του κορεσμένου δοκιμίου από το βάρος του κορεσμένου δοκιμίου υπό αιώρηση.

Δηλαδή,  $OP = (\alpha - \beta) / (\alpha - \gamma)$ , όπου  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  οι καταγραφές του βάρους στις τρεις διαφορετικές καταστάσεις όπως αυτές περιγράφηκαν παραπάνω.



**Εικόνα 12:** Μέτρηση βάρους υπό αιώρηση.

## 2.3. Σχολιασμός – Αξιολόγηση Αποτελεσμάτων

### 2.3.1. Πάστες και κονιάματα

#### Δοκιμές κάθισης παστών τσιμέντου

Αμέσως μετά την ολοκλήρωση της παρασκευής της πάστας τσιμέντου P0, προσδιορίστηκε η απαιτούμενη ποσότητα νερού για εξάπλωση  $18 \pm 0.5$  cm. Τα αποτελέσματα των δοκιμών που προέκυψαν παρουσιάζονται στον **Πίνακα 11**.

**Πίνακας 11:** Δοκιμές εξάπλωσης και προσδιορισμός ποσότητας νερού P0.

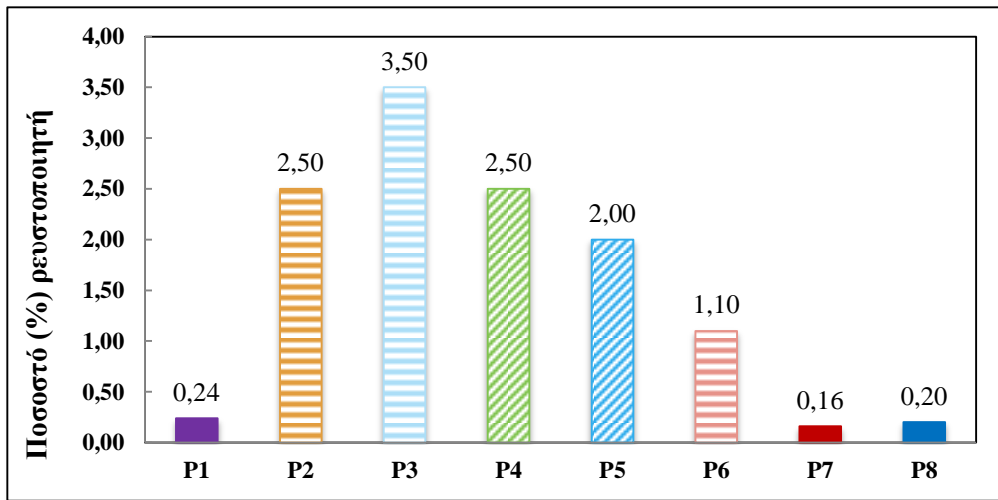
Δοκιμές	H <sub>2</sub> O (g)	1η μέτρηση	2η μέτρηση	Average spread (mm)
1	265	185	185	185
2	265	190	190	190
3	<b>255</b>	180	185	<b>182,5</b>
4	<b>255</b>	180	180	<b>180</b>

Με βάση την ποσότητα του νερού που καθορίστηκε παραπάνω, έγιναν οι δοκιμές εξάπλωσης για κάθε ρευστοποιητή με σκοπό η εξάπλωση των μειγμάτων να φτάσει την τιμή των  $26 \pm 0.5$ cm. Στα μείγματα P1, P7 και P8, δηλαδή στα μείγματα με τους PCE ρευστοποιητές, παρατηρήθηκε τέλεια ομοιογένεια σε όλες τις φάσεις της δοκιμής (**Πίνακας 12**).

Τα αποτελέσματα των παραπάνω δοκιμών εξάπλωσης παρατίθενται αναλυτικά στον **Πίνακα 12** και στην **Εικόνα 13**.

Πίνακας 12: Εξάπλωση και προσδιορισμός ποσότητας ρευστοποιητή.

Κωδικός	Επαναλήψεις	H <sub>2</sub> O (g)	Ρευστοποιητής (%)	Εξάπλωση 1 (mm)	Εξάπλωση 2 (mm)	Μέση τιμή εξάπλωσης (mm)
P1	1	255	0.22	250	250	250.0
	2	255	<b>0.24</b>	260	265	<b>262.5</b>
	3	255	<b>0.24</b>	260	265	<b>262.5</b>
P2	1	255	1.00	190	190	190.0
	2	255	2.00	240	240	240.0
	3	255	<b>2.50</b>	260	260	<b>260.0</b>
	4	255	<b>2.50</b>	260	265	<b>262.5</b>
P3	1	255	2.50	240	240	240.0
	2	255	3.00	245	250	247.5
	3	255	<b>3.50</b>	260	265	<b>262.5</b>
	4	255	<b>3.50</b>	260	260	<b>260.0</b>
P4	1	255	2.00	245	250	247.5
	2	255	<b>2.50</b>	260	260	<b>260.0</b>
	3	255	<b>2.50</b>	260	260	<b>260.0</b>
P5	1	255	2.50	270	270	270.0
	2	255	<b>2.00</b>	255	260	<b>257.5</b>
	3	255	<b>2.00</b>	255	260	<b>257.5</b>
P6	1	255	0.50	230	230	230.0
	2	255	1.00	255	250	252.5
	3	255	<b>1.10</b>	255	260	<b>257.5</b>
	4	255	<b>1.10</b>	265	260	<b>262.5</b>
P7	1	255	0.50	420	430	425.0
	2	255	0.15	240	240	240.0
	3	255	<b>0.16</b>	260	260	<b>260.0</b>
	4	255	<b>0.16</b>	265	265	<b>265.0</b>
P8	1	255	<b>0.20</b>	255	260	<b>257.5</b>
	2	255	<b>0.20</b>	260	260	<b>260.0</b>

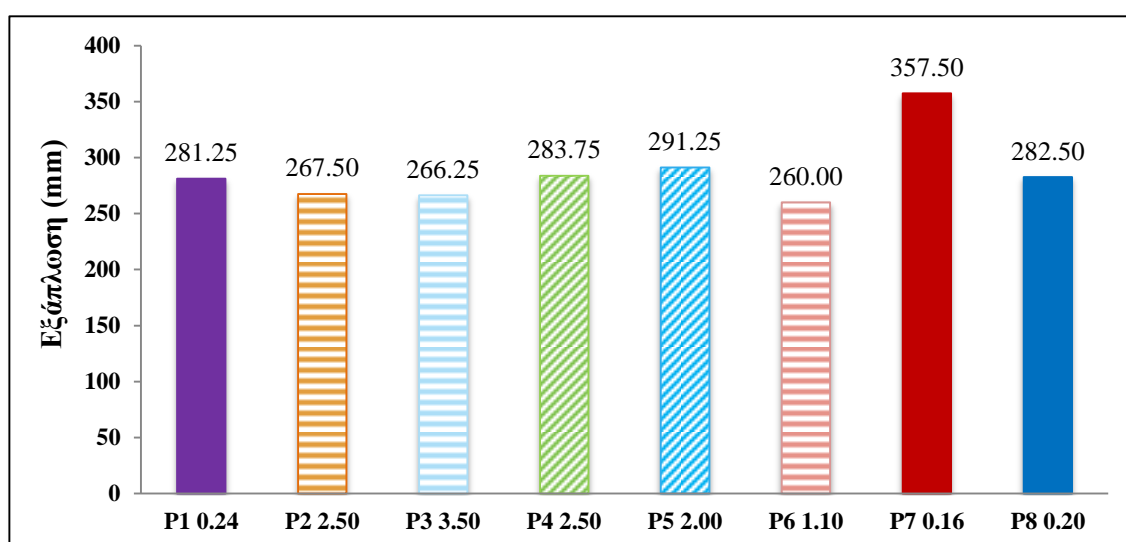


**Εικόνα 13:** Ποσοστά (%) ρευστοποιητών από τη δοκιμή κάθισης.

Στη συνέχεια, καταγράφηκαν οι τιμές της εξάπλωσης με μεθύτερη προσθήκη (delayed addition) των ρευστοποιητών. Σε όλες τις περιπτώσεις παρατηρήθηκε αύξηση της τιμής της εξάπλωσης. Τα αποτελέσματα παρατίθενται αναλυτικά στον **Πίνακα 13** και στην **Εικόνα 14**.

