



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΙΩΝ – ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΑΣ

**ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΜΕΤΑΚΑΟΛΙΝΗ ΣΤΙΣ ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΚΑΙ
ΡΕΟΛΟΓΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΣΙΜΕΝΤΟΚΟΝΙΑΜΑΤΩΝ**



ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Σταθής Ζαφείριος-Ηλίας

Επιβλέπουσα καθηγήτρια : Μαρία Ταξιάρχου

ΑΘΗΝΑ , ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2021

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία, με θέμα «Επίδραση της χρήσης μετακαολίνη στις μηχανικές και ρεολογικές ιδιότητες κονιαμάτων», εκπονήθηκε στο πιλοτικό εργαστήριο Μεταλλουργίας της Σχολής Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών.

Αντικείμενο αυτής της εργασίας, είναι η επίδραση της χρήσης μετακαολίνη χαμηλής καθαρότητας, τόσο ψημένου, όσο και ψημένου και αλεσμένου σε τσιμεντοκονιάματα και ο έλεγχος των μηχανικών και ρεολογικών ιδιοτήτων των συγκεκριμένων κονιαμάτων.

Στο σημείο αυτό, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλους εκείνους που με τη βοήθεια τους, συνέβαλαν στην ολοκλήρωση αυτής της διπλωματικής.

Καταρχάς, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την Καθηγήτρια Ταξίαρχου Μαρία, επιβλέπουσα της διπλωματικής εργασίας, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με το συγκεκριμένο θέμα, καθώς και για το ενδιαφέρον και τη βοήθειά της σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Ακόμα θέλω να ευχαριστήσω, τόσο την κ. Ιωάννα Αγγέλου, όσο και τις κ. Δήμητρα Κοσμίδη και Χρύσα Παναγιωτοπούλου για τις πολύτιμες γνώσεις που μου μετέφεραν σε όλα τα θέματα που αφορούν την εργασία αυτή καθώς επίσης για την καθοδήγηση τους στη συγγραφή της εργασίας.

Επίσης, ευχαριστώ τον κ. Γεώργιο Παπαντωνόπουλο, Δρ. ΕΔΙΠ, της Σχολής ΜΜΜ για τη βοήθεια του στην μέτρηση θλιπτικής αντοχής των δειγμάτων παστών και τσιμεντοκονιαμάτων στο Εργαστήριο Τεχνολογίας Διάνοιξης Σηράγγων.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τη συμφοιτήτριά μου Σοφία Κομνηνού για τη βοήθεια και την συμπαράσταση καθόλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σκοπό της παρούσας διπλωματικής αποτέλεσε η διερεύνηση της επίδρασης χρήσης μετακαολίνη χαμηλής καθαρότητας στις ιδιότητες παστών και κονιαμάτων τσιμέντου.

Για την εκπλήρωση αυτού του σκοπού παρασκευάζονται συνθέσεις παστών και κονιαμάτων τσιμέντου με την προσθήκη μετακαολίνη, τόσο ψημένου όσο και ψημένου και αλεσμένου.

Στη συνέχεια, ακολουθεί η δοκιμή άπλωσης των συνθέσεων, η μέτρηση της θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων της εκάστοτε σύνθεσης και γίνεται λεπτομερής ανάλυση και συγκριτική αξιολόγηση των αποτελεσμάτων,

Ακολουθεί η δοκιμή Chapelle μεταξύ των δύο ειδών μετακαολίνη που χρησιμοποιήθηκαν στα πειράματα κατά τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής.

Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων, προκύπτει πως η χρήση μετακαολίνη σε πάστες και κονιάματα τσιμέντου βελτιώνει σημαντικά τη θλιπτική αντοχή τους, μειώνοντας παράλληλα την εργασιμότητα τους.

ABSTRACT

The scope of the present Diploma Thesis is to study the effect of the addition of low purity metakaolin on the properties of cement pastes and mortars.

To fulfill this scope, different compositions of cement pastes and mortars were created with the addition of two different types of metakaolin in various percentages. The first type of metakaolin was created through calcination of kaolin, while the other one was created after grinding the previously calcined kaolin.

Subsequently, the flow and the compressive strength of the compositions was tested. After the tests, a detailed analysis and comparative evaluation of the results took place.

Finally, the two types of metakaolin, which are used during the present Diploma Thesis, were submitted to the Chapelle test.

From the comparative evaluation of the tests results , it is deduced that the use of metakaolin in cement pastes and mortars improves drastically their compressive strength, while at the same time reduces their workability.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	12
1.1 Το τσιμέντο ως υλικό.....	12
1.2 Συνοπτική περιγραφή των ιδιοτήτων του τσιμέντου	12
1.3 Ιστορική αναδρομή και εξέλιξη.....	13
2. ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟ.....	17
2.1 Χημική και ορυκτολογική σύσταση	17
2.2 Παραγωγική διαδικασία τσιμέντου.....	18
2.3 Τύποι και πρόσθετα τσιμέντου	23
2.3.1 Τύποι τσιμέντου	23
2.3.2 Τσιμέντα ειδικού τύπου.....	25
2.3.3 Πρόσθετα τσιμέντου.....	28
2.3.4 Ο μετακαολίνης ως πρόσθετο στα τσιμεντοκονιάματα	32
2.4 Εφαρμογές και χρήσεις.....	35
3. Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ ΣΤΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΚΟΝΙΑΜΑΤΑ	41
3.1 Αδρανή υλικά	41
3.1.1 Κατάταξη αδρανών υλικών.....	42
3.1.2 Οι ιδιότητες των αδρανών υλικών	44
3.2 Κονιάματα	45
3.2.1 Η χρησιμότητα των τσιμεντοκονιαμάτων.....	46
3.2.2 Ο ρόλος του νερού στα κονιάματα	48
3.3 Χρήση πρόσμικτων κατά την παρασκευή τσιμεντοκονιμάτων	50
4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	53
4.1 Πρώτες ύλες.....	53
4.2 Πειραματικός σχεδιασμός και παραγωγική διαδικασία συνθέσεων	54
4.3 Χαρακτηρισμοί υλικών	57
4.3.1 Περιθλασιμετρία Ακτίνων X (XRD)	57

4.3.2 Κοκκομετρική ανάλυση	58
4.3.3 Δοκιμή Chapelle.....	59
4.3.4 Δοκιμή άπλωσης τσιμεντοκονίας	61
4.3.5 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης.....	62
4.3.6 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM)	64
5. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ	66
5.1 Ορυκτολογική ανάλυση.....	66
5.2 Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης.....	67
5.3 Αποτελέσματα δοκιμής Chapelle.....	70
5.4 Αποτελέσματα δοκιμής άπλωσης	71
5.5 Αποτελέσματα δοκιμής μονοαξονικής θλίψης.....	77
5.6 Αποτελέσματα μικροσκοπίας SEM	88
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	93
7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	95

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1.1 Γκρι τσιμεντόσκονη.....	12
Εικόνα 1.2 Πυραμίδες Αιγύπτου.....	14
Εικόνα 1.3 Φάρος του Plymouth.....	15
Εικόνα 1.4 Πέτρινος κλίβανος του Aspdin.....	15
Εικόνα 1.5 Πρώτη γέφυρα από σκυρόδεμα στην Γαλλία.....	16
Εικόνα 2.1 Κύρια συστατικά παραγωγής τσιμέντου.....	18
Εικόνα 2.2 Ψύκτες πλανητικού τύπου.....	20
Εικόνα 2.3 Το κλίνκερ αφότου υποστεί ψύξη.....	20
Εικόνα 2.4 Απεικόνιση σφαιρόμυλου.....	21
Εικόνα 2.5 Σιλό αποθήκευσης τσιμέντου.....	21
Εικόνα 2.6 Η διαδικασία παραγωγής του τσιμέντου.....	22
Εικόνα 2.7 Παράδειγμα χρήσης λευκού τσιμέντου.....	26
Εικόνα 2.8 Σκόνη ιπτάμενης τέφρας.....	29
Εικόνα 2.9 Σκόνη πυριτικής παιπάλης.....	30
Εικόνα 2.10 Σκόνη σκωρίας υψικαμίνου.....	32
Εικόνα 2.11 Εξόρυξη καολίνη στην Κίνα (ελαιογραφία).....	33
Εικόνα 2.12 Καολίνης.....	33
Εικόνα 2.13 Σχηματική παράσταση της αφυδροξυλίωσης του καολινίτη.....	34
Εικόνα 2.14 Τοξωτή γέφυρα - Χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης σκυροδέματος υψηλής αντοχής.....	36
Εικόνα 2.15 Καλωδιωτή γέφυρα - Χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης σκυροδέματος υψηλής επιτελεστικότητας, λόγω εγγύτητας στην θάλασσα.....	36
Εικόνα 2.16 Διάσταση κόκκων υλικών σε μm.....	39

Εικόνα 3.1 Αδρανή διάφορων μεγεθών.....	41
Εικόνα 3.2 Σκόνη ασβεστολιθικής άμμου.....	42
Εικόνα 3.3 Σχήμα κόκκων διάφορων αδρανών.....	44
Εικόνα 3.4 Κονίαμα τσιμέντου.....	46
Εικόνα 4.1 Καλούπι δοκιμίων.....	54
Εικόνα 4.2 Συντήρηση δοκιμίων σε περιβάλλον υγρασίας.....	56
Εικόνα 4.3 Συντήρηση δοκιμίων μέσα στο νερό για 7 μέρες.....	56
Εικόνα 4.4 Περιθλασίμετρο ακτίνων Χ (XRD).....	57
Εικόνα 4.5 Όργανο ανάλυσης κοκκομετρίας Malvern Mastersizer	59
Εικόνα 4.6 Σφαιρική φιάλη, εντός θερμαινόμενης φωλιάς.....	59
Εικόνα 4.7 Διαδικασία τιτλοδότησης ωσότου το διάλυμα γίνεται άχρωμο.....	60
Εικόνα 4.8 Διαδικασία άπλωσης τσιμεντοκονίας.....	62
Εικόνα 4.9 Διάταξη δοκιμής σε μονοαξονική θλίψη για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής f_c	63
Εικόνα 4.10 Δοκίμιο αφότου αστοχήσει.....	63
Εικόνα 4.11 Οι διάφοροι τρόποι αλληλεπίδρασης δείγματος και δέσμης επιταχυμένων ηλεκτρονίων.....	64
Εικόνα 4.12 Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας του ΗΜΣ.....	65
Εικόνα 5.1 SEM πάστας τσιμέντου με 2.5% καολίνη Ε που έχει υποστεί έψηση στους 800°C για 8 ώρες σε μεγέθυνση α) x100 και β) x450.....	88
Εικόνα 5.2 SEM για πάστα τσιμέντου με 15% καολίνη Ε που έχει υποστεί έψηση στους 800°C για 8 ώρες σε μεγέθυνση α) x100 και β) x450.....	88
Εικόνα 5.3 SEM για κονίαμα τσιμέντου 3/1 με 2.5% καολίνη Ε που έχει υποστεί έψηση στους 800°C για 8 ώρες σε μεγέθυνση α) x100 και β) x450.....	89

Εικόνα 5.4 SEM για κονίαμα τσιμέντου 3/1 με 15% καολίνη Ε που έχει υποστεί έψηση στους 800°C για 8 ώρες σε μεγέθυνση α) x100 και β)x450.....	89
Εικόνα 5.5 SEM για πάστα τσιμέντου με 2.5% καολίνη Ε που έχει υποστεί έψηση στους 800°C για 8 ώρες και λειοτρίβηση σε 200grm για 7 ώρες σε μεγέθυνση α) x100 και β)x450.....	89
Εικόνα 5.6 SEM για πάστα τσιμέντου με 15% καολίνη Ε που έχει υποστεί έψηση στους 800°C για 8 ώρες και λειοτρίβηση σε 200grm για 7 ώρες σε μεγέθυνση α) x100 και β)x450.....	90
Εικόνα 5.7 SEM για κονίαμα τσιμέντου 3/1 με 2.5% καολίνη Ε που έχει υποστεί έψηση στους 800°C για 8 ώρες και λειοτρίβηση σε 200grm για 7 ώρες σε μεγέθυνση α) x100 και β)x450...	90
Εικόνα 5.8 SEM για κονίαμα τσιμέντου 3/1 με 2.5% καολίνη Ε που έχει υποστεί έψηση στους 800°C για 8 ώρες και λειοτρίβηση σε 200grm για 7 ώρες σε μεγέθυνση α) x100 και β)x450...	90

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ - ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ

Πίνακας 2.1 Βασικοί τύποι τσιμέντου.....	23
Πίνακας 2.2 Τα 27 προϊόντα στην οικογένεια των κοινών τσιμέντων, σύμφωνα με το πρότυπο EN 197-1.....	27
Πίνακας 3.1 Χρήση τσιμεντοκονιαμάτων ανάλογα με την αντοχή τους.....	48
Πίνακας 3.2 Χρήση τσιμεντοκονιαμάτων με βάση την αναλογία Κ/Α.....	48
Πίνακας 4.1 Ποσότητες υλικών ανά σύνθεση.....	55
Πίνακας 5.1 Επί μέρους ορυκτά του καολίνη.....	66
Πίνακας 5.2 Καολίνης Ε - Μέτρηση laser.....	68
Πίνακας 5.3 Καολίνης Ε – Έψηση στους 800°C για 8 ώρες - Μέτρηση laser.....	69
Πίνακας 5.4 Έψηση στους 800°C για 8 ώρες και λειοτρίβηση για 7 ώρες με ταχύτητα 200rpm – Μέτρηση DLS.....	69
Πίνακας 5.5 Αποτελέσματα δοκιμής Chapelle.....	70
Πίνακας 5.6 Αποτελέσματα δοκιμών άπλωσης συνθέσεων με ψημένο καολίνη.....	71
Πίνακας 5.7 Αποτελέσματα δοκιμών άπλωσης συνθέσεων με ψημένο και αλεσμένο καολίνη.....	74
Πίνακας 5.8 Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης συνθέσεων με ψημένο καολίνη.....	77
Πίνακας 5.9 Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης συνθέσεων με ψημένο και αλεσμένο καολίνη.....	81
Διάγραμμα 5.1 Διάγραμμα XRD καολίνη Ε.....	66
Διάγραμμα 5.2 Διάγραμμα XRD καολίνη Ε, έπειτα από έψηση για 8 ώρες στους 800° C.....	67
Διάγραμμα 5.3 Κοκκομετρική κατανομή του καολίνη Ε.....	68
Διάγραμμα 5.4 Κοκκομετρική κατανομή του καολίνη Ε μετά από έψηση στους 800° C για 8 ώρες.....	68