**Πίνακας 13:** Εξάπλωση και προσδιορισμός ποσότητας ρευστοποιητή στη μεθύτερη προσθήκη.

Κωδικός	Επαναλήψεις	H <sub>2</sub> O (g)	Ρευστοποιητής (%)	Εξάπλωση 1 (mm)	Εξάπλωση 2 (mm)	Μέση τιμή εξάπλωσης (mm)
P1	1	255	<b>0.24</b>	285	290	<b>281.25</b>
	2	255	<b>0.24</b>	270	280	
P2	1	255	<b>2.50</b>	270	265	<b>267.50</b>
	2	255	<b>2.50</b>	270	265	
P3	1	255	<b>3.50</b>	260	265	<b>266.25</b>
	2	255	<b>3.50</b>	270	270	
P4	1	255	<b>2.50</b>	280	285	<b>283.75</b>
	2	255	<b>2.50</b>	285	285	
P5	1	255	<b>2.00</b>	280	285	<b>291.25</b>
	2	255	<b>2.00</b>	300	300	
P6	1	255	<b>1.10</b>	260	265	<b>260.00</b>
	2	255	<b>1.10</b>	260	255	
P7	1	255	<b>0.16</b>	360	355	<b>357.50</b>
	2	255	<b>0.16</b>	360	355	
P8	1	255	<b>0.20</b>	285	285	<b>282.50</b>
	2	255	<b>0.20</b>	280	280	



**Εικόνα 14:** Μέση τιμή δοκιμών εξάπλωσης (delayed addition).

Στη δοκιμή της χρονικά εξαρτώμενης (time-dependent) εξάπλωσης, γενικά παρατηρήθηκε μία ομαλή μείωση της τιμής της εξάπλωσης με την πάροδο του χρόνου. Πιο συγκεκριμένα, η πάστα P2 στα 30 min, που ήταν η πρώτη μέτρηση, είχε πήξει και μετά την ανάμειξη των 2 min ρευστοποιήθηκε πάλι. Στα 90 min και πριν την ανάμειξη, παρατηρήθηκε διαχωρισμός των φάσεων, με το μεγαλύτερο μέρος της πάστας να έχει πήξει και από πάνω να υπάρχει μια υγρή επικάλυψη (**Εικόνα 15**). Παρόμοια συμπεριφορά έδειξαν και οι πάστες P3, P4 και P5 (LS).



**Εικόνα 15:** Εκτέλεση δοκιμής χρονικά εξαρτώμενης προσθήκης ρευστοποιητή πάστας P2.

Στην πάστα P6 παρατηρήθηκε απόμειξη και διαχωρισμός φάσεων. Κατά την ανάδευση ομογενοποιούνταν πάλι αλλά κατά την εξάπλωση διαχωριζόταν. Στο κάτω μέρος το μείγμα έπηξε πολύ γρήγορα, ενώ παρατηρήθηκαν και δακτύλιοι με διαφορετική συμπεριφορά. Ο εξωτερικός δακτύλιος πάχους 4 cm ήταν τελείως ρευστός χωρίς να αρχίζει να πήζει. Ακολουθούσε ένας δακτύλιος περίπου διπλάσιου πάχους που ήταν λιγότερο ρευστός και τέλος στο κέντρο η πάστα έπηξε αμέσως (**Εικόνα 16**).

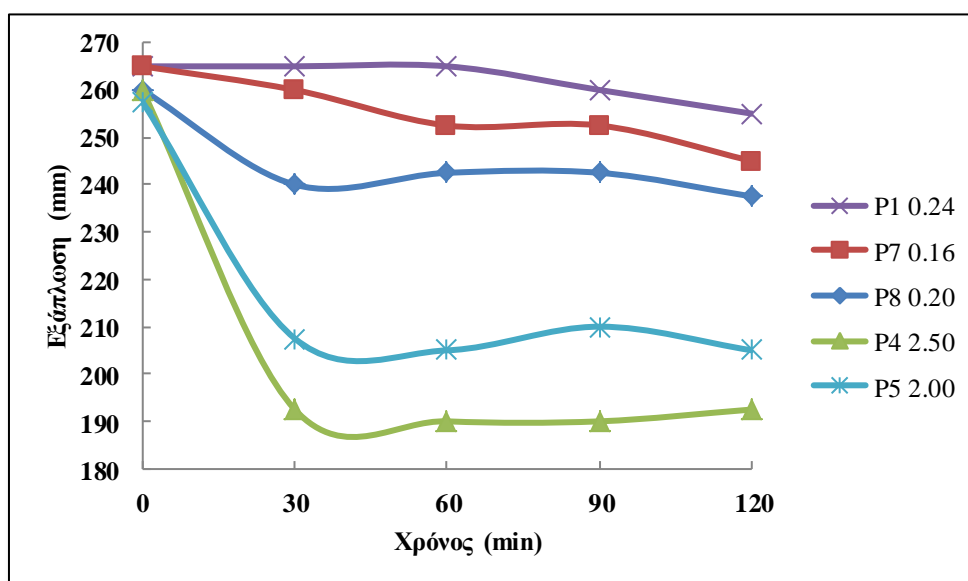


**Εικόνα 16:** Εκτέλεση δοκιμής χρονικά εξαρτώμενης προσθήκης ρευστοποιητή πάστας P2.

Αναφορικά με τον τύπο των ρευστοποιητών, η ρεολογική συμπεριφορά των παστών υποδηλώνει την διαφορετική απόκριση τους στο χρόνο. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, οι PCE ρευστοποιητές διατηρούν την εργασιμότητα των παστών για περισσότερο χρόνο από τους LS. Επίσης, οι LS παρουσιάζουν σημαντική απώλεια κάθισης, φαινόμενο που παρατηρείται κυρίως στην πάστα P2 2.50. Τα αποτελέσματα παρατίθενται στον **Πίνακα 14** και στις **Εικόνες 17** και **18**.

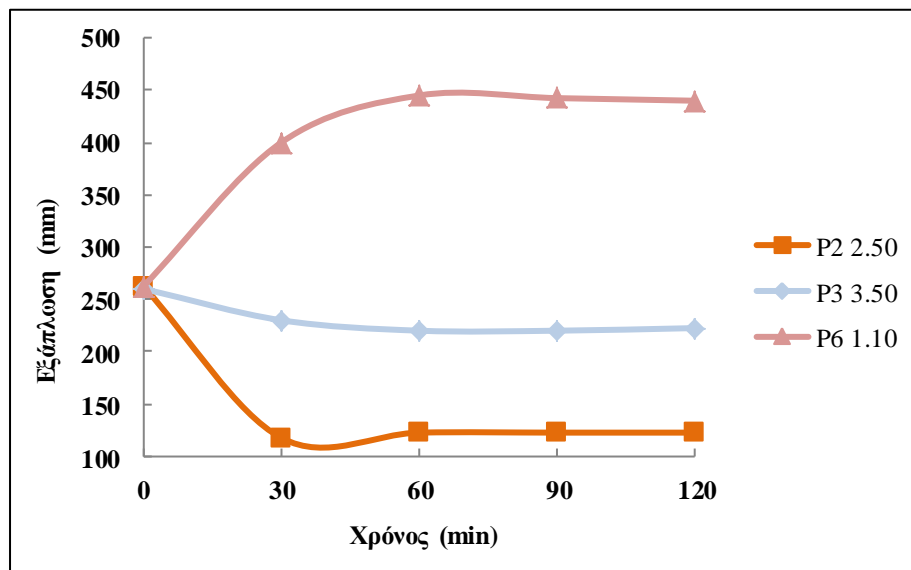
**Πίνακας 14:** Χρονικά εξαρτώμενη (time-dependent) εξάπλωση.

Εξάπλωση (mm) \ Χρόνος (min)	P1 0.24	P2 2.50	P3 3.50	P4 2.50	P5 2.00	P6 1.10	P7 0.16	P8 0.20
0	265.0	262.5	260.0	260.0	257.5	262.5	265.0	260.0
30	265.0	117.5	230.0	192.5	207.5	400.0	260.0	240.0
60	265.0	122.5	220.0	190.0	205.0	445.0	252.5	242.5
90	260.0	122.5	220.0	190.0	210.0	442.5	252.5	242.5
120	255.0	122.5	222.5	192.5	205.0	440.0	245.0	237.5



**Εικόνα 17:** Μεταβολή εξάπλωσης με το χρόνο στη δοκιμή της χρονικά εξαρτώμενης (time-dependent) εξάπλωσης. (ρευστοποιητές)





**Εικόνα 18:** Μεταβολή εξάπλωσης με το χρόνο στη δοκιμή της χρονικά εξαρτώμενης (time-dependent) εξάπλωσης. (επιβραδυντές)

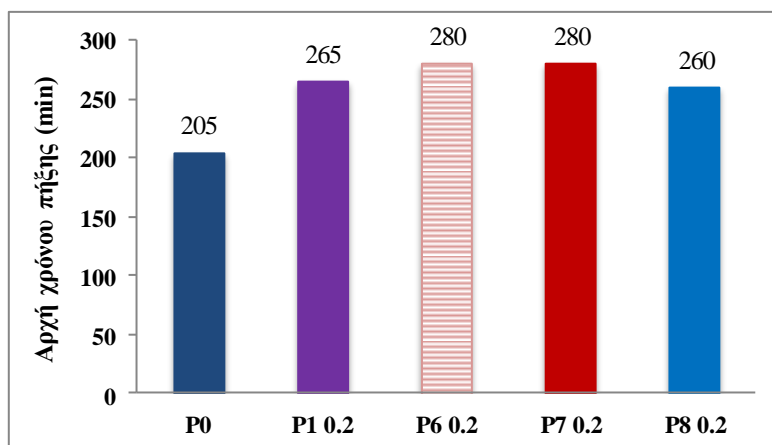
#### Προσδιορισμός χρόνου πήξης παστών τσιμέντου

Πριν τον προσδιορισμό του χρόνου πήξης, έγινε δοκιμή εξάπλωσης στις πάστες τσιμέντου, όπου όλα τα μείγματα παρουσίασαν εξάπλωση της τάξης των 80 mm δηλαδή όσο είναι η βάση του κώνου χωρίς περαιτέρω αύξηση. Είναι προφανές πως τα μείγματα με τα χαμηλά ποσοστά ρευστοποιητών 0.2% κ.β. και 2% κ.β. δεν απέκτησαν καθόλου ρευστότητα (**Πίνακας 15**).

Ακολούθησε ο προσδιορισμός του χρόνου πήξης, όπου η πάστα P0 παρουσίασε το μικρότερο χρόνο καθώς πρόκειται για το αμιγές μείγμα. Οι PCE ρευστοποιητές 1, 6, 7 και 8 είχαν μικρή επίδραση στο χρόνο πήξης. Οι πάστες P2 και P3 έπηξαν αμέσως και συγκεκριμένα μέσα στα πρώτα δέκα λεπτά. Τέλος, οι P4 και P5 είχαν μια εντελώς διαφορετική συμπεριφορά καθώς έπηξαν πολύ καθυστερημένα. Η τελευταία μέτρηση έγινε περίπου 6 ώρες μετά, και τα δείγματα δεν είχαν αρχίσει καθόλου να πήζουν. Τα αποτελέσματα παρατίθενται αναλυτικά στον **Πίνακα 15** και στην **Εικόνα 19**.

**Πίνακας 15:** Προσδιορισμός εξάπλωσης και χρόνου πήξης παστών τσιμέντου.

Κωδικός	Ρευστοποιητής (%)	Μέση Τιμή εξάπλωσης (mm)	Αρχή χρόνου πήξης (min)
P0	-		205
P1	0.2	80	265
P6	0.2	80	280
P7	0.2	80	280
P8	0.2	80	260
P2	2.0	80	άμεση πήξη
P3	2.0	80	άμεση πήξη
P4	2.0	80	καθυστερημένη πήξη
P5	2.0	80	καθυστερημένη πήξη



**Εικόνα 19:** Χρόνος πήξης παστών τσιμέντου.

### Προσδιορισμός διαχωρισμού παστών τσιμέντου

Διαχωρισμός παρατηρήθηκε μόνο στις πάστες P1, P6, P7 και P8. Το φαινόμενο ήταν εντονότερο στην πάστα P6, ασθενέστερο στις P7 και P8, και ακόμα πιο ασθενές στην P1. Οι

P2 και P3 έπηξαν αμέσως μετά την τοποθέτηση τους στους ογκομετρικούς σωλήνες, ενώ οι P4 και P5 παρουσίασαν επιφανειακή πήξη και στο εσωτερικό ήταν πιο ρευστές. Πριν την τοποθέτηση των παστών στους ογκομετρικούς σωλήνες έγινε μέτρηση της εξάπλωσης τους. Οι πάστες P2 και P3 που έπηξαν αμέσως είχαν τη μικρότερη εξάπλωση. Η μεγαλύτερη εξάπλωση παρατηρήθηκε από την P6 (επιβραδυντής), η οποία είχε και το μεγαλύτερο ποσοστό διαχωρισμού. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στον **Πίνακα 16**.

**Πίνακας 16:** Εξάπλωση και ποσοστό διαχωρισμού παστών τσιμέντου.

Κωδικός	Ρευστοποιητής (%)	Μέση Τιμή εξάπλωσης (mm)	Διαχωρισμός (%)
P1	2.0	230.0	0.50
P6	2.0	327.5	5.26
P7	2.0	80.0	1.37
P8	2.0	305.0	1.01
P2	4.0	90.0	Πήξη
P3	4.0	80.0	Πήξη
P4	4.0	100.0	επιφανειακή πήξη
P5	4.0	140.0	επιφανειακή πήξη

#### Δοκιμή θλίψης σε πρισματικά δοκίμια κονιαμάτων τσιμέντου

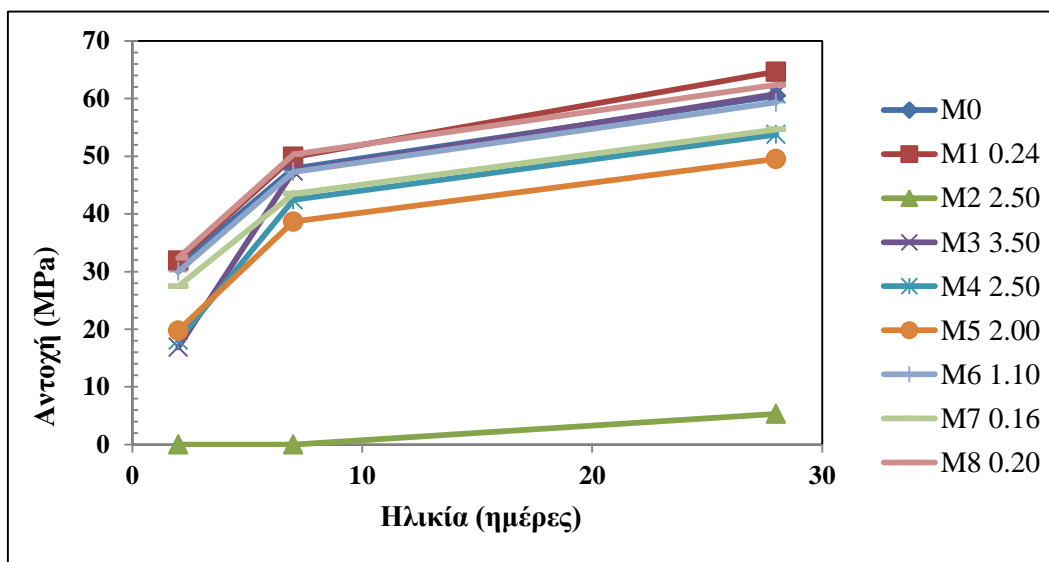
Τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής των πρισματικών δοκιμίων, σε ηλικία 2, 7 και 28 ημερών δίνονται στον **Πίνακα 17**. Στον ίδιο πίνακα παρατίθενται και η μέση τιμή αντοχών για κάθε σύνθεση.

**Πίνακας 17:** Θλιπτική αντοχή πρισματικών δοκιμών σε ηλικία 2,7 και 28 ημερών και μέση τιμή (Μ.Τ) της κάθε σύνθεσης

Δοκίμιο	2 Ημέρες		7 Ημέρες		28 Ημέρες	
	Θλιπτική Αντοχή (MPa)	Μ.Τ. (MPa)	Θλιπτική Αντοχή (MPa)	Μ.Τ. (MPa)	Θλιπτική Αντοχή (MPa)	Μ.Τ. (MPa)
<b>M0 A</b>	31.20	31.125	47.50	47.85	59.35	60.475
<b>M0 B</b>	31.05		48.20		61.60	
<b>M1 0.24 A</b>	32.20	31.90	48.80	49.875	64.70	64.65
<b>M1 0.24 B</b>	31.60		50.95		64.60	
<b>M2 2.50 A</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	6.40	5.325
<b>M2 2.50 B</b>	0.00		0.00		4.25	
<b>M3 3.50 A</b>	16.80	16.85	46.70	47.40	61.95	60.80
<b>M3 3.50 B</b>	16.90		48.10		59.65	
<b>M4 2.50 A</b>	18.05	18.075	41.85	42.425	51.80	53.75
<b>M4 2.50 B</b>	18.10		43.00		55.70	
<b>M5 2.00 A</b>	19.10	19.75	37.70	38.65	47.85	49.525
<b>M5 2.00 B</b>	20.40		39.60		51.20	
<b>M6 1.10 A</b>	30.00	30.00	47.05	47.275	60.90	59.325
<b>M6 1.10 B</b>	30.00		47.50		57.75	
<b>M7 0.16 A</b>	26.60	27.425	44.60	43.5	52.00	54.65
<b>M7 0.16 B</b>	28.25		42.40		57.30	
<b>M8 0.20 A</b>	32.25	32.375	50.40	50.325	63.70	62.375
<b>M8 0.20 B</b>	32.50		50.25		61.05	