Διάγραμμα 5.5 Κοκκομετρική κατανομή του καολίνη E, ο οποίος έχει υποστεί θερμική κατεργασία στους 800ο C για 8 ώρες και λειοτρίβηση για 7 ώρες με ταχύτητα 200rpm.....	69
Διάγραμμα 5.6 Κατανάλωση mg Ca(OH) ₂ δειγμάτων μετακαολίνη.....	70
Διάγραμμα 5.7 Αποτελέσματα δοκιμής άπλωσης παστών με ψημένο καολίνη.....	72
Διάγραμμα 5.8 Αποτελέσματα δοκιμής άπλωσης τσιμεντοκονιαμάτων 0.45MOR(2/1) με ψημένο καολίνη.....	72
Διάγραμμα 5.9 Αποτελέσματα δοκιμής άπλωσης τσιμεντοκονιαμάτων 0.45MOR(3/1) με ψημένο καολίνη.....	73
Διάγραμμα 5.10 Σύγκριση αποτελεσμάτων δοκιμών, με ψημένο καολίνη.....	73
Διάγραμμα 5.11 Αποτελέσματα δοκιμής άπλωσης παστών με ψημένο και αλεσμένο καολίνη.....	75
Διάγραμμα 5.12 Αποτελέσματα δοκιμής άπλωσης τσιμεντοκονιαμάτων 0.45MOR(2/1) με ψημένο και αλεσμένο καολίνη.....	75
Διάγραμμα 5.13 Αποτελέσματα δοκιμής άπλωσης τσιμεντοκονιαμάτων 0.45MOR(3/1) με ψημένο και αλεσμένο καολίνη.....	75
Διάγραμμα 5.14 Σύγκριση αποτελεσμάτων δοκιμών άπλωσης, με ψημένο και αλεσμένο καολίνη.....	76
Διάγραμμα 5.15 Αντοχή συνθέσεων παστών τσιμέντου (CEM), με ψημένο καολίνη.....	79
Διάγραμμα 5.16 Αντοχή συνθέσεων κονιάματος τσιμέντου 2/1 (MOR), με ψημένο καολίνη.....	80
Διάγραμμα 5.17 Αντοχή συνθέσεων κονιάματος τσιμέντου 3/1 (MOR), με ψημένο καολίνη.....	80
Διάγραμμα 5.18 Σύγκριση αντοχών συνθέσεων κονιαμάτων 2/1-3/1 (MOR), με ψημένο καολίνη.....	81
Διάγραμμα 5.19 Αντοχή συνθέσεων παστών τσιμέντου (CEM), με ψημένο και αλεσμένο καολίνη.....	84
Διάγραμμα 5.20 Αντοχή συνθέσεων κονιάματος τσιμέντου 2/1 (MOR), με ψημένο και αλεσμένο καολίνη.....	84

Διάγραμμα 5.21 Αντοχή συνθέσεων κονιάματος τσιμέντου 3/1 (MOR), με ψημένο και αλεσμένο καολίνη.....85

Διάγραμμα 5.22 Σύγκριση αντοχών συνθέσεων κονιαμάτων 2/1-3/1 (MOR), με ψημένο και αλεσμένο καολίνη.....85

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Το τσιμέντο ως υλικό

Το τσιμέντο είναι βιομηχανικό υλικό που παράγεται από την συνάλεση κλίνκερ, γύψου και τυχόν άλλων πρόσθετων ουσιών, όπως είναι παραδείγματος χάρη η σκωρία υψικαμίνου, η ιπτάμενη τέφρα και η πυριτική παιπάλη.

Ως κλίνκερ ορίζεται το προϊόν που προκύπτει έπειτα από έψηση μείγματος αλεσμένου ασβεστολίθου και αργίλου. Η συγκεκριμένη κατεργασία λαμβάνει χώρα σε ειδικούς κλιβάνους στους οποίους αναπτύσσονται θερμοκρασίες της τάξεως των 1450°C, οι οποίες συντελούν στον ορυκτολογικό μετασχηματισμό των πρώτων υλών.



Εικόνα 1.1 Γκρι τσιμεντόσκονη

Το τσιμέντο αποτελεί υδραυλική κονία, λόγω της ιδιότητάς του να αντιδρά με το νερό και να δημιουργεί ισχυρές κρυσταλλικές ενώσεις οξειδίων του πυριτίου, του ασβεστίου και του αργιλίου, οι οποίες είναι ανθεκτικές στο νερό και του προσδίδουν τις συνδετικές του ιδιότητες.

Η ανάμιξη του τσιμέντου με νερό και άμμο δημιουργεί την τσιμεντοκονία (cement mortar), ενώ από την ανάμειξή του με νερό, λεπτόκοκκα και χονδρόκοκκα αδρανή παράγεται το σκυρόδεμα, το οποίο είναι ένα ευρέως διαδεδομένο υλικό ιδιαίτερα στον τομέα των κατασκευών και της δόμησης. Το γεγονός αυτό καταδεικνύει και τη μεγάλη σημασία του τσιμέντου ως υλικού.

1.2 Συνοπτική περιγραφή των ιδιοτήτων του τσιμέντου

Οι σημαντικότερες ιδιότητες του τσιμέντου, οι οποίες δικαιολογούν και την ευρεία χρήση του, είναι οι ακόλουθες :

- Η μετατροπή του σε ένα ισχυρό υλικό έπειτα από την ανάμειξή του με νερό. Η αλληλεπίδραση των συστατικών του τσιμέντου, κυρίως του κλίνκερ, με το νερό οδηγεί

στο σχηματισμό παράγωγων δυσδιάλυτων στο νερό, τα οποία με την πάροδο του χρόνου δημιουργούν μια σκληρή και ανθεκτική δομή.

- Η ικανότητά του να αποτελεί το συνδετικό υλικό μεταξύ των επιμέρους υλικών που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή τσιμεντοκονιαμάτων και σκυροδεμάτων. Το τσιμέντο έχει το αξιοσημείωτο χαρακτηριστικό, έπειτα από την ανάμειξή του με το νερό και τα αδρανή υλικά, να μετατρέπεται σε ένα υλικό με συγκολλητικές ιδιότητες συγκρατώντας τα αδρανή υλικά και σχηματίζοντας ένα στερεό σώμα, κατάλληλο για χρήση σε δομικές εφαρμογές και κατασκευές.
- Η ιδιότητα των συστατικών του τσιμέντου να ενυδατώνονται, όταν έρθουν σε επαφή με νερό, και να δημιουργούν ένα ισχυρό κρυσταλλικό πλέγμα. Μέσω της παραπάνω διαδικασίας, προσδίδεται στο τσιμέντο το γνώρισμα της συνεκτικότητας και της αντοχής. Σημαντικό χαρακτηριστικό του τσιμέντου που συμβάλλει σε αυτό είναι και η λεπτότητά του, η οποία δύναται να εκφραστεί από τη κοκκομετρική του ανάλυση, καθώς και από τον αριθμό Blaine (ειδική επιφάνεια) σε μονάδες m^2 / kg ή cm^2 / g τσιμέντου. Όσο πιο μεγάλη είναι η λεπτότητα του τσιμέντου, τόσο υψηλότερη είναι η θερμότητα ενυδάτωσης και, κατ' επέκταση, η αντοχή σε μικρό χρονικό διάστημα.

1.3 Ιστορική αναδρομή και εξέλιξη

Η σημασία του τσιμέντου και ο καθοριστικός ρόλος του στην εξέλιξη της ανθρωπότητας και των επιτευγμάτων της, διαφαίνεται ήδη από την αρχαιότητα. Η ιστορική του εξέλιξη είναι συνυφασμένη και αλληλεξαρτώμενη με την ιστορική εξέλιξη του σκυροδέματος, καθότι αποτελεί συστατικό του στοιχείο. Κατά συνέπεια, όπως και το σκυρόδεμα, έτσι και το τσιμέντο έχει πολλές και ποικίλες εφαρμογές ολοένα αυξανόμενες με την πάροδο του χρόνου.

Το παλαιότερο γνωστό εύρημα, στο οποίο έχει χρησιμοποιηθεί το σκυρόδεμα ως υλικό, άρα και κατ' επέκταση το τσιμέντο, είναι ένα δάπεδο που βρίσκεται στη νότια Γαλιλαία και χρονολογείται περί το 7000 π.Χ.

Άλλες αξιοσημείωτες κατασκευές που φανερώνουν την ευρεία χρήση του τσιμέντου ήδη από την αρχαιότητα και καταδεικνύουν την αξία του, είναι η εφαρμογή του από τους Αιγύπτιους, το 3000 π.Χ. για την κατασκευή πλίνθων και το 2500 π.Χ. για την κατασκευή των πυραμίδων. [37]



Εικόνα 1.2 Πυραμίδες Αιγύπτου

Κατά την ίδια εποχή, στην Κίνα χρησιμοποιήθηκαν τσιμεντοειδή υλικά για την κατασκευή του Σινικού Τείχους.

Οι αρχαίοι Έλληνες, μεταγενέστερα, ήταν ίσως οι πρώτοι που χρησιμοποίησαν τσιμεντοκονίες, οι οποίες, όταν ανακατευτούν με το νερό, μπορούν να πήξουν και να σκληρυνθούν, τόσο στον αέρα, όσο και μέσα στο νερό.

Οι Ρωμαίοι ήταν εκείνοι όπου στη συνέχεια πήραν τις γνώσεις αυτές από τους Έλληνες, πιθανότατα των Ελληνικών αποικιών της Ιταλίας και ήδη από το 300 π.Χ. τις ανέπτυξαν σε μεγάλο βαθμό, τόσο ως προς τα ασβεστοκονιάματα, όσο και ως προς τη χρήση μείγματος ασβέστη και ηφαιστειακής γης. Χρησιμοποίησαν επίσης ποζολανικό τσιμέντο από την περιοχή Πουοτζόλι για τη δημιουργία και κατασκευή εμβληματικών έργων, όπως είναι η Αππία Οδός, τα Ρωμαϊκά Λουτρά του Καρακάλλα, η Βασιλική του Μαξεντίου, το Κολοσσαίο και το Πάνθεον στην Ρώμη, καθώς και το υδραγωγείο Πον ντυ Γκαρ στην Νότια Γαλλία.

Το 64 μ.Χ. και κατά την περίοδο ανοικοδόμησης της Ρώμης, χτίζεται ο Χρυσός Οίκος του Νέρωνα, με τοίχους, θόλους και κόγχες από σκυρόδεμα, ενώ το 540 μ.Χ. χρησιμοποιείται σκυρόδεμα για την κατασκευή κογχών και τόξων στον ναό της Αγίας Σοφίας της Κωνσταντινούπολης.

Κατά τον μεσαίωνα δεν παρουσιάζεται καμία εξέλιξη και εγκαταλείπεται η χρήση του σκυροδέματος ως υλικού εξαιτίας της έλλειψης τεχνογνωσίας για τη χρήση μείγματος ασβέστου με ποζολάνη.

Κατά την νεότερη εποχή, η πρώτη διαπιστωμένη χρήση σκυροδέματος είναι η εφαρμογή ποζολανικού κονιάματος στα βάθρα της Παναγίας των Παρισίων από τον Φρα Τζιοκόντο, ενώ



Εικόνα 1.3 Φάρος του Plymouth

το πρώτο ουσιαστικό βήμα για τη δημιουργία του τσιμέντου υπό τη μορφή που χρησιμοποιείται σήμερα, θα μπορούσε να αποδοθεί στον Άγγλο μηχανικό John Smeaton. [31]

Στα μέσα του 1.700 μ.Χ., ανατέθηκε στον συγκεκριμένο μηχανικό η κατασκευή ενός φάρου κοντά στο Plymouth, ο οποίος όντας ξύλινος, είχε καταστραφεί προηγουμένως

δύο φορές από φυσικά φαινόμενα. Συνεπώς, ο φάρος θα έπρεπε να κατασκευαστεί από πέτρα, αλλά η γεινίαση με τη θάλασσα και η βραδύτητα πήξεως και σκλήρυνσης των ασβεστοκονιαμάτων δεν επέτρεπαν το ασφαλές χτίσιμο. Ο Smeaton άρχισε να ερευνά τα διάφορα υλικά και διαπίστωσε ότι τα ασβεστοκονιάματα με ασβέστη που είχαν παρασκευαστεί από το ψήσιμο ασβεστόλιθου που περιείχε άργιλο μπορούσαν να πήξουν τόσο στον αέρα, όσο και μέσα στο νερό. Αυτή η παρατήρηση θεωρείται ότι αποτελεί το πρώτο σημαντικό βήμα για την παραγωγή του τσιμέντου με τη μορφή που παράγεται σήμερα.

Η συστηματικότερη, όμως, παρασκευή τσιμέντου αποδίδεται στον Άγγλο μηχανικό Joseph Aspdin, ο οποίος έδωσε στο υλικό το όνομα που και σήμερα χρησιμοποιείται, "τσιμέντο Portland". Το όνομα αυτό δόθηκε λόγω του χρώματος του σκληρυμένου τσιμέντου, το οποίο ήταν παρόμοιο με το χρώμα των πετρωμάτων στο Portland. Σήμερα σώζεται ένας από τους πέτρινους κλιβάνους που χρησιμοποίησε ο γιος του Aspdin, William για την παραγωγή του τσιμέντου. [38]



Εικόνα 1.4 Πέτρινος κλιβανός του Aspdin

Έκτοτε, η παραγωγή του τσιμέντου εξαπλώθηκε παγκοσμίως και πέρασε από πολλά στάδια, προτού φτάσει στο σημερινό επίπεδο εξέλιξης.