Στη συνέχεια παρουσιάζεται συγκριτικό διάγραμμα για τη θλιπτική αντοχή όλων των συνθέσεων χρησιμοποιώντας ως αντιπροσωπευτική τιμή για την κάθε σύνθεση τη μέση τιμή. Όπως μπορεί κανείς να διακρίνει, μόνο η προσθήκη των εμπορικών PCE ρευστοποιητών 1, 8 αυξάνουν λίγο τη θλιπτική αντοχή των δοκιμών σε σχέση με το αμιγές δείγμα M0. Η προσθήκη του LS επιβραδυντή 3 είχε ως αποτέλεσμα την καθυστερημένη ανάπτυξη αντοχής στις 2 ημέρες, η οποία όμως ανέκαμψε στις επόμενες ηλικίες. Η προσθήκη του επιβραδυντή 6 είχε σαν αποτέλεσμα περίπου ίδιες τιμές θλιπτικής αντοχής με το αμιγές δοκίμιο, ενώ η

προσθήκη των 4, 5 (LS) και 7 (PCE) μείωσαν την αντοχή των δοκιμίων. Τέλος, πολύ σημαντική ήταν η επίδραση του LS επιβραδυντή 2, ο οποίος φαίνεται να ανέστειλε την ανάπτυξη θλιπτικής αντοχής. Στις 2 και 7 ημέρες δεν αναπτύχθηκε καθόλου θλιπτική αντοχή, ενώ ήταν εξαιρετικά μικρή στις 28 ημέρες.



**Εικόνα 20:** Μέση τιμή θλιπτικής αντοχής πρισματικών δοκιμίων στις 2, 7 και 28 ημέρες.

Συνοψίζοντας, οι PCE ρευστοποιητές είχαν μικρή επίδραση στη θλιπτική αντοχή και ειδικά στην πρώιμη αντοχή σε σχέση με τα άλλα είδη ρευστοποιητών, γεγονός που αναφέρεται και στη διεθνή βιβλιογραφία.

### 2.3.2. Σκυρόδεμα

Αμέσως μετά την ολοκλήρωση της παρασκευής του σκυροδέματος ελέγχθηκαν οι ιδιότητες του κατά τη νωπή του φάση. Οι ιδιότητες αυτές περιλαμβάνουν την κάθιση, την περιεκτικότητα σε αέρα και την πυκνότητα. Τα αποτελέσματα που προέκυψαν για κάθε σύνθεση παρουσιάζονται συγκεντρωτικά στον **Πίνακα 18**.

**Πίνακας 18:** Ιδιότητες νωπού σκυροδέματος όλων των συνθέσεων

	<b>C0</b>	<b>C1 0.31</b>	<b>C2 3.25</b>	<b>C3 4.55</b>	<b>C4 3.25</b>	<b>C5 2.60</b>	<b>C6 0.21</b>	<b>C7 1.43</b>	<b>C8 0.26</b>
<b>Κάθιση (mm)</b>	50	100	250	250	250	220	150	240	100
<b>Περιεκτικότητα σε Αέρα (%)</b>	2.00	1.35	3.60	4.60	3.70	2.80		11.50	1.10
<b>Πυκνότητα (g/l)</b>	2394	2394	2345	2255	2258	2356	2344	2165	2402

Όπως προκύπτει από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων, δεν εμπίπτουν όλες οι αρχικές συνθέσεις στην ίδια κατηγορία κάθισης. Η σύνθεση C0 (αναφοράς) είχε τη μικρότερη κάθιση και ανήκει στην κατηγορία S2 (50-90 mm). Οι συνθέσεις C1 0.31, C6 0.21 και C8 0.26 ανήκουν στην κατηγορία S3 (100-150 mm). Οι συνθέσεις C2 3.25, C3 4.55, C4 3.25, C5 2.60 και C7 1.43 παρουσίασαν πολύ μεγάλη κάθιση και ανήκουν στην κατηγορία S5 (>220). Προκειμένου οι συνθέσεις σκυροδέματος να εντάσσονται επί το πλείστον στην ίδια κατηγορία κάθισης (S3), έγιναν νέες συνθέσεις με κατάλληλη ποσότητα ρευστοποιητών, οι οποίες απεικονίζονται αναλυτικά στον **Πίνακα 19**. Οι νέες συνθέσεις ανήκουν στην κατηγορία S3.

**Πίνακας 19:** Ιδιότητες νοπού σκυροδέματος.

	<b>C2 0.83</b>	<b>C5 1.00</b>	<b>C7 0.55</b>
<b>Κάθιση (mm)</b>	150	130	150
<b>Περιεκτικότητα σε Αέρα (%)</b>	2.9	3.8	7.0
<b>Πυκνότητα (g/l)</b>	2340	2291	2274

Όσον αφορά την περιεκτικότητα σε εγκλωβισμένο αέρα, οι συνθέσεις που παρασκευάστηκαν παρουσίασαν μεγάλο εύρος τιμών. Οι εμπορικοί PCE ρευστοποιητές 1 και 8 μείωσαν το ποσοστό εγκλωβισμένου αέρα. Ο PCE ρευστοποιητής 7 είχε τη χειρότερη επίδραση καθώς αύξησε κατακόρυφα το ποσοστό του εγκλωβισμένου αέρα. Τέλος τόσο οι LS ρευστοποιητές όσο και οι LS επιβραδυντές αύξησαν το ποσοστό του αέρα. Αναφορικά με την πυκνότητα, όλες οι συνθέσεις παρουσίασαν τιμές της τάξης των 2300 g/l.

Στη συνέχεια θα μελετηθούν τα αποτελέσματα των συνθέσεων C0, C1 0.31, C2 0.83, C4 3.25, C5 1.00, C6 0.21, C7 0.55 και C8 0.26, στις οποίες θα εξεταστεί η επίδραση του ποσοστού ρευστοποιητή στις ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος για κοινή κατηγορία κάθισης S3.

### Δοκιμή θλίψης σε κυβικά δοκίμια σκυροδέματος

Τα αποτελέσματα της θλιπτικής αντοχής κυβικών δοκιμίων σε ηλικία 7 και 28 ημερών δίνονται στον **Πίνακα 20**. Στον ίδιο πίνακα παρατίθενται και η μέση τιμή αντοχών για κάθε σύνθεση.

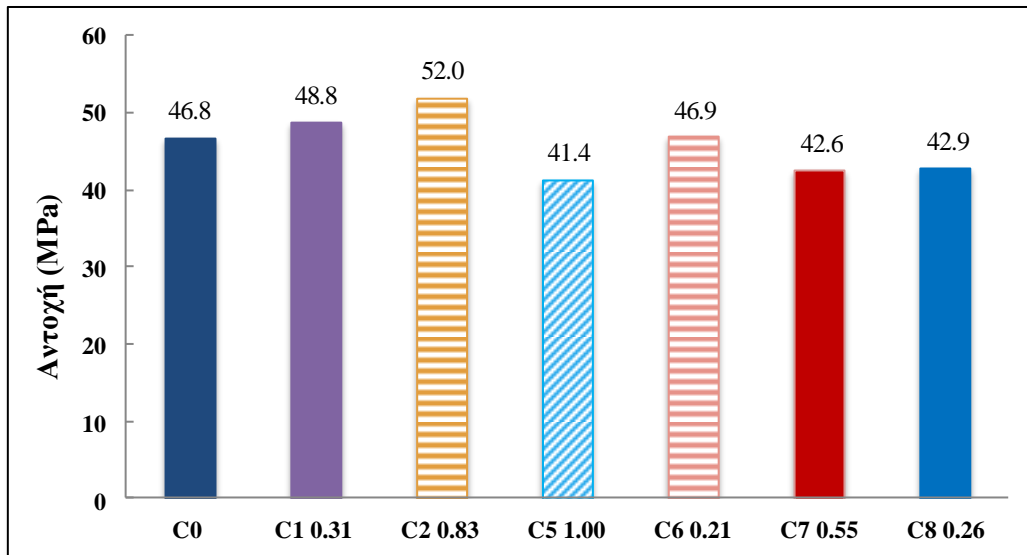
**Πίνακας 20:** Θλιπτική αντοχή κυβικών δοκιμίων σε ηλικία 7 και 28 ημερών και μέση τιμή (Μ.Τ) της κάθε σύνθεσης.

Δοκίμιο	7 Ημέρες		28 Ημέρες	
	Θλιπτική Αντοχή (MPa)	Μ.Τ. (MPa)	Θλιπτική Αντοχή (MPa)	Μ.Τ. (MPa)
<b>C0 A</b>	46.64	46.80	59.36	58.90
<b>C0 B</b>	47.02		58.34	
<b>C1 0.31 A</b>	48.30	48.80	60.99	59.00
<b>C1 0.31 B</b>	49.40		57.01	
<b>C2 0.83 A</b>	52.70	52.00	62.60	63.60
<b>C2 0.83 B</b>	51.40		64.70	
<b>C4 3.25 A</b>	25.00	25.00	49.06	46.20
<b>C4 3.25 B</b>	0.00		43.32	
<b>C5 1.00 A</b>	41.00	41.40	54.50	54.90
<b>C5 1.00 B</b>	41.80		55.30	
<b>C6 0.21 A</b>	46.90	46.90	62.21	59.40
<b>C6 0.21 B</b>	47.00		56.65	
<b>C7 0.55 A</b>	43.20	42.60	46.20	46.50
<b>C7 0.55 B</b>	42.10		46.70	
<b>C8 0.26 A</b>	38.90	42.90	57.75	58.20
<b>C8 0.26 B</b>	46.80		58.67	

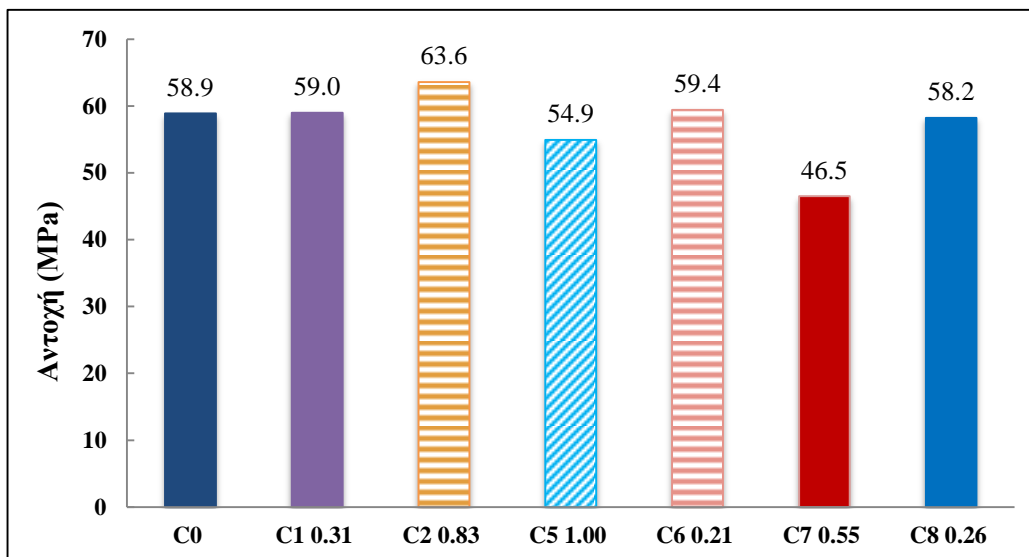
Στη συνέχεια παρουσιάζονται συγκριτικά ραβδογράμματα για τη θλιπτική αντοχή όλων των συνθέσεων χρησιμοποιώντας ως αντιπροσωπευτική τιμή για την κάθε σύνθεση τη μέση τιμή. Οι τιμές παρουσιάζονται αναλυτικά για τις 7 και 28 ημέρες στις **Εικόνες 21** και **22**, αντίστοιχα. Όπως μπορεί κανείς να διακρίνει, η μέση θλιπτική αντοχή επηρεάζεται από την προσθήκη των ρευστοποιητών. Η προσθήκη του LS ρευστοποιητή 4, επηρέασε αρνητικά



τη θλιπτικής αντοχή, με εντονότερη μείωση στις 7 ημέρες. Μειωμένες τιμές θλιπτικής αντοχής σε σχέση με τη σύνθεση αναφοράς παρουσίασαν επίσης και τα δοκίμια των συνθέσεων C5 1.00, C7 0.66 και C8 0.26. Αντιθέτως, τα δοκίμια C1 0.31, C2 0.83 και C6 0.21 είχαν αυξημένες τιμές σε σχέση με το αμιγές, με μεγαλύτερη αυτή του C2 0.83.



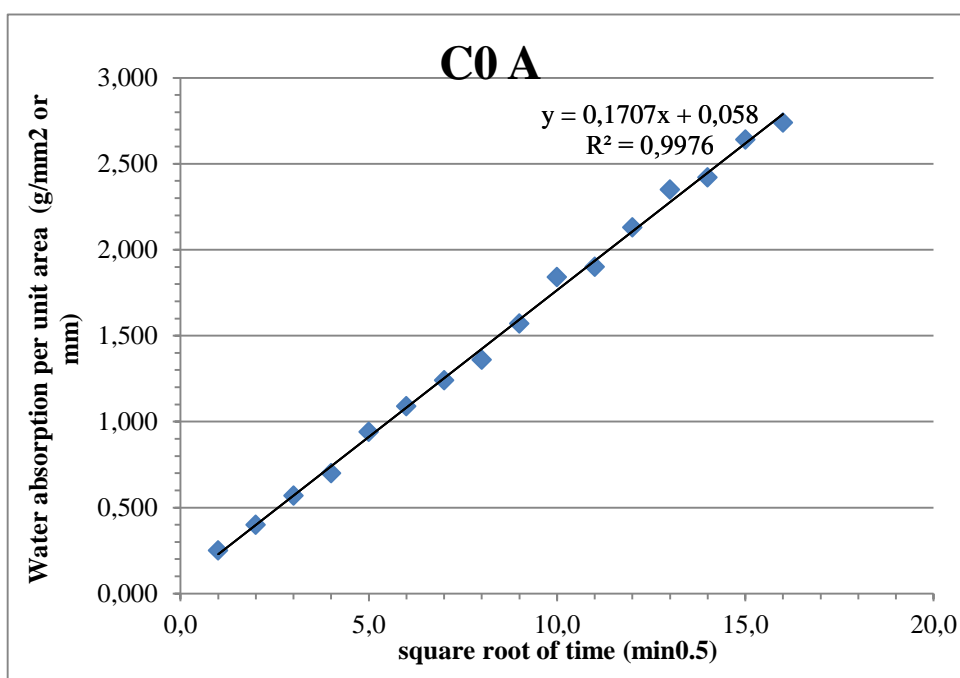
Εικόνα 21: Μέση τιμή θλιπτικής αντοχής κυβικών δοκιμίων στις 7 ημέρες.



Εικόνα 22: Μέση τιμή θλιπτικής αντοχής κυβικών δοκιμίων στις 28 ημέρες.

### Τριχοειδής απορρόφηση

Στην **Εικόνα 23** παρουσιάζεται για το δοκίμιο C0 A η καμπύλη αθροιστικής απορρόφησης του νερού  $\Sigma(\Delta W/A)/\rho w$  σε συνάρτηση με την τετραγωνική ρίζα του χρόνου  $T^{1/2}$ , με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων. Από τη μορφή του διαγράμματος φαίνεται ότι τα αποτελέσματα μπορούν να αποτελέσουν σημεία μιας γραμμικής καμπύλης της μορφής  $y = ax + b$ , όπου  $y = \Sigma(\Delta W/A)/\rho w$  και  $x = T^{1/2}$ . Από την κλίση της ευθείας προκύπτει η τιμή της τριχοειδούς απορρόφησης  $S$ . Για το δοκίμιο C0 A η τριχοειδής απορρόφηση είναι  $S = 0,1707 \text{ mm}/\text{min}^{0.5}$ .



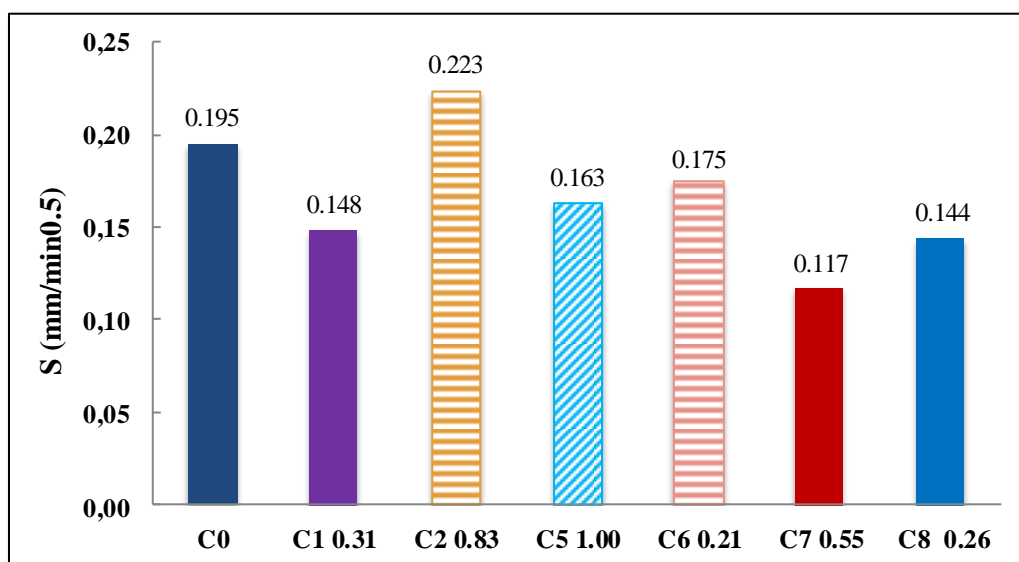
**Εικόνα 23:** Διάγραμμα απορρόφησης νερού συναρτήσει της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου, για το δοκίμιο C0 A.