Παράλληλα, αναπτύχθηκε η παραγωγή του σκυροδέματος και δεν άργησε η κατασκευή της πρώτης γέφυρας από άοπλο σκυρόδεμα στην Γαλλία (1816). [18,37]



Εικόνα 1.5 Πρώτη γέφυρα από σκυρόδεμα στην Γαλλία

Σήμερα, η παραγωγή τσιμέντου παγκοσμίως παρουσιάζει αλματώδη αύξηση, ξεπερνώντας, το 2019, τους 4 δισεκατομμύρια τόνους τσιμέντου, ενώ το σκυρόδεμα που χρησιμοποιείται ετησίως υπερβαίνει τους 70 δισεκατομμύρια τόνους. Το γεγονός αυτό καθιστά το τσιμέντο και το σκυρόδεμα τα σπουδαιότερα και πλέον διαδεδομένα δομικά υλικά της εποχής μας. Λόγω της ευρύτατης χρήσης τους, η κατανάλωση μίας χώρας σε τσιμέντο (τόνοι/κάτοικο) αποτελεί δείκτη ανάπτυξης της χώρας αυτής.

2. ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΕΣ ΓΙΑ ΤΟ ΤΣΙΜΕΝΤΟ

2.1 Χημική και ορυκτολογική σύσταση

Τα βασικά συστατικά του τσιμέντου από στοιχειακή άποψη είναι το ασβέστιο (Ca), το πυρίτιο (Si), το αργίλιο (Al) και ο σίδηρος (Fe). Τα στοιχεία αυτά λαμβάνονται από μη μεταλλικές ορυκτές ύλες, όπως ο ασβεστόλιθος, οι ασβεστολιθικές μάργες, οι σχιστόλιθοι, οι άργιλοι και άλλες. [31]

Για το τσιμέντο Portland που είναι το πιο σύνηθες και το συχνότερα χρησιμοποιούμενο τσιμέντο, οι 4 κύριες ορυκτολογικές ενώσεις είναι:

α) το πυριτικό τριασβέστιο ($3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$),	συμβολιζόμενο ως	C3S
β) το πυριτικό διασβέστιο ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$),	συμβολιζόμενο ως	C2S
γ) το αργιλικό τριασβέστιο ($3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$),	συμβολιζόμενο ως	C3A
δ) το αργιλοσιδηρικό τετρασβέστιο ($4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$),	συμβολιζόμενο ως	C4AF

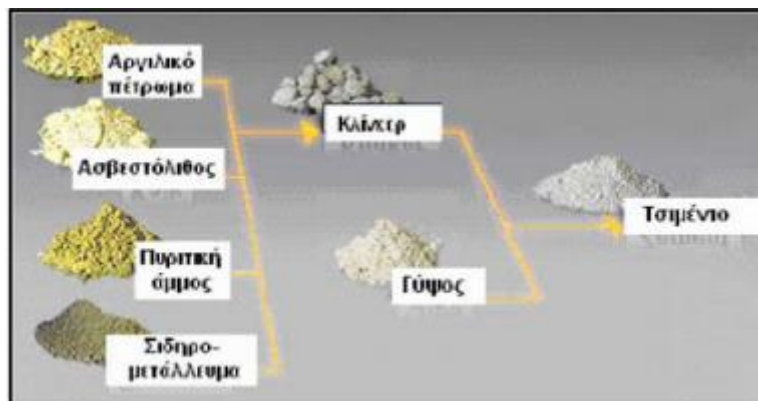
Τα κύρια συστατικά του τσιμέντου είναι :

- ✓ Κλίνκερ για τσιμέντο Πόρτλαντ
- ✓ Κοκκοποιημένη σκωρία υψικαμίνου
- ✓ Ποζολανικά υλικά
 - Φυσική ποζολάνη
 - Φυσική ψημένη ποζολάνη
- ✓ Ιπτάμενες τέφρες
 - Πυριτική ιπτάμενη τέφρα
 - Ασβεστούχος ιπτάμενη τέφρα
- ✓ Ψημένος σχιστόλιθος
- ✓ Ασβεστόλιθος
- ✓ Πυριτική παιπάλη

Για λόγους αριστοποίησης της ποιότητας ή οικονομικότητας της παραγωγικής διαδικασίας χρησιμοποιούνται και άλλες ύλες, όπως βωξίτης, πυριτική άμμος, καολίνης και αποφρύγματα σιδηροπυρίτη.

2.2 Παραγωγική διαδικασία τσιμέντου

Το τσιμέντο αποτελείται από κλίνκερ σε ποσοστό από 75% έως 95% στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, ανάλογα με τις επιθυμητές ιδιότητες και το έργο. Το υπόλοιπο μέρος αποτελείται από γύψο (έως 5%) για τον έλεγχο των αντιδράσεων με το νερό και από πληρωτικά υλικά. Εξαιρέσεις, όσον αφορά το ποσοστό του κλίνκερ στο τσιμέντο, σημειώνονται σε τσιμέντα ειδικού τύπου, όπως τα σκωριοτσιμέντα, στα οποία το ποσοστό δύναται να φτάσει ακόμα και στο 5%. Το κλίνκερ αποτελείται από περίπου 80% ασβεστολιθικό πέτρωμα και 20% βωξίτη, αργιλοπυριτικά υλικά, σιδηρομεταλλεύματα και χαλαζιακή άμμο. Πρώτες ύλες που ενδείκνυται να προστεθούν σε μικρές ποσότητες στην παραγωγική διαδικασία, για να αντικαταστήσουν κάποια από τα παραπάνω υλικά είναι η σκουριά, η ιπτάμενη τέφρα, άμμος από την έρημο Σαχάρα, ποζολάνη και μπεντονίτης. [18,30]



Εικόνα 2.1 Κόρια συστατικά παραγωγής τσιμέντου

Η διαδικασία παραγωγής του τσιμέντου περιλαμβάνει μια σειρά διεργασιών, οι οποίες παρατίθενται παρακάτω:

- **Εξόρυξη πρώτων υλών**

Πρώτο βήμα για την παραγωγή του τσιμέντου είναι η εξόρυξη των πρώτων υλών και η μεταφορά τους στον χώρο θραύσης.

- **Πρωτοβάθμια θραύση**

Η πρωτοβάθμια θραύση των πρώτων υλών πραγματοποιείται με σιαγωνοθραυστήρες, σφυροθραυστήρες και άλλου τέτοιου είδους μηχανήματα.

- **Προ-ομογενοποίηση και αποθήκευση πρώτων υλών**

Τα θραυσμένα υλικά μεταφέρονται και αποθηκεύονται χωριστά κατά κατηγορία, σε ειδικές κλειστές αποθήκες-σιλό προ-ομογενοποίησης και από εκεί οδεύουν προς τους μύλους συνάλεσης (μύλοι φαρίνας) για περαιτέρω επεξεργασία.

- **Άλεση και ξήρανση πρώτων υλών**

Οι θραυσμένες πρώτες ύλες οδηγούνται κατά είδος (σε αυστηρά προκαθορισμένη και ελεγχόμενη αναλογία) με ζυγιστικούς ταινιόδρομους σε οριζόντιους ή κατακόρυφους μύλους συνάλεσης, στους οποίους αλέθονται και στη συνέχεια ξεραίνονται μέχρι την παραγωγή ενός λεπτόκοκκου και σχεδόν ομοιογενούς μείγματος ορυκτών (φαρίνα).

- **Λειοτρίβηση και ομογενοποίηση της φαρίνας**

Πριν την έψηση της φαρίνας συντελείται επιπλέον λειοτρίβηση και η τελική ομογενοποίηση της φαρίνας, η οποία γίνεται στα σιλό αλεσμένης φαρίνας.

- **Προθέρμανση φαρίνας**

Μετά την ομογενοποίηση, η φαρίνα τροφοδοτείται σε πύργο προθέρμανσης, εντός του οποίου υφίσταται προοδευτική θέρμανση μέχρι τους 900°C. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται η εξάτμιση του μη συνδεδεμένου, αλλά και του συνδεδεμένου κρυσταλλικού νερού από τα πετρώματα. Στη συνέχεια, ανάλογα με τη χρησιμοποιούμενη μέθοδο παραγωγής, η φαρίνα είτε εισέρχεται απευθείας στην κάμινο, είτε μεταφέρεται σε πύργο προπύρωσης. Εκεί, λαμβάνει χώρα η θερμική διάσπαση του ανθρακικού ασβεστίου (CaCO_3) σε οξείδιο του ασβεστίου (CaO) και διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), η οποία προτιμάται να γίνεται εκτός της καμίνου.

- **Έψηση φαρίνας- έναρξη πύρωσης**

Η προθερμασμένη φαρίνα τροφοδοτείται απευθείας στην περιστροφική κάμινο, εντός της οποίας συντελείται η περαιτέρω πύρωση του ασβεστολίθου και ο σχηματισμός φάσεων του κλίνκερ. [5]

Μέσα στην κάμινο, η φαρίνα προοδευτικά θερμαίνεται έως τους 1400 με 1500°C. Η θερμική αυτή κατεργασία έχει σαν αποτέλεσμα την αντίδραση του οξειδίου του ασβεστίου με τα οξείδια του πυριτίου, την αλουμίνα και τα οξείδια του σιδήρου και το σχηματισμό

ασβεστοπυριτικών και ασβεσταργλικών ενώσεων, οι οποίες τελικά συνθέτουν το κλίνκερ. Κατά την έψηση πρέπει να επικρατούν οξειδωτικές συνθήκες μέσα στην κάμινο.

Οι διεργασίες που συμβαίνουν κατά την έξοδο του κλίνκερ από την περιστροφική κάμινο είναι οι παρακάτω:

- **Ψύξη του κλίνκερ**

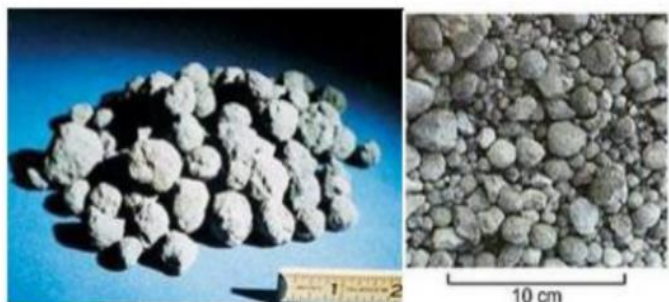
Το σχηματισμένο κλίνκερ, μετά την έξοδο του από την κάμινο και έχοντας θερμοκρασία περίπου 1200-1250°C, εισέρχεται στους ψύκτες, εντός των οποίων ψύχεται με εμφύσηση ψυχρού αέρα, έως τη θερμοκρασία των 100-200°C. Η ψύξη του κλίνκερ επιβάλλεται, αφού καθιστά ευκολότερη τη διαχείριση του στα μετέπειτα στάδια της παραγωγικής του διαδικασίας.

- **Αποθήκευση κλίνκερ**

Το παραγόμενο κλίνκερ εξερχόμενο από τις διατάξεις ψύξης, οδηγείται με μεταφορικές ταινίες σε σιλό, στα οποία φυλάσσεται μέχρι να τροφοδοτηθεί στο επόμενο στάδιο.



Εικόνα 2.2 Ψύκτες πλανητικού τύπου



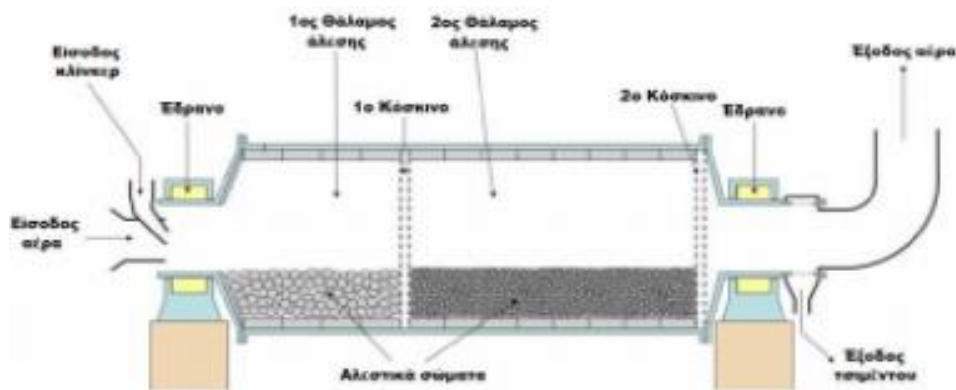
Εικόνα 2.3 Το κλίνκερ αφότου υποστεί ψύξη

- **Άλεση του κλίνκερ και προσθήκη γύψου**

Σε αυτό το στάδιο, το κλίνκερ διέρχεται από θραυστήρες, στους οποίους υπόκειται σε πρωτοβάθμια θραύση, ούτως ώστε η κοκκομετρία του να εξασφαλίζει την επιτάχυνση της αλευροποίησης του στην μετέπειτα επεξεργασία του. Εκεί, οδηγούνται, επίσης, η γύψος και τα απαραίτητα πρόσθετα υλικά, σε αυστηρά προκαθορισμένες και συνεχώς ελεγχόμενες δοσολογίες.

- **Άλεση κλίνκερ- γύψου**

Το προθραυσμένο προϊόν τροφοδοτείται στους μύλους τσιμέντου (σφαιρόμυλοι) που μοιάζουν με τους οριζόντιους μύλους φαρίνας. Μέσα στους σφαιρόμυλους, τα υλικά αυτά συναλέθονται με τη βοήθεια μεγάλης ποσότητας μεταλλικών αλεστικών σφαιρών, το μέγεθος των οποίων διαφέρει σε κάθε θάλαμο του μύλου. Το τελικό προϊόν που προκύπτει είναι η γνωστή, λεπτή σκόνη τσιμέντου.



Εικόνα 2.4 Απεικόνιση σφαιρόμυλου

- **Αποθήκευση τσιμέντου**

Το λεπτόκοκκο προϊόν εξέρχεται από τους μύλους, συλλέγεται και οδηγείται σε ειδικά σιλό τσιμέντου για αποθήκευση μέσης χρονικής διάρκειας. Ο τρόπος και ο χρόνος αποθήκευσης του τσιμέντου επηρεάζουν σημαντικά την αντοχή του.