Σχεδιάζοντας τα διαγράμματα και για τα υπόλοιπα δοκίμια προκύπτουν όλες οι τιμές της τριχοειδούς απορρόφησης, οι οποίες εμφανίζονται συνολικά στον **Πίνακα 21**. Επίσης, δίνονται και οι τιμές των αντίστοιχων συντελεστών γραμμικής συσχέτισης.

**Πίνακας 21:** Αποτελέσματα δοκιμής τριχοειδούς απορρόφησης.

Κωδικός	Τριχοειδής απορρόφηση S (mm/min <sup>0.5</sup> )	% Μεταβολή S ως προς το αμιγές σκυρόδεμα	Συντ. γραμμικής συσχέτισης R <sup>2</sup>
<b>C0</b>	0.195		0.99
<b>C1 0.31</b>	0.148	-23.98	0.99
<b>C2 0.83</b>	0.223	14.46	0.99
<b>C4 3.25</b>	0.163	-16.49	0.99
<b>C6 0.21</b>	0.175	-10.12	0.98
<b>C7 0.55</b>	0.117	-40.16	0.99
<b>C8 0.26</b>	0.144	-26.26	0.99

Όπως φαίνεται και από το διάγραμμα της **Εικόνας 24**, η προσθήκη των ρευστοποιητών οδήγησε κυρίως σε μείωση του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης. Η μεγαλύτερη μείωση παρατηρήθηκε στη σύνθεση C7 0.55 όπου το ποσοστό μείωσης έφτασε το 40.16% σε σχέση με το αμιγές σκυρόδεμα. Μοναδική εξαίρεση αποτέλεσε η σύνθεση C2 0.83, η οποία παρουσίασε αύξηση της τριχοειδούς απορρόφησης σε ποσοστό 14.46% σε σύγκριση με το αμιγές σκυρόδεμα.



**Εικόνα 24:** Τριχοειδής απορρόφηση S (mm/min<sup>0.5</sup>) ανά σύνθεση.

## Ανοικτό πορώδες

Στον **Πίνακα 22** παρουσιάζονται συγκεντρωτικά όλες οι ζυγίσεις που πραγματοποιήθηκαν για όλα τα δοκίμια στις τρεις διαφορετικές καταστάσεις. Στην τελευταία στήλη του πίνακα έχει υπολογιστεί το ανοικτό πορώδες, σύμφωνα με τη σχέση:

$$OP \% = (\alpha - \beta) / (\alpha - \gamma) \times 100$$

Όπου  $\alpha$  = το βάρος του κορεσμένου δοκιμίου (g)

$\beta$  = το βάρος του δοκιμίου μετά την ξήρασή του

$\gamma$  = το βάρος του κορεσμένου δοκιμίου υπό άνωση

**Πίνακας 22:** Πειραματικές μετρήσεις ανοικτού πορώδους για όλα τα δοκίμια.

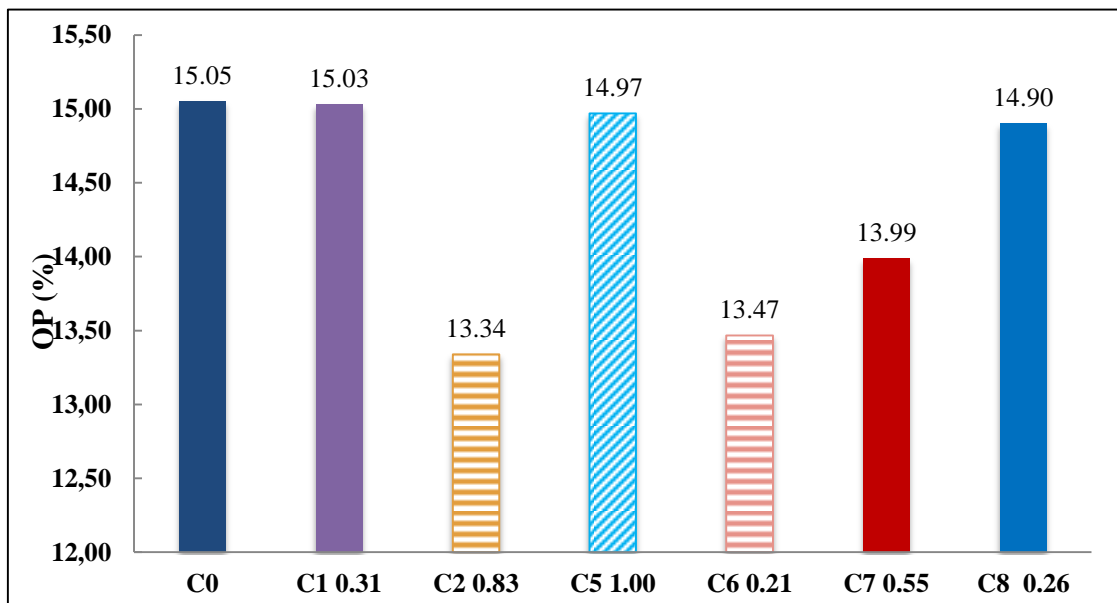
Κωδικός Σύνθεσης	Αριθμός δοκιμίου	Μέτρηση βάρους ξηρών δοκιμίων (g)	Μέτρηση βάρους κορεσμένων δοκιμίων (g)	Μέτρηση βάρους δοκιμίων υπό αιώρηση (g)	Ανοικτό Πορώδες (%)	Μ.Τ. Ανοικτού Πορώδους (%)
<b>C0</b>	A	2268.50	2422.00	1411.70	15.19	15.05
	B	2289.20	2441.50	1419.90	14.91	
<b>C1 0.31</b>	A	2301.60	2452.90	1439.40	14.93	15.03
	B	2281.00	2434.00	1423.30	15.14	
<b>C2 0.83</b>	A	2222.60	2367.70	1376.60	14.64	14.34
	B	2279.10	2419.70	1418.80	14.05	
<b>C4 3.25</b>	A	2240.20	2390.40	1388.60	14.99	14.97
	B	2225.50	2374.90	1374.90	14.94	
<b>C6 0.21</b>	A	2182.40	2317.10	1320.20	13.51	14.47
	B	2148.40	2282.10	1286.10	13.42	
<b>C7 0.55</b>	A	2245.50	2388.20	1390.40	14.30	13.99
	B	2270.70	2407.60	1406.40	13.67	
<b>C8 0.26</b>	A	2266.90	2415.70	1414.50	14.86	14.90
	B	2295.40	2447.00	1432.40	14.94	

Στον **Πίνακα 23** παρουσιάζονται τα αποτελέσματα του προσδιορισμού του ανοικτού πορώδους (OP %) συνολικά για όλες τις συνθέσεις, ως μέση τιμή των μετρήσεων των δυο δοκιμίων για κάθε τύπο σύνθεσης.

**Πίνακας 23:** Αποτελέσματα ανοικτού πορώδους.

Κωδικός Σύνθεσης	Ανοικτό Πορώδες (%)	% Μεταβολή ως προς το αμιγές σκυρόδεμα
C0	1505	-
C1 0.31	15.03	-0.13
C2 0.83	13.34	-11.36
C4 3.25	14.97	-0.53
C6 0.21	13.47	-10.51
C7 0.55	13.99	-7.06
C8 0.26	14.90	-1.00

Όπως φαίνεται και από τον **Πίνακα 23**, παρατηρήθηκε μείωση του ανοικτού πορώδους σε όλες τις συνθέσεις σε σχέση με το αμιγές σκυρόδεμα, γεγονός που ήταν αναμενόμενο με βάση τη βιβλιογραφία. Η μικρότερη μείωση παρατηρήθηκε στη σύνθεση C1 0.31, ενώ η μεγαλύτερη σημειώθηκε στη σύνθεση C2 0.83. Τα αποτελέσματα παρατίθενται γραφικά στην **Εικόνα 25**.