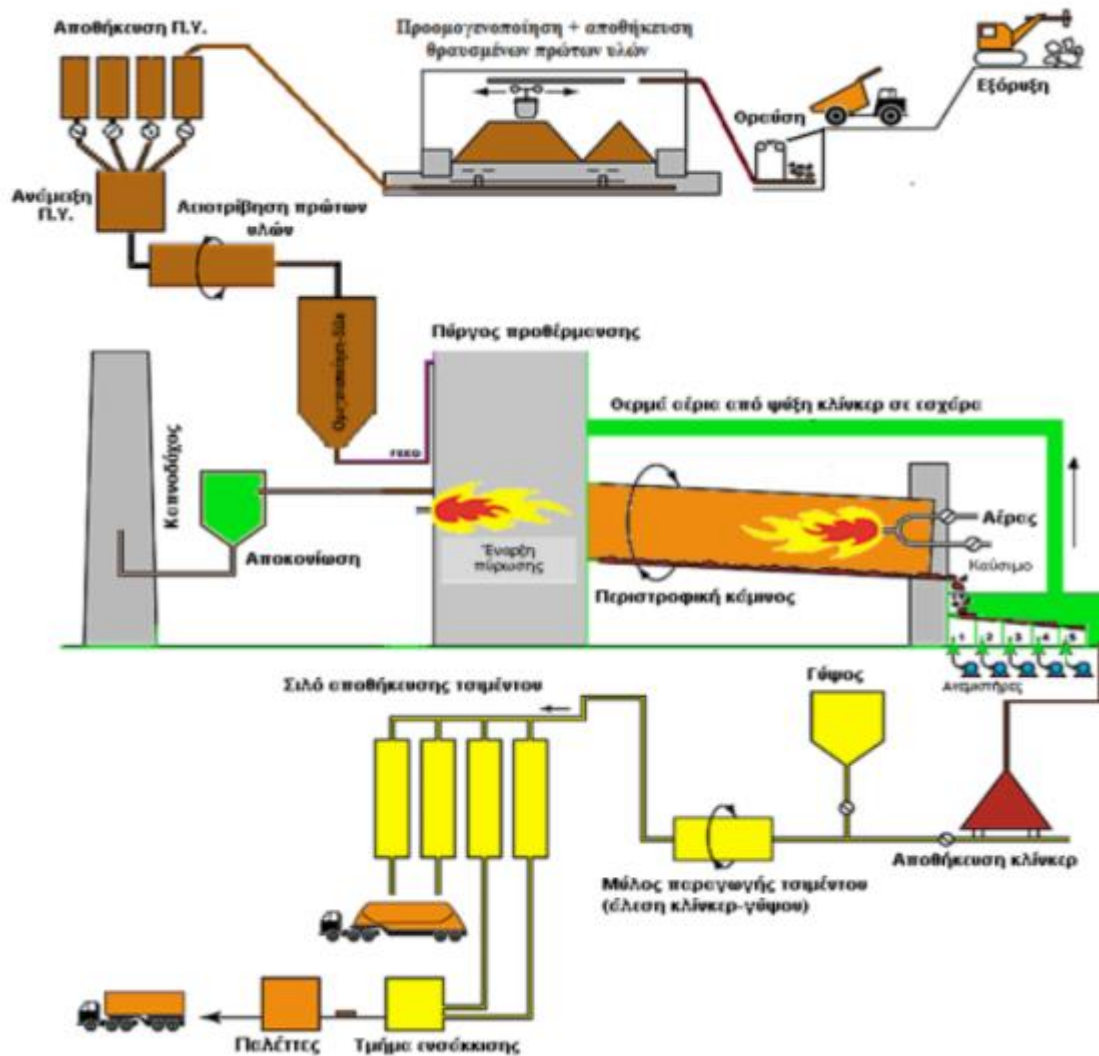


Εικόνα 2.5 Σιλό αποθήκευσης τσιμέντου

Κατά τη διάρκεια της αποθήκευσης, λόγω της υγρασίας του αέρα, προκαλείται η σταδιακή ενυδάτωσή του, με αποτέλεσμα να συσσωματώνεται και να μειώνεται η αντοχή του. Ενδεικτικά, αναφέρεται ότι η αντοχή σε θλίψη του τσιμέντου μετά από αποθήκευση 3 μηνών μειώνεται κατά 10 έως 20%, ενώ μετά από αποθήκευση 6 μηνών μειώνεται κατά 20 έως 30%.

- **Συσκευασία και μεταφορά προϊόντος**

Από τους χώρους αποθήκευσής του, το τσιμέντο οδηγείται, είτε σε συσκευαστικές μηχανές, στις οποίες συσκευάζεται σε χάρτινους σάκους, είτε φορτώνεται και μεταφέρεται χύδην σε ειδικού τύπου σιλοφόρα φορτηγά, τρένα και πλοία.



Εικόνα 2.6 Η διαδικασία παραγωγής του τσιμέντου [5]

Στην παραπάνω εικόνα φαίνονται όλες οι διεργασίες που λαμβάνουν χώρα για την παραγωγή του τσιμέντου από το πρώτο στάδιο της εξόρυξης, μέχρι και τη μεταφορά του τελικού προϊόντος. [3,5,12]

2.3 Τύποι και πρόσθετα τσιμέντου

2.3.1 Τύποι τσιμέντου

Λαμβάνοντας υπόψη τα διάφορα χαρακτηριστικά ενός τσιμέντου, όπως είναι η χημική σύσταση του κλίνκερ, ο βαθμός άλεσης, το ποσοστό των συστατικών του, η αντοχή του τσιμέντου και η παρουσία ή όχι διαφόρων προσθέτων μπορούν να διακριθούν διαφορετικοί τύποι τσιμέντου. Οι πέντε βασικότεροι εξ' αυτών, παρουσιάζονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 2.1 Βασικοί τύποι τσιμέντου

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

Τσιμέντο Τύπου I (CEM I), Portland : Το τσιμέντο τύπου Portland (CEM I), αποτελεί τον πιο διαδεδομένο τύπο τσιμέντου και παράγεται ύστερα από συνάλεση γύψου και κλίνκερ σε ποσοστό 95% και άνω. Ως τσιμέντο γενικής χρήσης είναι κατάλληλο για μια πληθώρα εφαρμογών, όπου δεν απαιτούνται οι ειδικές ιδιότητες άλλων τύπων τσιμέντου. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές, στις οποίες δεν εκτίθεται σε συγκεκριμένες συνθήκες, όπως θετικά κοντά σε νερό ή απότομες μεταβολές της θερμοκρασίας. Μερικές από τις χρήσεις του είναι σε:

- Πεζοδρόμια
- Κατασκευές οπλισμένου σκυροδέματος
- Γέφυρες
- Σιδηροδρομικές κατασκευές
- Δεξαμενές αποθήκευσης
- Υπονόμους
- Τοιχοποιία

Τσιμέντο Τύπου II (CEM II), Σύνθετο τσιμέντο Portland: Τα σύνθετα τσιμέντα Portland προέρχονται από την συνάλεση κλίνκερ, γύψου και φυσικής ή τεχνητής ποζολάνης, σε ποσοστό από 6-35% κατά μέγιστο. Χρησιμοποιούνται ευρέως, όταν η πρόληψη ενάντια σε θειικά είναι απαραίτητη, όπως σε αποχετεύσεις ή υπόγειες κατασκευές, όπου η συγκέντρωση θεικών είναι υψηλότερη από τη συνηθισμένη. Παράλληλα χρησιμοποιούνται σε κατασκευές μεγάλου μεγέθους, όπως προβλήτες, κολώνες στήριξης θαλάσσιων γεφυρών και φράγματα.

Τσιμέντο Τύπου III (CEM III), Σκωριακό τσιμέντο ή σκωριοτσιμέντο: Τα σκωριοτσιμέντα προέρχονται από την συνάλεση κλίνκερ, γύψου και σκωρίας σε ποσοστό από 36 έως 95%. Λόγω της ιδιότητας τους να αποκτούν υψηλές αντοχές εντός μιας εβδομάδας ή και λιγότερο, τα σκωριοτσιμέντα βρίσκουν εφαρμογή κυρίως σε περιπτώσεις όπου μια κατασκευή πρέπει να παραδοθεί σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα προς χρήση.

Τσιμέντο Τύπου IV (CEM IV), Ποζολανικό τσιμέντο: Τα ποζολανικά τσιμέντα προέρχονται από τη συνάλεση κλίνκερ, γύψου και κάποιας φυσικής ή τεχνητής ποζολάνης, πυριτικής παιπάλης ή ιπτάμενης τέφρας σε ποσοστό από 11 έως 55%. Στα ποζολανικά τσιμέντα δεν προβλέπεται η χρησιμοποίηση σκωρίας. Χαρακτηρίζονται από χαμηλή θερμότητα ενυδάτωσης και χρησιμοποιούνται σε περιπτώσεις, όπου ο ρυθμός και η ποσότητα της παραγόμενης θερμότητας πρέπει να περιοριστεί. Βρίσκουν εφαρμογή σε ογκώδεις κατασκευές, όπως φράγματα βαρύτητας.

Τσιμέντο Τύπου V (CEM V), Σύνθετο τσιμέντο: Τα σύνθετα τσιμέντα προέρχονται από τη συνάλεση κλίνκερ, γύψου, σκωρίας και κάποιας φυσικής/τεχνητής ποζολάνης ή ιπτάμενης τέφρας σε ποσοστά από 18 έως 30%, ενώ δεν προβλέπεται η χρήση πυριτικής παιπάλης σε αυτόν τον τύπο τσιμέντου. Χαρακτηρίζονται ως αντί-θεικά και χρησιμοποιούνται μόνο σε περιπτώσεις, όπου η συγκέντρωση θεικών σημειώνεται ως πολύ υψηλή, όπως σε ειδικές περιπτώσεις υπόγειων κατασκευών. [36,31]

Κατηγορίες αντοχής τσιμέντων

Από άποψη αντοχής, τα τσιμέντα κατατάσσονται στις παρακάτω κατηγορίες :

- Κατηγορία 35 (με αντοχή σε θλίψη 28ημερών από 25-45 MPa)

- Κατηγορία 45 (με αντοχή σε θλίψη 28ημερών από 35-55 MPa)
- Κατηγορία 55 (με αντοχή σε θλίψη 28ημερών άνω των 45 MPa)

Έτσι, ένα τσιμέντο Π /35 σημαίνει ότι είναι τύπου Π και αντοχής σε θλίψη από 25 έως 45 MPa. Ο ρυθμός αύξησης της αντοχής του τσιμέντου επιτυγχάνεται στην πλειοψηφία των περιπτώσεων με αύξηση της λεπτότητας (Blaine). Ένα λεπτόκοκκα αλεσμένο τσιμέντο (Blaine = 4000 cm²/g) έχει γρηγορότερο ρυθμό αύξησης της αντοχής από ένα χονδρόκοκκα αλεσμένο τσιμέντο (Blaine = 2500-3000 cm²/g). [20,30]

2.3.2 Τσιμέντα ειδικού τύπου

Εκτός από τους βασικούς τύπους τσιμέντου, διακρίνονται και άλλοι τύποι με περισσότερο εξειδικευμένα χαρακτηριστικά, όπως είναι οι εξής:

- Τα αργιλικά τσιμέντα, που περιέχουν ως επί το πλείστον οξείδιο του ασβεστίου και οξείδιο του αργιλίου, με περιεκτικότητα στο δεύτερο 40-45%. Τα αργιλικά τσιμέντα είναι χρώματος μαύρου και χαρακτηρίζονται από την ταχεία ανάπτυξη αντοχής που πραγματοποιείται ακόμα και σε χαμηλές θερμοκρασίες. Ωστόσο, κάποιες φορές, η αντοχή του τσιμέντου μειώνεται σε βάθος χρόνου. Το γεγονός αυτό οφείλεται στην αστάθεια που εμφανίζουν ορισμένα από τα προϊόντα ενυδάτωσης. Συνεπώς, συνίσταται να αποφεύγεται η χρήση αργιλικών τσιμέντων στα δομικά έργα. Οι συνηθέστερες χρήσεις τους είναι:
 - Σε επιδιορθώσεις όπου απαιτείται ταχεία αποκατάσταση
 - Σε βιομηχανικά δάπεδα
 - Ως εσωτερική προστασία μεταλλικών σωλήνων
 - Ως διασυνδετικό σε επισκευαστικά και συγκολλητικά κονιάματα
 - Για σκυροδέτηση σε ψυχρές περιοχές
 - Ως πυροπροστατευτικά κονιάματα και σκυροδέματα, είτε χυτά, είτε εκτοξευόμενα, στον κλάδο της μεταλλουργίας και της σιδηρουργίας
 - Στις καπνοδόχους, στους φούρνους καθώς και σε άλλες κατασκευές που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες
 - Σε πλάκες επίστρωσης επιφανειών
 - Σε μικρά προκατασκευασμένα στοιχεία. [10]

- Τα ταχύπηκτα τσιμέντα: Η εν λόγω κατηγορία τσιμέντου παρασκευάζεται από ασβεστοαργιλώδη πετρώματα απουσία γύψου, εξαιτίας της οποίας επιβραδύνεται η πήξη. Όταν είναι απαραίτητος συγκεκριμένος χρόνος πήξης, τότε γίνεται ανάμειξη των ταχύπηκτων τσιμέντων με ποσότητες συμβατικού τσιμέντου, καθώς και με ποσότητες ασβεστόλιθου. Τα ταχύπηκτα τσιμέντα εφαρμόζονται κυρίως:
 - Στην κατασκευή καναλιών για υδρορροές
 - Στις καπνοδόχους που βρίσκουν χρήση στον κλάδο της βιομηχανίας
 - Στις ειδικές θεμελιώσεις στα σφραγίσματα σωληνώσεων
 - Στα κονιάματα και στις επιδιορθώσεις
 - Σε δομικές μονάδες.

- Τα λευκά τσιμέντα παρασκευάζονται από λευκά ασβεστολιθικά υλικά, χωρίς μεταλλικές προσμίξεις σιδήρου, σε μύλους που πληρούν ειδικές προδιαγραφές. Εξαιτίας αυτού έχουν σημαντικά υψηλότερο κόστος, σε σχέση με τα κοινά τσιμέντα. Η συγκεκριμένη κατηγορία τσιμέντου βρίσκει χρήσεις σε εφαρμογές όπου καθίσταται αναγκαίο να πληρούνται συγκεκριμένες αρχιτεκτονικές και αισθητικές απαιτήσεις. [32]



Εικόνα 2.7 Παράδειγμα χρήσης λευκού τσιμέντου

- Τα τσιμέντα μεταβαλλόμενου όγκου περιέχουν προσμίξεις, που ενισχύουν την ενυδάτωση μετά την πήξη, τη διόγκωση ή τη συρρίκνωση του όγκου των τσιμέντων, έτσι ώστε να αποκτήσουν τις επιθυμητές διαστάσεις. [8]

Πέρα από τις κατηγορίες τσιμέντων που έχουν προαναφερθεί, υπάρχουν και άλλοι τύποι, οι οποίοι χρησιμοποιούνται για ειδικές εφαρμογές. Πιο αναλυτικά, διακρίνονται:

- Τα τσιμέντα περιορισμένης υδροφιλίας, τα οποία παρασκευάζονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να μπορούν να αποθηκεύονται σε υγρό περιβάλλον, χωρίς να δημιουργούνται προβλήματα λόγω υγρασίας. Η ιδιότητα αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε ορισμένες γεωγραφικές περιοχές ή σε ορισμένα έργα, όπως είναι τα έργα οδοποιίας ή εδαφομηχανικής. Το τσιμέντο περιορισμένης υδροφιλίας είναι ένα κοινό τσιμέντο, στο οποίο έχουν προστεθεί μικρές ποσότητες λιπαρών οξέων, όπου περιβάλλουν τους κόκκους του με μια προστατευτική στρώση, ώστε να μην απορροφούν υγρασία. [11]

- Τα πυροπροστατευτικά τσιμέντα έχουν κοινά χαρακτηριστικά με τα αργιλικά τσιμέντα. Τα πυροπροστατευτικά τσιμέντα παρουσιάζουν μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε άργιλο, κυμαινόμενη από 50% έως και 80%. Σε συνδυασμό με τα κατάλληλα αδρανή, αυτός ο τύπος τσιμέντου δημιουργεί σκυροδέματα με αντοχή ακόμα και στους 2000°C. Τα πυροπροστατευτικά τσιμέντα χρησιμοποιούνται κυρίως για την κατασκευή χυτών ή προκατασκευασμένων πυράντοχων δομικών στοιχείων. [13]
- Τα τσιμέντα οδοποιίας. Στα σύγχρονα έργα οδοποιίας, η θεμελίωση κατασκευάζεται από σκύρο ενοποιημένο, που περιέχει νερό σε ποσοστό από 5% έως 7%. Όντας απαραίτητο από την αρχή της ανάμιξης έως και τη συμπλήρωση της πύκνωσης, το τσιμέντο να παραμείνει εργάσιμο, πρέπει να χαρακτηρίζεται από βραδεία πήξη και μεγάλη περίοδο εργασιμότητας. Οι ιδιότητες αυτές οφείλονται στις ειδικές προσμίξεις που περιέχονται στο τσιμέντο. Ανάλογα με τις προσμίξεις και τα αδρανή που χρησιμοποιούνται διακρίνονται τύποι τσιμέντου που βρίσκουν εφαρμογή στους αυτοκινητοδρόμους, τα μεγάλα έργα οδοποιίας, τις γέφυρες, τις αντιστηρίξεις, τα φράγματα κτλ. [8]

Πίνακας 2.2 Τα 27 προϊόντα στην οικογένεια των κοινών τσιμέντων, σύμφωνα με το πρότυπο EN 197-1 [35]

			Κύρια συστατικά									Δευτερεύοντα συστατικά		
			Κλίνκερ Κ	Σκυρία υψηλού S	Πορτιτική παιτάλη D ^{β)}	Ποξολάνη		Ιζόμενες τσέρες		Ψημένο σχιστόλιθο T	Λαβηστόλιθος			
						P	Q	V	W		L	LL		
CEM I	Τσιμέντο Πόρτλαντ	CEM I	95-100	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM II	Τσιμέντο Πόρτλαντ με Σκυρία Υψηκόμινον	CEM II/A-S	80-94	6-20	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM II/B-S	65-79	21-35	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με πορτιτική παιτάλη	CEM II/A-D	90-94	-	6-10	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-P	80-94	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	-	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με ποξολάνη	CEM II/B-P	65-79	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-Q	80-94	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-Q	65-79	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-V	80-94	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	-	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με ιζόμενη τσέρα	CEM II/B-V	65-79	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-W	80-94	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	-	0-5
		CEM II/B-W	65-79	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	-	0-5
		CEM II/A-T	80-94	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	-	0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με ψημένο σχιστόλιθο	CEM II/B-T	65-79	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	-	0-5
		CEM II/A-L	80-94	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	-	0-5
		CEM II/B-L	65-79	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	-	0-5
		CEM II/A-LL	80-94	-	-	-	-	-	-	-	-	6-20	-	0-5
Τσιμέντο Πόρτλαντ με λαβηστόλιθο	CEM II/B-LL	65-79	-	-	-	-	-	-	-	-	21-35	-	0-5	
	CEM II/A-M	80-94	←-----6-20-----→										0-5	
	CEM II/B-M	65-79	←-----21-35-----→										0-5	
	Τσιμέντο Πόρτλαντ-σύνθετο ^{γ)}													
CEM III	Σκυριοτσιμέντο	CEM III/A	35-64	36-65	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/B	20-34	66-80	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
		CEM III/C	5-19	81-95	-	-	-	-	-	-	-	-	0-5	
CEM IV	Ποξολάνικο τσιμέντο ^{γ)}	CEM IV/A	65-89	-	←-----11-35-----→						-	-	0-5	
		CEM IV/B	45-64	-	←-----36-55-----→						-	-	0-5	
CEM V	Σύνθετο τσιμέντο ^{γ)}	CEM V/A	40-64	18-30	-	←-----18-30-----→			-	-	-	-	0-5	
		CEM V/B	20-38	31-50	-	←-----31-50-----→						-	-	0-5

α) Οι τιμές του πίνακα αναφέρονται στο σύνολο των κύριων και δευτερευόντων συστατικών

β) Το ποσοστό της πορτιτικής παιτάλης περιορίζεται στο 10%

γ) Στα τσιμέντα Πόρτλαντ-σύνθετα CEM II/A-M και CEM II/B-M, στα ποξολάνικα τσιμέντα CEM IV/A και CEM IV/B και στα σύνθετα τσιμέντα CEM V/A και CEM V/B τα κύρια συστατικά πλην του κλίνκερ πρέπει να δηλώνονται στην ονομασία του τσιμέντου (για παράδειγμα βλέπε κεφάλαιο 8).

2.3.3 Πρόσθετα τσιμέντου

Τις τελευταίες δεκαετίες παρατηρείται μια συνεχώς αυξανόμενη τάση για τη χρήση πρόσθετων υλικών στην παραγωγή τσιμέντου. Τα σύνθετα αυτά τσιμέντα παράγονται ανάλογα με τις απαιτήσεις της κάθε εφαρμογής. Τα πρόσθετα που χρησιμοποιούνται εμφανίζουν υδραυλικές, ποζολανικές ιδιότητες ή είναι αδρανή. Τα υλικά μπορεί να είναι είτε φυσικά, όπως ο ασβεστόλιθος και οι φυσικές ποζολάνες, είτε βιομηχανικά παραπροϊόντα, όπως η σκωρία υψικαμίνου, η πυριτική παιπάλη και η ιπτάμενη τέφρα. Η παραγωγή και χρήση σύνθετων τσιμέντων Portland είναι πλέον διαδεδομένη, γεγονός που οφείλεται στη θετική συμβολή τους σε πολλές από τις ιδιότητες του σκυροδέματος. Επιπλέον, αξιοποιούνται παραπροϊόντα άλλων βιομηχανικών διαδικασιών, μειώνοντας τα περιβαλλοντικά προβλήματα που δημιουργεί η απόρριψή τους.

Οι βελτιωμένες ιδιότητες που παρουσιάζουν τα σύνθετα τσιμέντα Portland είναι:

- αυξημένη αντοχή σε διαλύματα οξέων,
- χαμηλή θερμότητα ενυδάτωσης,
- βελτίωση χαρακτηριστικών σκυροδέματος (ανθεκτικότητα, προστασία οπλισμού),
- ανάπτυξη αντοχών

Κατά κανόνα, τα σύνθετα τσιμέντα έχουν μικρότερο κόστος παραγωγής. Χρησιμοποιώντας τα, προκύπτουν οφέλη, όπως η εξοικονόμηση ενέργειας, πρώτων υλών και φυσικών πόρων, ενώ μειώνεται και η έκλυση διοξειδίου του άνθρακα κατά την παραγωγή κλίνκερ.

Η αποτελεσματικότητα των πρόσθετων στα τσιμέντα, συνδυαστικά με την εκμετάλλευση των απορριμμάτων συμβατικών ορυκτών πρώτων υλών ή βιομηχανικών παραπροϊόντων, την πράσινη ανάπτυξη, καθώς και την μείωση του ενεργειακού κόστους έγιναν ο κύριος σκοπός παραγωγής τους.

Το πρότυπο EN 206-1 αναφέρει δυο κατηγορίες προσθέτων, τα σχεδόν αδρανή πρόσθετα και τα πρόσθετα που έχουν ποζολανικές ή λανθάνουσες υδραυλικές ιδιότητες (πυριτικά παραπροϊόντα). Τα πυριτικά παραπροϊόντα που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα περιλαμβάνουν τις ιπτάμενες τέφρες και την πυριτική παιπάλη και ταξινομούνται σε 5 κατηγορίες :

- Υλικά με υδραυλικές ιδιότητες.
- Υλικά με ποζολανικές και υδραυλικές ιδιότητες.

- Κανονικές ποζολάνες.
- Υλικά με ισχυρές ποζολανικές ιδιότητες.
- Υλικά μικρής δραστηριότητας.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι ιδιότητες των παραπάνω προσθέτων ενισχύονται σημαντικά εάν τα υλικά αυτά αλεσθούν σε μεγάλες λεπτότητες. [34,36]

Ιπτάμενη τέφρα

Η ιπτάμενη τέφρα (fly ash) είναι ένα στερεό και κονιώδες υλικό, το οποίο αποτελεί το κύριο σε ποσότητα παραπροϊόν από τους λέβητες των θερμοηλεκτρικών σταθμών παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, με καύση των στερεών καυσίμων (λιθάνθρακες, λιγνίτες, τύρφη). Στη συνέχεια, παρασύρεται από το ρεύμα των καυσαερίων και συλλέγεται στις εγκαταστάσεις αποκονίωσης (ηλεκτροστατικά φίλτρα). Στην Ελλάδα, η παραγωγή τέφρας πυθμένα ανέρχεται σε $1 \cdot 10^6$ τόνους ανά έτος, ενώ η συνολική παραγωγή της ιπτάμενης τέφρας έχει ξεπεράσει τους $13 \cdot 10^6$ τόνους ετησίως.



Εικόνα 2.8 Σκόνη ιπτάμενης τέφρας

Η ιπτάμενη τέφρα είναι ένα υλικό που χρησιμοποιείται ως πρόσθετο στην παρασκευή σκυροδέματος, αντικαθιστώντας μέρος του τσιμέντου. Η χρήση της προσφέρει στο σκυρόδεμα ενδιαφέρουσες τεχνολογικές ιδιότητες και, ως αποτέλεσμα εμφανίζει πολλά πλεονεκτήματα συγκριτικά με το κοινό σκυρόδεμα.

Η ιπτάμενη τέφρα δε συμπεριφέρεται σαν απλή ποζολάνη, αντιθέτως συμβάλλει σημαντικά στις τελικές αντοχές των μιγμάτων. Σε αντίθεση με τα γνωστά ποζολανικά υλικά, δεν αντιδρά

σε δεύτερη φάση (μετά τη λανθάνουσα περίοδο της ενυδάτωσης του τσιμέντου) με το παραγόμενο Ca(OH)_2 από τις πρώτες αντιδράσεις ενυδάτωσης των C_3S και C_2S . Ο ρόλος της δεν περιορίζεται μόνο στην αξιοποίηση του παραγόμενου Ca(OH)_2 , οπότε και το όριο στο ποσοστό αντικατάστασης είναι υψηλό, αντίθετα με το ποσοστό των υπόλοιπων ποζολανών. [15]

Πυριτική Παιπάλη

Η πυριτική παιπάλη, είναι ένα άμορφο, πολύμορφο διοξειδίου του πυριτίου. Η συλλογή της πραγματοποιείται υπό μορφή σκόνης, και είναι παραπροϊόν της βιομηχανίας σιδηροπυριτικών κραμάτων και πυριτικών μετάλλων. Αποτελείται από σφαιρικά σωματίδια με μέση διάμετρο 150 nm, σε σχέση με τα σωματίδια του τσιμέντου, τα οποία κατά μέσο όρο είναι 100 φορές μεγαλύτερα. Η κύρια εφαρμογή της είναι ως ποζολανικό υλικό σε σκυρόδεμα υψηλών επιδόσεων.



Εικόνα 2.9 Σκόνη πυριτικής παιπάλης

Κατά την δεκαετία του 1970, εφαρμόστηκαν αυστηροί περιβαλλοντικοί νόμοι που επέβαλλαν στα χυτήρια πυριτίου τη συλλογή παραπροϊόντων, όπως η πυριτική παιπάλη και την αξιοποίησή τους. Εφαρμογές του υλικού πραγματοποιήθηκαν στη Νορβηγία, στις οποίες φαίνεται πως το τσιμέντο που περιείχε πυριτική παιπάλη είχε υψηλότερες αντοχές και χαμηλότερο πορώδες, σε σχέση με τα απλά τσιμέντα. Από τότε, η έρευνα και η εξέλιξη της πυριτικής παιπάλης, ενός πολύτιμου πρόσθετου, με πολλαπλές χρήσεις, συνέβαλλε στην εξέλιξη του σκυροδέματος και των προϊόντων τσιμέντου που κατασκευάζονται σήμερα.

Λόγω της λεπτότητας και της υψηλής περιεκτικότητάς της σε διοξείδιο του πυριτίου, η πυριτική παιπάλη αποτελεί ένα εξαιρετικά αποτελεσματικό ποζολανικό υλικό. Προστίθεται στο σκυρόδεμα για τη βελτίωση των ιδιοτήτων του, κυρίως της αντοχής σε θλίψη και τη σύνδεση μεταξύ των κόκκων του, ενώ, παράλληλα, συμβάλλει στη βελτίωση της εργασιμότητάς του.