**Εικόνα 25:** Ανοικτό πορώδες OP (%) για κάθε σύνθεση.

### 3. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την παρούσα εργασία προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Τα ποσοστά προσθήκης ρευστοποιητών για να επιτευχθεί εξάπλωση 26 cm κυμάνθηκαν όπως ήταν αναμενόμενο σε χαμηλές τιμές για τους PCE ρευστοποιητές και σε δεκαπλάσιες τιμές για τους LS ρευστοποιητές. Σε λίγο υψηλότερες τιμές κινήθηκαν τα ποσοστά των επιβραδυντών.
- Στη δοκιμή της μεθύτερης προσθήκης, ευνοήθηκε κατά βάση η ρευστότητα των παστών με τους ρευστοποιητές, ενώ αντίθετα για τους επιβραδυντές ήταν απαραίτητη η άμεση εφαρμογή τους .
- Στη χρονικά εξαρτώμενη εξάπλωση παρατηρήθηκε μία ομαλή μείωση της τιμής της, με την πάροδο του χρόνου. Οι πάστες με LS ρευστοποιητές παρουσίασαν μια μεγάλη πτώση εξάπλωσης στα πρώτα 30 min συγκριτικά με τις υπόλοιπες, και στη συνέχεια δεν παρουσίασαν καμία αξιόλογη μεταβολή. Οι πάστες με επιβραδυντές είχαν επίσης απότομη απώλεια κάθισης τα πρώτα 30 min. Εξαίρεση αποτελεί ο επιβραδυντής HR 50, ο οποίος ήταν ο μοναδικός που παρουσίασε σημαντική αύξηση της εξάπλωσης.
- Σχετικά με τον προσδιορισμό του χρόνου πήξης, οι PCE ρευστοποιητές είχαν μικρή επίδραση στο χρόνο πήξης. Οι πάστες με LS ρευστοποιητές και επιβραδυντές είχαν διαφορετική συμπεριφορά. Συγκεκριμένα οι πάστες με LS ρευστοποιητές παρουσίασαν καθυστερημένη πήξη ενώ αυτές με επιβραδυντές παρουσίασαν άμεση πήξη.
- Μικρές σχετικά τιμές διαχωρισμού (<5%) παρατηρήθηκαν στις πάστες με PCE ρευστοποιητές και τον επιβραδυντή HR 50. Το φαινόμενο ήταν εντονότερο στην πάστα με τον επιβραδυντή και ασθενέστερο στις πάστες με τους PCE ρευστοποιητές. Οι πάστες με LS επιβραδυντές έπηξαν αμέσως μετά την τοποθέτησή τους στους ογκομετρικούς σωλήνες, ενώ αυτές με LS ρευστοποιητές παρουσίασαν επιφανειακή πήξη και στο εσωτερικό ήταν πιο ρευστές.
- Σχετικά με τη θλιπτική αντοχή των δοκιμίων κονιαμάτων, παρατηρήθηκε πως η προσθήκη των PCE ρευστοποιητών είχε γενικά θετική ή ουδέτερη επίδραση. Σε κάποιες περιπτώσεις ρευστοποιητών LS, μειώθηκε η αντοχή των δοκιμίων.
- Κατά την εφαρμογή τους στο σκυρόδεμα, όσον αφορά την περιεκτικότητα σε εγκλωβισμένο αέρα του νωπού σκυροδέματος, οι συνθέσεις που παρασκευάστηκαν

παρουσίασαν μεγάλο εύρος τιμών. Οι PCE ρευστοποιητές μείωσαν το ποσοστό εγκλωβισμένου αέρα. Ο ρευστοποιητής D 50 είχε τη χειρότερη επίδραση καθώς αύξησε κατακόρυφα το ποσοστό του εγκλωβισμένου αέρα. Οι LS ρευστοποιητές καθώς και οι επιβραδυντές αύξησαν το ποσοστό του εγκλωβισμένου αέρα.

- Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος επηρεάστηκε από την προσθήκη των ρευστοποιητών. Η προσθήκη των PCE ρευστοποιητών δεν είχε αρνητική επίδραση, ενώ οι LS ρευστοποιητές μείωσαν ελαφρώς τις θλιπτικές αντοχές. Ο επιβραδυντής RTC 15 ήταν ο μοναδικός που είχε θετική επίδραση καθώς αύξησε τις αντοχές κατά 10% περίπου.
- Η προσθήκη των ρευστοποιητών οδήγησε κυρίως σε μείωση του συντελεστή τριχοειδούς απορρόφησης. Η μεγαλύτερη μείωση παρατηρήθηκε στη σύνθεση με τον PCE ρευστοποιητή D 50. Μοναδική εξαίρεση αποτέλεσε η σύνθεση με τον επιβραδυντή RTC 15, η οποία παρουσίασε αύξηση της τριχοειδούς απορρόφησης σε ποσοστό 14.46% σε σύγκριση με το αμιγές σκυρόδεμα.
- Τέλος, παρατηρήθηκε μείωση του ανοικτού πορώδους σε όλες τις συνθέσεις σε σχέση με το αμιγές σκυρόδεμα σε ποσοστά από 0.13 έως 11.36 %. Η μικρότερη μείωση παρατηρήθηκε στη σύνθεση με τον εμπορικό PCE ρευστοποιητή Glenium, ενώ η μεγαλύτερη σημειώθηκε στη σύνθεση με τον LS επιβραδυντή RTC 15.

## Βιβλιογραφία

Anatol Zingg, Frank Winnefeld, Lorenz Holzer, Joachim Pakusch, Stefan Becker, Ludwig Gauckler (2008), Adsorption of polyelectrolytes and its influence on the rheology, zeta potential, and microstructure of various cement and hydrate phases. *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 323, Issue 2, pp. 301-312.

Antonio R. Cestari, Eunice F.S. Vieira, Ellen C.S. Silva, Fernanda J. Alves, Marcos A.S. Andrade Jr. (2013), Synthesis, characterization and hydration analysis of a novel epoxy/superplasticizer oilwell cement slurry – Some mechanistic features by solution microcalorimetry, *Journal of Colloid and Interface Science*, Volume 392, pp. 359-368.

Arzu Büyükyavaş, Gözde Tuzcu, Leyla Aras, Synthesis of copolymers of methoxy polyethylene glycol acrylate and 2-acrylamido-2-methyl-1-propanesulfonic acid: Its characterization and application as superplasticizer in concrete, *Cement and Concrete Research*, Volume 39, Issue 7, pp. 629-635.

Banfill P. F. G. (2003), The rheology of fresh cement and concrete – a review. The 11th International Cement Chemistry Congress, Durban.

Bonen D. and Sarkar S. L. (1995), The superplasticizer adsorption capacity of cement pastes, pore solution composition, and parameters affecting flow loss. *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 7, pp. 1423– 1434.

Burak Felekoğlu, Hasan Sarıkahya (2008), Effect of chemical structure of polycarboxylate-based superplasticizers on workability retention of self-compacting concrete, *Construction and Building Materials*, Volume 22, Issue 9, pp. 1972-1980.

Chan Y. N., Feng N.-Q. and Tsang K. C. (1996), Workability retention of highstrength/superplasticized concrete. *Magazine of Concrete Research*, Vol. 48, No. 177, pp. 301-309.

Chandra S. and Bjornstrom J. (2002), Influence of superplasticizer type and dosage on the slump loss of Portland cement mortars—Part II. *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, No. 10, pp. 1613–1619

Elzbieta Janowska-Renkas (2013), The effect of superplasticizers' chemical structure on their efficiency in cement pastes, *Construction and Building Materials*, Volume 38, pp.1204-1210.

Falikman V. R., Sorokin Y.V., Vainer A. Y. and Bashlykov N. F. (2005), New High Performance Polycarboxilate Superplasticizers based on Derivative Copolymers of Maleinic Acid in Admixture – enhancing concrete performance (Eds. Ravindra et al). *Proceedings of the International Conference*, University of Dundee, UK, pp. 41-46.

Farrington S. A. (2007), Evaluating the effect of mixing method on cement hydration in the presence of a polycarboxylate high-range water reducing admixture by isothermal conduction calorimetry. 12th International Congress on the Chemistry of Cement.



Frank Winnefeld, Stefan Becker, Joachim Pakusch, Thomas Götz (2007), Effects of the molecular architecture of comb-shaped superplasticizers on their performance in cementitious systems, *Cement and Concrete Composites*, Volume 29, Issue 4, pp. 251-262.

Gjorv O. E. (1994), Workability: A New Way of Testing. *Concrete International*, Vol. 20, No. 9, pp. 57-60.