Επιπροσθέτως, η προσθήκη πυριτικής παιπάλης μειώνει τη διαπερατότητα του σκυροδέματος σε ιόντα χλωρίου, γεγονός το οποίο το προστατεύει από διάβρωση, ειδικά σε περιβάλλον πλούσιο σε χλωριόντα, όπως παράκτιες περιοχές ή γέφυρες πάνω από θαλασσίνο νερό. [34]

Σκωρία υψικαμίνου

Η σκωρία υψικαμίνου (Granulated Blast Furnace Slag) συνιστά παραπροϊόν υψικαμίνων σιδηρομεταλλευμάτων, υπό μορφή σκωρίας. Προκύπτει συνεπώς από την παραγωγική διαδικασία του χάλυβα. Είναι μη μεταλλικό υλικό, αποτελούμενο από πυριτικά και αργιλοπυριτικά άλατα του ασβεστίου. Η χημική σύσταση της σκωρίας χαρακτηρίζεται, κατά κύριο λόγο, από οξείδια ασβεστίου, σιδήρου, μαγνησίου (CaO , FeO , MgO), καθώς και από άλλα οξείδια και στοιχεία σε μικρότερες ποσότητες (SiO , MnO , Al_2O_3 , P_2O_5 , S).

Η δημιουργία της πραγματοποιείται σε φούρνο με αέρα υπό πίεση, όταν το μέταλλο σιδήρου λιώνει μαζί με ασβεστόλιθο ή δολομίτη. Στην υψικάμινο, οι σκωρίες επιπλέουν στο μέταλλο, ενώ, στη συνέχεια, η λειωμένη σκωρία ψύχεται και στερεοποιείται. Η πολύ γρήγορη ψύξη της σκωρίας, με έκθεση στο νερό, σχηματίζει διεσταλμένη σκωρία και, έπειτα, συνθλίβεται για να παραχθούν τα απαιτούμενα μεγέθη για την εκάστοτε εφαρμογή. Κατά την ολοκλήρωση της μεταλλουργικής διαδικασίας της τήξης, το ασβέστιο, σε συνδυασμό με χημικά άλατα αργλικών και πυριτικών ορυκτών του μεταλλεύματος και της τέφρας, διαμορφώνει αυτό το μη μεταλλικό προϊόν. Οι σκωρίες φούρνων χάλυβα και υψικαμίνων αποτελούν τους σημαντικότερους τύπους σκωρίας.

Οι σκωρίες έχουν από μόνες τους υδραυλικές ιδιότητες. Κατά την ενυδάτωση τους, χωρίς την παρουσία του τσιμέντου Portland, ο ρυθμός σχηματισμού του υδραυλικού υλικού είναι χαμηλός και η τελική σχηματιζόμενη ποσότητα είναι μικρή. Γι' αυτό το λόγο, οι σκωρίες υψικαμίνων χρησιμοποιούνται μόνο σε μίγματα με τσιμέντο τύπου Portland.



Εικόνα 2.10 Σκόνη σκωρίας υψικαμίνου

Λόγω των υδραυλικών ιδιοτήτων της σκωρίας, σωματίδια μεγέθους μικρότερου από 10 μm συνεισφέρουν στις πρώιμες αντοχές, ενώ σωματίδια κοκκομετρίας μεταξύ 10 και 45 μm συνεισφέρουν στις τελικές αντοχές. Γενικά, η σκωρία είναι υλικό κοκκομετρίας μικρότερης των 45 μm, άλλωστε σωματίδια πιο χονδρόκοκκα είναι δύσκολο να ενυδατωθούν.

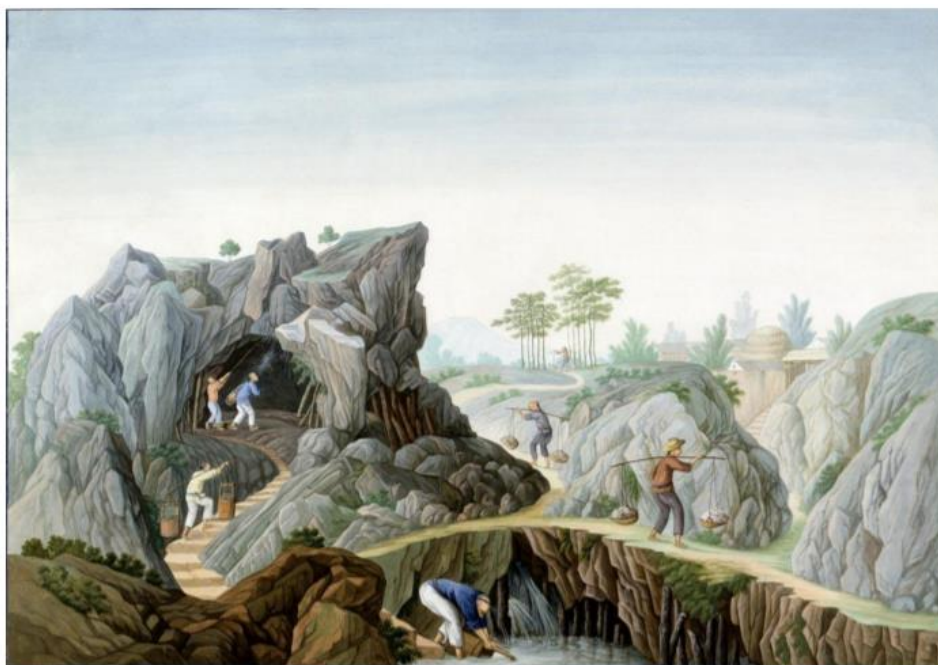
Η σκωρία υψικαμίνου έχει πολλαπλά οφέλη ως πρόσθετο στο σκυρόδεμα, όπως:

- υψηλή τελική αντοχή, με χαμηλές πρώιμες αντοχές,
- υψηλή αναλογία σε κάμψη ως προς την αντοχή σε θλίψη,
- αντίσταση στα θειικά ιόντα και τα ιόντα χλωρίου,
- χαμηλή θερμοκρασία ενυδάτωσης,
- μείωση του πορώδους και της διαπερατότητας του σκυροδέματος.

Επίσης, τα τσιμέντα που περιέχουν σκωρία έχουν χαμηλή απαίτηση σε νερό και καλή εργασιμότητα .[15]

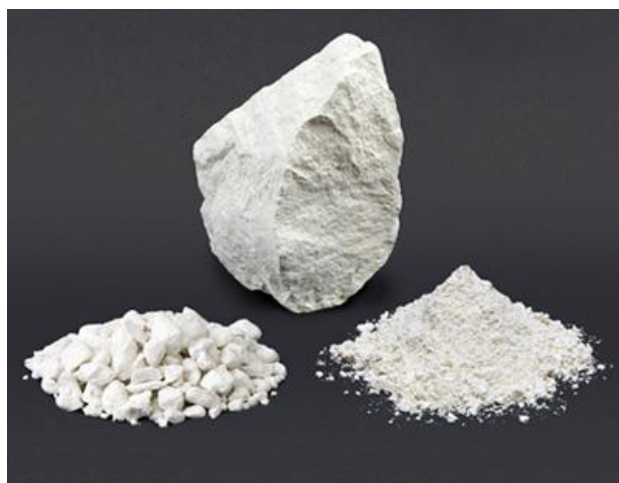
2.3.4 Ο μετακαολίνης ως πρόσθετο στα τσιμεντοκονιάματα

Ο καολίνης είναι ένα πέτρωμα που στο μεγαλύτερο μέρος του αποτελείται από καολινίτη. Είναι ένα βιομηχανικό ορυκτό με χημικό τύπο $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ και πήρε το όνομά του από την κινεζική επαρχία Cauling όπου και βρέθηκε για πρώτη φορά.



Εικόνα 2.11 Εξόρυξη καολίνη στην Κίνα (ελαιογραφία)

Ανήκει στην ομάδα των αργιλοπυριτικών ορυκτών, με δομή 1:1, δηλαδή ένα φύλλο τετραέδρων πυριτίου εναλλάσσεται με ένα φύλλο οκταέδρων αργιλίου. Ο καολίνης έχει συνήθως λευκό χρώμα, ενώ χαρακτηρίζεται από λεπτόκοκκη υφή, μεγάλη διασπορά, είναι χημικά αδρανής και έχει χαμηλό κόστος παραγωγής.



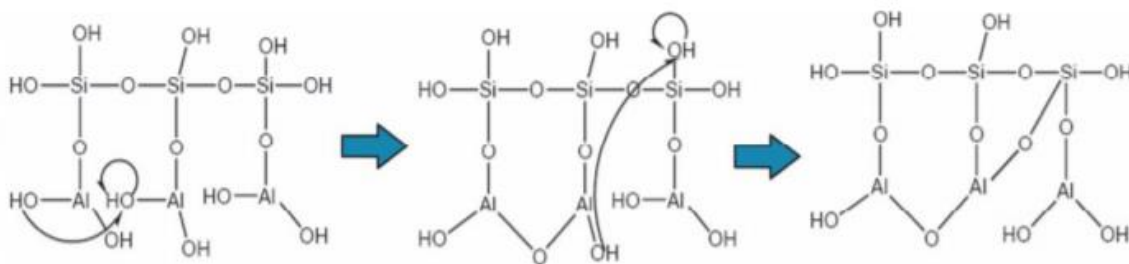
Εικόνα 2.12 Καολίνης

Αποτελεί πρώτη ύλη σε κεραμικά, σε πορσελάνες, σε είδη υγιεινής, στη τσιμεντοβιομηχανία, σε πυρίμαχους πλίνθους, στη χαρτοβιομηχανία, στη βιομηχανία ελαστικών και πλαστικών, στη γεωργία και πολλές άλλες εφαρμογές άγνωστες στο μέσο καταναλωτή. [6,33]

Στην Ελλάδα, αποθέσεις καολίνη υπάρχουν στη Λέσβο, την Κίμωλο, την Κω, τη Θήρα, τη Ροδόπη, το Κιλκίς, τη Μήλο και Δράμα. Τα πιο πολλά κοιτάσματα δεν είναι εκμεταλλεύσιμα και, έτσι, ο καολίνης εξορύσσεται τακτικά μόνο από τα κοιτάσματα της Μήλου και της Δράμας.

Ο μετακαολίνης, είναι ένα άμορφο προϊόν, το οποίο προκύπτει από θερμική ή μηχανική επεξεργασία (έψηση/ άλεση) καολίνη, σε θερμοκρασία που κυμαίνεται από 550 μέχρι 850°C. Κατά την μετατροπή του καολίνης σε μετακαολίνη, το κρυσταλλικό πλέγμα του καολινίτη καταστρέφεται και απομακρύνονται υδροξύλια. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα ο προσανατολισμός του Al^{3+} να γίνεται από οκταεδρικός, τετραεδρικός. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι σταδιακές μετατροπές που συμβαίνουν κατά το μετασχηματισμό του καολίνης σε μετακαολίνη, ανάλογα με τις θερμοκρασίες που αναπτύσσονται:

- T: <100°C: απομάκρυνση του προσροφημένου νερού.
- T: ~100–400°C: απομάκρυνση OH και αναδιαμόρφωση του κρυσταλλικού πλέγματος του καολινίτη.
- T: 400–650°C: Αφυδροξυλίωση και διάσπαση κρυσταλλικού πλέγματος καολινίτη και σχηματισμός μετακαολίνης. [17]



Εικόνα 2.13 Σχηματική παράσταση της αφυδροξυλίωσης του καολινίτη

Ο μετακαολίνης αποτελεί φυσική ποζολάνη, η οποία παρουσιάζει πολύ υψηλή ποζολανική δραστηριότητα, σε σύγκριση με άλλα ποζολανικά υλικά. Σύμφωνα με μελέτες, η χρήση μετακαολίνης προσδίδει στο σκυρόδεμα βελτιωμένες ιδιότητες λόγω της υψηλής ποζολανικότητάς του. Πιο συγκεκριμένα, η επίδραση του μετακαολίνης αφορά το πορώδες, τη διαπερατότητα σε αέρα, την υδατοαπορροφητικότητα, τη διάχυση των χλωριόντων Cl και την αντοχή του σκυροδέματος. Η παρουσία μετακαολίνης επιδρά θετικά στο σκυρόδεμα, καθώς οδηγεί σε μείωση του πορώδους. Αυτή η μείωση συμβαίνει επειδή οι κόκκοι του μετακαολίνης

είναι μικρότεροι από τους κόκκους του τσιμέντου, με αποτέλεσμα να καλύπτουν τα ενδιάμεσα κενά. Επιπλέον, η προσθήκη μετακαολίνη βελτιώνει σημαντικά τις θλιπτικές αντοχές του σκυροδέματος. Από την άλλη πλευρά όμως, υπάρχει μείωση στην εργασιμότητα του σκυροδέματος συγκριτικά με ένα σκυρόδεμα που δεν περιέχει μετακαολίνη. Ωστόσο η εργασιμότητα είναι εύκολο να ρυθμιστεί με τη χρήση κατάλληλων ρευστοποιητών. Επομένως, η χρήση του μετακαολίνη συμβάλλει στην παραγωγή σκυροδέματος υψηλής απόδοσης (high performance concrete), εφόσον όλες οι ιδιότητες που διαμορφώνουν την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος, παρουσιάζουν αξιοσημείωτη βελτίωση. [14]

2.4 Εφαρμογές και χρήσεις

Αδιαμφισβήτητα, το τσιμέντο και το σκυρόδεμα σφράγισαν τον τρόπο και τη μορφή της δόμησης τον εικοστό αιώνα. Οι χρήσεις και οι εφαρμογές του τσιμέντου, ως αναπόσπαστο και βασικό συστατικό του σκυροδέματος, καθορίζονται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τη χρήση για την οποία προορίζεται το σκυρόδεμα.

Σήμερα, οι εξελίξεις στον τομέα του σκυροδέματος είναι ραγδαίες, ενώ μελλοντικά αναμένεται η περαιτέρω εξέλιξη και διεύρυνση των εφαρμογών του.

Ακολουθεί μια σύντομη αναφορά στις χρησιμοποιούμενες, αλλά και τις μελλοντικές εφαρμογές του σκυροδέματος στη χώρα μας. Παράλληλα με τις νέες εφαρμογές, θα αναφερθούν και εφαρμογές που, σε ορισμένες χώρες, χρησιμοποιούνται ήδη με επιτυχία, αλλά στην Ελλάδα δεν έχουν εφαρμοστεί ακόμη. [20]

Τρέχουσες Εφαρμογές

Σκυροδέματα υψηλής αντοχής ή υψηλής πρώιμης αντοχής : Στις μέρες μας, οι περισσότερες χώρες χρησιμοποιούν σκυρόδεμα με θλιπτική αντοχή 140 MPa, ενώ, για πιο απαιτητικές κατασκευές έχουν παρασκευαστεί και χρησιμοποιηθεί σκυροδέματα με πολύ υψηλότερη αντοχή. Τα σκυροδέματα αυτά χρησιμοποιούνται συνήθως σε ειδικά δημόσια έργα. Για παράδειγμα, για την επισκευή βλάβης σε σημεία όπου απαιτείται άμεση παράδοση στην



Εικόνα 2.14 Τοξωτή γέφυρα - Χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης σκυροδέματος υψηλής αντοχής

κυκλοφορία (6-12 ώρες), όπως οδοστρωμάτων ή αεροδρομίων, χρησιμοποιείται σκυρόδεμα με υψηλές απαιτήσεις και αντοχές στις πρώιμες ηλικίες. Το μειωμένο βάρος, η ταχύτητα της κατασκευής, η μειωμένη χρήση αδρανών και συνεπώς, η μειωμένη περιβαλλοντική

επιβάρυνση, είναι μόνο μερικά από τα πλεονεκτήματά του. Συνδυάζοντας αυτά τα πλεονεκτήματα με τη βελτιωμένη ανθεκτικότητα, το αποτέλεσμα είναι το μειωμένο τελικό κόστος.

Σκυρόδεμα υψηλής επιτελεστικότητας: Με τον όρο «επιτελεστικό» νοείται το σκυρόδεμα που «επιτελεί» πλήρως τον σκοπό για τον οποίο κατασκευάστηκε. Σήμερα, οι απαιτήσεις που υπάρχουν γύρω από το σκυρόδεμα έχουν μετατραπεί από «σκυρόδεμα υψηλών αντοχών» σε «σκυρόδεμα υψηλής ανθεκτικότητας και καλύτερης συμπεριφοράς στο χρόνο». Επομένως, το σκυρόδεμα υψηλής επιτελεστικότητας πρέπει να συνδυάζει υψηλή αντοχή και υψηλή ανθεκτικότητα σε διαβρωτικό περιβάλλον, καθώς και να διατηρεί τις ιδιότητες αυτές με την πάροδο του χρόνου. Ακόμη, ενδέχεται να περιλαμβάνει και άλλες πρόσθετες ιδιότητες.



Εικόνα 2.15 Καλωδιωτή γέφυρα - Χαρακτηριστικό παράδειγμα χρήσης σκυροδέματος υψηλής επιτελεστικότητας, λόγω εγγύτητας στην θάλασσα

Οι προσδοκίες της σύγχρονης κοινωνίας για τα δομικά έργα είναι σε πολλές περιπτώσεις ιδιαίτερα απαιτητικές. Ως παράδειγμα αναφέρονται οι απαιτήσεις στις πλατφόρμες άντλησης πετρελαίου της Β. Θάλασσας, οι οποίες πρέπει να είναι ανθεκτικές σε παγετό, σε χλωριόντα και σε κυματισμούς ύψους 31m. Οι μελλοντικές προβλέψεις δείχνουν ότι τα παραγόμενα σκυροδέματα θα τείνουν προς την κατηγορία των σκυροδεμάτων υψηλών απαιτήσεων, με σημαντική μείωση του λόγου νερό προς τσιμέντο ($N/T < 0.45$) και χρήση σύνθετου τσιμέντου με σημαντικά ποσοστά χημικών προσθέτων. [19,20]

Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα: Βασικό χαρακτηριστικό του αυτοσυμπυκνούμενου ή αυτοεπιπεδούμενου σκυροδέματος είναι η αυξημένη ρευστότητα, ιδιότητα η οποία διευκολύνει τη διάστρωση και συμπύκνωση του υλικού. Οι δύο αυτές εργασίες

πραγματοποιούνται

χωρίς

ανθρώπινη

παρέμβαση.

Με το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα εξασφαλίζεται η μη απόμιξη των υλικών, γεγονός που επιτυγχάνεται με την:

1. κατάλληλη επιλογή των αδρανών
2. την χρήση λεπτόκοκκων (μεγέθους παιπάλης) αδρανών υλικών
3. τη χρήση ειδικών χημικών προσθέτων

Το αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα έχει χαμηλό λόγο νερού/τσιμέντου και υψηλή ανθεκτικότητα. Συνιστάται για σύγχρονες κατασκευές με πυκνή διάταξη οπλισμού, όπως οι αντισεισμικές κατασκευές, αλλά και για σκυροδέτηση υπό πίεση, λόγω περιορισμένης πρόσβασης. [18]

Ο συγκεκριμένος τύπος σκυροδέματος, ξεκίνησε από την Ιαπωνία την περασμένη δεκαετία, αλλά σύντομα επεκτάθηκε σε όλο τον κόσμο. Πλέον, αλλάζει τα δεδομένα στον κατασκευαστικό τομέα, αφού συμβάλλει σε:

- ταχύτερη εφαρμογή
- μεγαλύτερες αποδόσεις
- μείωση του κόστους εφαρμογής
- βελτίωση των συνθηκών εργασίας
- μείωση των αβεβαιοτήτων και ενδεχόμενων αστοχιών εξοπλισμού κατά τη διάρκεια της σκυροδέτησης
- μείωση της περιβαλλοντικής όχλησης
- ειδικές εφαρμογές, όπως η ενίσχυση και επισκευή δομικών στοιχείων όπου απαιτείται σκυροδέτηση υπό πίεση

Ινοπλισμένο σκυρόδεμα: Είναι γνωστό πως το συμβατικό σκυρόδεμα δεν έχει μεγάλη αντοχή σε εφελκυσμό. Μια σημαντική βελτίωση αυτής της μηχανικής ιδιότητας του υλικού επιτυγχάνεται με την προσθήκη ινών στη μάζα του, πριν τη σκυροδέτηση, κατά την ανάμιξη. Αρχικά, χρησιμοποιήθηκαν ίνες από χάλυβα. Τα τελευταία χρόνια, όμως, διατίθενται και ίνες από πολυπροπυλένιο και σύνθετα πολυμερή, σε διάφορα σχήματα και μορφή, ώστε να

πραγματοποιείται η καλύτερη δυνατή αγκύρωση μέσα στη μάζα. Με τη χρήση ινών, η επίτευξη παραμόρφωσης πριν από τη θραύση και η αντίστοιχη καταναλισκόμενη ενέργεια αυξάνουν σημαντικά. Λόγω αυτών των ιδιοτήτων, επεκτείνεται το πεδίο χρήσεως του σκυροδέματος σε πλέον εξειδικευμένες χρήσεις, που απαιτούν αύξηση της πλαστικότητας. Πέρα από τη βελτιστοποίηση των μηχανικών ιδιοτήτων, η χρήση ινών πολυπροπυλενίου παρουσιάζει και ιδιαίτερη βελτίωση της συμπεριφοράς της επικάλυψης του σκυροδέματος σε υψηλές θερμοκρασίες (αποφυγή αποφλοιώσης).

Άλλες εφαρμογές του συγκεκριμένου τύπου τσιμέντου και σκυροδέματος εντοπίζονται στους παρακάτω τομείς ή περιστάσεις:

- Αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα μικρής αντοχής
- Λεπτοσκυροδέματα με αντιδρώσες κονίες
- Τσιμέντο και σκυρόδεμα στην οδοποιία και τις μεταφορές
- Σκυρόδεμα σε πυρκαγιά

Μελλοντικές Εφαρμογές

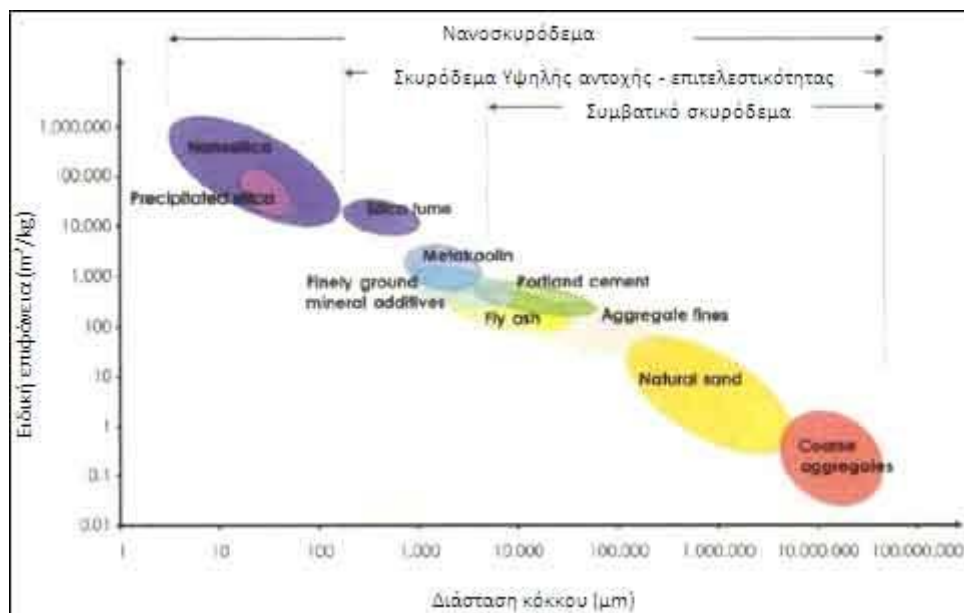
Αυτοσυντηρούμενο σκυρόδεμα: Η συντήρηση του σκυροδέματος είναι μία σημαντική και αναγκαία εργασία, η οποία μερικές φορές παραμελείτε, παρά το σοβαρό αντίκτυπο που έχει στην αντοχή και κυρίως στην ανθεκτικότητα του σκυροδέματος. Με αυτό ως κίνητρο, τα τελευταία χρόνια λαμβάνουν χώρα προσπάθειες παραγωγής "αυτοσυντηρούμενου" σκυροδέματος το οποίο δεν θα απαιτεί συντήρηση. Αυτό θα συμβαίνει είτε επειδή θα εμποδίζεται η εξάτμιση του περιεχόμενου νερού, είτε γιατί από μόνο του θα παρέχει στη μάζα του το επιπλέον νερό που χρειάζεται κατά την ενυδάτωση. Έχει σημειωθεί πρόοδος στις έρευνες και των δύο παραπάνω δυνατών τρόπων παραγωγής αυτοσυντηρούμενου σκυροδέματος και αναμένεται εφαρμογή του σε βιομηχανική κλίμακα σύντομα.

Μη συρρικνούμενο σκυρόδεμα: Η χρήση τσιμέντου, το οποίο, μετά την πήξη του, παρουσιάζει μικρή διόγκωση που αντισταθμίζει μέχρι ενός ορίου τη συστολή ξήρανσης, έχει ξεκινήσει να προσελκύει τις βιομηχανίες. Η χρήση τέτοιου είδους τσιμέντων για παραγωγή μη συρρικνούμενων σκυροδεμάτων είναι -προς το παρόν- περιορισμένη και επικεντρώνεται σε

επισκευαστικά σκυροδέματα. Λόγω των απαραίτητων για ορισμένες χρήσεις ιδιοτήτων του, η ζήτησή του στο μέλλον θα αυξηθεί αισθητά. [19,23]

Τσιμέντα υψηλής τεχνολογίας: Η τεχνολογική έρευνα στην παραγωγή του τσιμέντου είναι αδιάκοπη και καλύπτει ένα ευρύ φάσμα παραγόντων που περιλαμβάνουν μεταξύ των άλλων, αύξηση της αντοχής, μείωση της συστολής ξήρανσης με τη δημιουργία ελεγχόμενης διόγκωσης, αύξηση της ανθεκτικότητας σε χημικές προσβολές, μείωση των εκπομπών, αύξηση της απαιτούμενης ενέργειας κατά τη θραύση και συμπεριφορά κατά την έκθεση στο περιβάλλον.

Εφαρμογές της νανοτεχνολογίας στο σκυροδέμα: Η νανοτεχνολογία επιτρέπει τον έλεγχο και την παρέμβαση στα υλικά σε κλίμακα νανομέτρου, δηλαδή σε μοριακό επίπεδο.



Εικόνα 2.16 Διάσταση κόκκων υλικών σε μm

Η σχετική έρευνα βρίσκεται σε πρώιμο στάδιο και δεν είναι πλήρως εξελιγμένη. Τα αποτελέσματα που έχουν παρουσιαστεί μέχρι στιγμής είναι πολύ ενθαρρυντικά σε ότι αφορά τη βελτίωση μέρους ή όλων των ιδιοτήτων του σκυροδέματος:

- μηχανικές και ηλεκτροχημικές ιδιότητες (αντοχή, πλαστικότητα, ηλεκτρική αγωγιμότητα)
- ανθεκτικότητα του σκυροδέματος (υδατοπερατότητα)

- επιφανειακή προστασία των οπλισμών μέσω εφαρμογής επιφανειακών επιστρώσεων (νανοτροποποιημένος οπλισμός)
- τεχνολογία παραγωγής (εργασιμότητα)
- μακροχρόνια συντήρηση και παρακολούθηση (αυτοδιόρθωση μικρορωγμών, ικανότητα ανίχνευσης και εντοπισμού υγρασίας, θερμοκρασίας, τάσης)

Η αλματώδης ανάπτυξη της νανοτεχνολογίας έχει επηρεάσει πολλούς κλάδους και πτυχές της καθημερινότητας. Ως φυσικό επακόλουθο, επηρέασε και τον κλάδο των δομικών υλικών, συνεπώς και το παραγόμενο τσιμέντο και σκυρόδεμα. Υπάρχουν ήδη σε κυκλοφορία προϊόντα νανοτεχνολογίας για μείωση της υδατοπερατότητας του σκυροδέματος, μέσω της προσθήκης νανοϋλικών υπό μορφή διαλύματος. Αυτά τα προϊόντα αποβλέπουν σε δομικές και αρχιτεκτονικές εφαρμογές (τσιμεντόλιθοι, κυβόλιθοι, τσιμεντοκονιάματα), χάρη στα άμεσα βελτιωτικά αποτελέσματα της επιτελεστικότητας του υλικού σε βάθος χρόνου (σταθερότητα χρωματισμού, αποφυγή ανάπτυξης μυκήτων στις επιφάνειες, ανθεκτικότητα). [20]

3. Ο ΡΟΛΟΣ ΤΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ ΣΤΑ ΤΣΙΜΕΝΤΟΚΟΝΙΑΜΑΤΑ

3.1 Αδρανή υλικά

Ως αδρανή υλικά, αναφέρονται τα διαβαθμισμένα υλικά, ορυκτής ή βιομηχανικής προέλευσης, αλλά και υλικά ανακύκλωσης, τα οποία χρησιμοποιούνται χωρίς ή με κάποιο συγκολλητικό μέσο για την κατασκευή τεχνικών έργων. Τα υλικά αυτά είναι συνήθως ανόργανα και χαρακτηρίζονται ως αδρανή διότι τα περισσότερα δεν αντιδρούν χημικά με τις συνδετικές ύλες και το νερό.