Gołaszewski J. G. and Szwabowski J. (2004), Influence of superplasticizers on rheological behaviour of fresh cement mortars. *Cement and Concrete Research*, Vol. 34, No. 2, pp. 235–248.

Gu D., Xiong D. and Lu Z. (1982), Mode of mechanism of naphthalene series on water reducing agents. *Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 69, pp. 378- 386.

Gu P., Xie P., Beaudoin J. J. and Jolicoeur C. (1994), Investigation of the retarding effect of superplasticizers on cement hydration by impedance spectroscopy and other methods. *Cement and Concrete Research*, Vol. 24, No. 3, pp. 433-442.

Hanehara S. and Yamada K. (1999), Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, absorption behaviour of admixture, and paste rheology. *Cement and Concrete Research*, Vol.29, No. 8, pp. 1159-1165.

Herbert Hommer (1997), Interaction of polycarboxylate ether with silica fume, *Journal of the European Ceramic Society*, Volume 29, Issue 10, pp.1847-1853.

Houst Y. F., Flatt R. J., Bowen P., Hofmann H. (1999), Optimisation of Superplasticisers: From Research to Application. *Modern Concrete materials: binders, additions and Admixtures* (Eds. Dhir R. K. and Dyer T. D., pp. 445-456.

J. Plank, K. Pöllmann, N. Zouaoui, P.R. Andres, C. Schaefer (2008 ), Synthesis and performance of methacrylic ester based polycarboxylate superplasticizers possessing hydroxy terminated poly(ethylene glycol) side chains, *Cement and Concrete Research*, Volume 38, Issue 10, pp.1210-1216.

Kazuhiro Yoshioka, Ei-ichi Tazawa, Kenji Kawai, Tomoyuki Enohata (2002), Adsorption characteristics of superplasticizers on cement component minerals, *Cement and Concrete Research*, Volume 32, Issue 10, pp.1507-1513.

Kazuo Yamada, Shoichi Ogawa, Shunsuke Hanehara (2001), Controlling of the adsorption and dispersing force of polycarboxylate-type superplasticizer by sulfate ion concentration in aqueous phase, *Cement and Concrete Research*, Volume 31, Issue 3, pp. 375-383.

Khalil Kh. A. (1999), Surface area and pore structure of hardened Portland cement/silica fume pastes containing a superplasticizer. *Adsorption Science and Technology*, Vol.17, No. 7, pp. 557-563.

L. Lei, J. Plank (2012), A concept for a polycarboxylate superplasticizer possessing enhanced clay tolerance, *Cement and Concrete Research*, Volume 42, Issue 10, pp. 1299-1306.

Li C., Feng N., Wang D. and Huo Y. (2005), Preparation and characterization of comb-like polycarboxylic water-reducers and its function mechanism. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, Vol. 33, No. 1, pp. 87-92.

L.E. Zapata, G. Portela, O.M. Suárez, O. Carrasquillo (2013), Rheological performance and compressive strength of superplasticized cementitious mixtures with micro/nano-SiO<sub>2</sub> additions, *Construction and Building Materials*, Volume 41, pp. 708-716.

Lombois-Burger H., Guillot L., and Haehnel C. (2006), SP-239-24: Interaction between Cements and Superplasticizers. 8th CANMET/ACI International Conference on Superplasticizers and Other Chemical Admixtures in Concrete, pp. 357-373.

M. Wiśniewska, K. Terpiłowski, S. Chibowski, T. Urban, V.I. Zarko, V.M. Gun'ko (2013), Effect of polyacrylic acid (PAA) adsorption on stability of mixed alumina-silica oxide suspension, *Powder Technology*, Volume 233, pp. 190-200.

M.M. Alonso, M. Palacios, F. Puertas (2013), Compatibility between polycarboxylate-based admixtures and blended-cement pastes, *Cement and Concrete Composites*, Volume 35, Issue 1, pp. 151-162.

Markus Gretz, Johann Plank (2010), Hybrid additives for construction applications, fabricated through layer-by-layer adsorption of polycondensate type superplasticizers on latex templates, *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Volume 366, Issues 1–3, pp. 38-44.

P. Marco, J. Llorens (2009), Surface charge and rheological properties of raw porcelain gres suspension with acrylic copolymers bearing carboxylic groups, *Journal of the European Ceramic Society*, Volume 29, Issue 4, pp. 559-564.

Myrvold B. O. (2007), Interactions between lignosulfonates and clinker minerals and the hydration products of clinker minerals. 12th International Congress on the Chemistry of Cement.

Newman J. and Choo B. S. (2003), *Advanced Concrete Technology 1: Constituent Materials*. Butterworth-Heinemann, Elsevier, Ltd.

Ouyang X., Qiu X. and Chen P. (2006), Physicochemical characterization of calcium lignosulfonate—A potentially useful water reducer. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Vol. 282–283, pp. 489–497.

Qianping Ran, Ponisseril Somasundaran, Changwen Miao, Jiaping Liu, Shishan Wu, Jian Shen (2009), Effect of the length of the side chains of comb-like copolymer dispersants on dispersion and rheological properties of concentrated cement suspensions, *Journal of Colloid and Interface Science*, Volume 336, Issue 2, 15 pp. 624-633.

Pang Y., Lou H., Qiu X. and Yang D. (2005), Influences of modified lignosulfonate superplasticizer on cement hydration and the durability of concrete. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, Vol. 37, No. 1, pp. 74-77.

Puertas F., Santos H., Palacios M. and Martinez-Ramirez S. (2005), Polycarboxylate superplasticiser admixtures: effect on hydration, microstructure and rheological behaviour in cement pastes. *Advances in Cement Research*, Vol. 17, No. 2, pp. 77-89.

Ramachandran V. S. (1995), *Concrete admixtures handbook: properties, science, and technology*. Park Ridge, N.J., U.S.A. : Noyes Publications, 2nd ed., 1153 p.

S. Ng, J. Plank (2012), Interaction mechanisms between Na montmorillonite clay and MPEG-based polycarboxylate superplasticizers, *Cement and Concrete Research*, Volume 42, Issue 6, pp. 847-85.

Shunsuke Hanehara, Kazuo Yamada (1999), Interaction between cement and chemical admixture from the point of cement hydration, absorption behaviour of admixture, and paste rheology, *Cement and Concrete Research*, Volume 29, Issue 8, pp. 1159-1165.

Sika Hellas A.B.E.E, 2014, Sika® ViscoCrete®-300. EN 934-2. 04. 2079, Νέας γενιάς υπερρευστοποιητής σκυροδέματος. Φύλλο Ιδιοτήτων Προϊόντος.

Sugamata T., Edamatsu Y., Ouchi M. (2003), A study of particle dispersing retention effect of polycarboxylate-based superplasticizers. *Proceedings of the 3rd International RILEM Symposium* (Eds. O. Wallevik and I. Nielsson), pp. 420-431.

Sun Dao Jun, (2008). Effect of a newly developed lignosulfonate superplasticizer on properties of cement pastes and mortars. Department of civil engineering. National University of Singapore.

Sylvie Pourchet, Solenne Liautaud, David Rinaldi, Isabelle Pochard (2012), Effect of the repartition of the PEG side chains on the adsorption and dispersion behaviors of PCP in presence of sulfate, *Cement and Concrete Research*, Volume 42, Issue 2, pp. 431-439.

Taylor H. F. W. (1997), *Cement chemistry*. London: T. Telford, 2nd ed., 459 p.

Uchikawa H., Sawaki D. and Hanehara S. (1995), Influence of kind and added timing of organic admixture on the composition, structure and property of fresh cement paste. *Cement and Concrete Research*, Vol. 25, No. 2, pp. 353-364.

Xu G. and Beaudoin J. J. (2000), Effect of Polycarboxylate Superplasticizer on Contribution of Interfacial Transition Zone to Electrical Conductivity of Portland Cement Mortars. *ACI Materials Journal*, Vol. 97, No. 4, pp. 418-424.

EN 12390-3:2009, Testing hardened concrete-Part 3: Compressive strength of test specimens

Βούκια Δήμητρα, 2013. Διαπερατότητα αυτοσυμπυκνούμενου σκυροδέματος με μετακαολίνη. Μεταπτυχιακή εργασία διατμηματικού προγράμματος μεταπτυχιακών σπουδών Δομοστατικός Σχεδιασμός και Ανάλυση των Κατασκευών Ε.Μ.Π. Επιβλέπων: Μπαδογιάννης Γ. Ευστράτιος, Λέκτορας Ε.Μ.Π.

Δημητρακοπούλου Ελίνα, Μπασδέκη Μαρία, Υπέρρευστο Σκυρόδεμα: ιδιότητες και εφαρμογή αυτού ως μέσο ενίσχυσης, 13ο Φοιτητικό Συνέδριο : Επισκευές Κατασκευών, Πάτρα 2007.