Τα αδρανή υλικά συμβάλουν μηχανικά στην αντοχή του κονιάματος, καταλαμβάνοντας ένα μεγάλο τμήμα του συνολικού όγκου τους. Κατά συνέπεια, τα χαρακτηριστικά των αδρανών υλικών είναι άρρηκτα συνδεδεμένα με την απόδοση και τις ιδιότητες των παραγόμενων κονιαμάτων. [9]



Εικόνα 3.1 Αδρανή διάφορων μεγεθών

Στη θεωρία, ως αδρανές μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιοδήποτε υλικό, το οποίο έχει συγκεκριμένες ιδιότητες, όπως υψηλή αντοχή, επαρκή πρόσφυση και χημική ανεκτικότητα με την κονία. Τα συνήθη αδρανή υλικά είναι ασβεστολιθικά και πυριτικά.

Η άμμος είναι το συνηθέστερο αδρανές υλικό που χρησιμοποιείται στα κονιάματα. Δεν πρέπει να περιέχει προσμίξεις που

- ✓ να είναι πιθανό να προκαλέσουν μείωση της αντοχής και της σταθερότητας των κονιαμάτων,
- ✓ μπορούν να επηρεάσουν δυσμενώς άλλες ιδιότητες τους,
- ✓ είναι ικανές να προκαλέσουν επιβλαβείς χημικές αντιδράσεις με την εκάστοτε συνδετική ύλη.



Εικόνα 3.2 Σκόνη ασβεστολιθικής άμμου

Η προσθήκη αδρανών υλικών στα κονιάματα εφαρμόζεται για οικονομικούς και τεχνικούς λόγους. Τα κονιάματα που παράγονται χωρίς προσθήκη αδρανών, συστέλλονται κατά την πήξη και τη σκλήρυνση και, έτσι, δημιουργούνται επιφανειακές ρωγματώσεις. Τα αδρανή συμβάλλουν στην αποφυγή και τον περιορισμό των ρωγμών.

Επιπλέον, τα αδρανή υλικά πρέπει να ικανοποιούν ορισμένες απαιτήσεις για να χρησιμοποιηθούν στα κονιάματα και να μην περιέχουν προσμίξεις που μπορούν να επηρεάσουν το προϊόν σε κάποιο βαθμό, όπως αναφέρθηκε παραπάνω. Ένας καθοριστικός παράγοντας είναι και η υγρασία τους, η οποία δεν πρέπει να ξεπερνά το 3% και υπολογίζεται πάντα πριν τον καθορισμό των αναλογιών ενός κονιάματος. [16]

3.1.1 Κατάταξη αδρανών υλικών

Τα αδρανή υλικά κατατάσσονται ανάλογα με την προέλευση τους, το μέγεθος των κόκκων τους, το ειδικό τους βάρος, καθώς και ανάλογα με τη χρήση τους.

Προέλευση αδρανών

Ανάλογα με την προέλευση τους, τα αδρανή υλικά χωρίζονται σε τρεις κατηγορίες, στα φυσικά, τα τεχνητά και τα ανακυκλωμένα αδρανή.

- Φυσικής προέλευσης είναι τα αδρανή που έχουν ληφθεί από το φυσικό περιβάλλον. Αυτά τα υλικά δεν έχουν υποστεί τίποτε περισσότερο από μηχανική επεξεργασία θραύσης, πλυσίματος

και διαλογής (για παράδειγμα, θραυστά πετρώματα, αλλουβιακοί σχηματισμοί, ποταμίσιας λιμναίες ή θαλάσσιες αποθέσεις, αποθέσεις άμμων ή χαλικιών, λάβα, ηφαιστειακοί τόφοι, λατομικά προϊόντα και άλλα).

- Τεχνητά ή βιομηχανικά είναι τα αδρανή που έχουν προκύψει ως προϊόντα ή παραπροϊόντα βιομηχανικής δραστηριότητας από χημική ή θερμική επεξεργασία πρώτων υλών ορυκτής ή άλλης προέλευσης (παραδείγματος χάρη τέφρες, σκωρίες, υπολείμματα καύσεων, άργιλοι, βερμικουλίτης, περλίτης, υλικά στίλβωσης)
- Ανακυκλωμένα είναι τα αδρανή που δημιουργούνται από την επεξεργασία και επαναχρησιμοποίηση δομικών υλικών από υπάρχουσες κατασκευές (όπως υλικά κατεδαφίσεως σκυροδέματος, τοιχοποιίας, ασφαλικών έργων) [31]

Μέγεθος κόκκων αδρανών

Ανάλογα με το μέγεθος των κόκκων τους και σύμφωνα με τους Ευρωπαϊκούς Κανονισμούς Αδρανών Υλικών, τα αδρανή υλικά χωρίζονται στις παρακάτω κατηγορίες:

- Λεπτόκοκκα είναι τα αδρανή με μέγιστο μέγεθος κόκκου 4 mm (διάφορα είδη άμμων)
- Χονδρόκοκκα είναι τα αδρανή με ελάχιστο μέγεθος κόκκου 4 mm (ογκόλιθοι, κροκάλες, έρμα, χαλίκι, γαρμπίλι, ρυζάκι)
- Παιπάλη ή Filler είναι το λεπτομερές αδρανές υλικό με μέγιστο μέγεθος κόκκου 2 mm, το οποίο διέρχεται σε ποσοστό 70-100% από το κόσκινο 0,063 mm. Προστιθέμενο σε δομικά υλικά προσδίδει συγκεκριμένες ιδιότητες.

Ειδικό βάρος αδρανών

Με βάση το ειδικό τους βάρος τα αδρανή υλικά, διακρίνονται σε κανονικού ειδικού βάρους, ελαφροβαρή και βαρέα.

- Κανονικού ειδικού βάρους είναι τα αδρανή υλικά με ειδικό βάρος περίπου 3 mg/m³. Αυτά είναι τα συνήθη χρησιμοποιούμενα αδρανή υλικά για τεχνικά έργα (ασφαλτικά, οδόστρωση, παραγωγή σκυροδέματος, κονιαμάτων).

- Ελαφροβαρή είναι τα αδρανή υλικά με ειδικό βάρος μικρότερο από 2 mg/m^3 . Χρησιμοποιούνται κυρίως για ελαφροβαρή θερμομονωτικά σκυροδέματα ή κονιάματα.
- Βαρέα είναι τα αδρανή υλικά με ειδικό βάρος πάνω από 3 mg/m^3 . Αυτά τα αδρανή χρησιμοποιούνται σε ειδικές κατασκευές (παραδείγματος χάρη κατασκευές από σκυρόδεμα για προστασία από την ακτινοβολία και άλλες) [32]

3.1.2 Οι ιδιότητες των αδρανών υλικών

Η ποιότητα των αδρανών υλικών, αλλά και των τελικών προϊόντων εξαρτώνται από τις ιδιότητες των πρώτων. Τέτοιες ιδιότητες είναι η αντοχή των αδρανών, η καθαρότητά τους, η κοκκομετρική διαβάθμιση, το σχήμα των κόκκων τους και η χημική συμπεριφορά τους με άλλα συστατικά του κονιάματος (πχ θαλασσινό νερό, καυσαέριο).

Αντοχή

Η αντοχή των αδρανών υλικών σχετίζεται με την αντοχή του μητρικού πετρώματος. Ανάλογα με τη χρήση για την οποία προορίζονται τα υπό κατασκευή κονιάματα, ελέγχεται και η κατάλληλη μηχανική αντοχή (σε θλίψη, σε τριβές, σε κρούση κλπ.).

Καθαρότητα

Η καθαρότητα των αδρανών αφορά το ποσοστό παρουσίας επιβλαβών συστατικών. Αυτά τα συστατικά εμποδίζουν την ομαλή εξέλιξη της στερεοποίησης του κονιάματος, προκαλούν τοπικές αποκολλήσεις, αποφλοιώσεις ή άλλων ειδών ρωγματώσεις και δεν επιτρέπουν την πρόσφυση με την κονία.

Κοκκομετρική διαβάθμιση

Η κοκκομετρική διαβάθμιση εκφράζει το διαχωρισμό και την κατάταξη των κόκκων του αδρανούς σε ομάδες. Η ταξινόμηση δεν γίνεται από την άποψη του μεγέθους των κόκκων, αλλά του ποσοστού της κάθε κατηγορίας μεγέθους κόκκων που περιέχεται στη συνολική ποσότητα του εκάστοτε αδρανούς.








Η κοκκομετρική διαβάθμιση προκύπτει από τα επί μέρους ποσοστά του υλικού που περνάει από κάθε κόσκινο.

Το δύσκολο μέρος είναι η επιλογή του καταλληλότερου συνδυασμού μεγέθους κόκκων για κάθε περίπτωση, από άποψη ιδιοτήτων του παραγόμενου κονιάματος.

Η κοκκομετρία των αδρανών αποτελεί σημαντικό παράγοντα για τον καθορισμό της αντοχής ενός μίγματος. Σε κάποιες περιπτώσεις, όμως, η αντοχή του κονιάματος βελτιώνεται με την ύπαρξη κενών. Αυτό σημαίνει ότι ένα εντελώς συμπαγές κονίαμα δεν είναι πάντα κατάλληλο. Γενικά, ένα αδρανές υλικό με καλή κοκκομετρική διαβάθμιση αποτελεί σημαντικό παράγοντα για ένα κονίαμα με καλές ιδιότητες και υψηλές αντοχές. [9,31]

Σχήμα και μέγεθος κόκκων

Το σχήμα των σωματιδίων και η υφή της επιφάνειάς τους είναι εύκολο να παρατηρηθούν, όταν πρόκειται για χονδρόκοκκα αδρανή, ενώ το αντίθετο συμβαίνει με τα λεπτόκοκκα σωματίδια, η παρατήρηση των οποίων επιτυγχάνεται με τη βοήθεια μικροσκοπίου. Οι κόκκοι των αδρανών δεν έχουν κανονική γεωμετρική υφή κατατάσσονται στις ακόλουθες γεωμετρικές κατηγορίες: στρογγυλοί, κυβοειδείς, γωνιώδεις, πλακοειδείς και επιμήκεις. Το σχήμα των μη σφαιρικών σωματιδίων που δεν ανήκουν σε κάποια από τις παραπάνω κατηγορίες, προσδιορίζεται ανάλογα με το μήκος και το πλάτος του.

Term	Shape
Cylindrical	
Discoidal	
Spherical	
Tabular	
Ellipsoidal	
Equant	
Irregular	

Εικόνα 3.3 Σχήμα κόκκων διάφορων αδρανών

Το σχήμα και η μορφή των κόκκων επηρεάζουν ιδιότητες του κονιάματος, όπως την εργασιμότητα, την αντοχή και την κατακράτηση νερού. [16]

3.2 Κονιάματα

Η λέξη «κονίαμα» προέρχεται από τη λατινική λέξη «mortarium», η οποία χρησιμοποιούταν από τους Ρωμαίους χτίστες για το μίγμα της ασβέστου με την άμμο. Σήμερα, ο όρος κονίαμα αναφέρεται σε μίγμα μίας ή περισσότερων συνδετικών υλών, νερού, λεπτόκοκκων αδρανών (μέχρι 4mm) και ενδεχομένως ειδικών προσθέτων. Τα υλικά αυτά έχουν καλή ρευστότητα και

πλαστιμότητα όταν είναι νωπά, ενώ μετά την πήξη και τη σκλήρυνση της συνδετικής ύλης αποκτούν μηχανική αντοχή και άλλες φυσικοχημικές ιδιότητες. Οι ιδιότητες των κονιαμάτων εξαρτώνται από το είδος και τις αναλογίες των πρώτων υλών, τον τρόπο ανάμιξης και μορφοποίησης, καθώς και από τις συνθήκες που επικρατούν κατά την διάρκεια της σκλήρυνσης.

Για να θεωρηθεί ένα κονίαμα κατάλληλο πρέπει να έχει τα ακόλουθα χαρακτηριστικά:

1. Να είναι πλάστιμο και εργάσιμο. Εργάσιμο ονομάζεται ένα κονίαμα, το σχήμα του οποίου, μπορεί να διαμορφωθεί ανάλογα με την πρόθεση του χειριστή του. Όταν είναι πλάστιμο και εργάσιμο, δε διασπάται η μάζα του κατά τους διάφορους χειρισμούς. Η εργασιμότητα επηρεάζεται κυρίως από την ρευστότητα, την πλαστιμότητα, καθώς και από την ικανότητα του νωπού κονιάματος να διατηρεί την ομοιογένειά του παρά τους εξωτερικούς παράγοντες.
2. Να έχει σταθερότητα, να μην υπόκειται δηλαδή σε μεγάλες συστολές και διαστολές, προκαλώντας ρωγμές.
3. Να παρουσιάζει υψηλή μηχανική αντοχή ώστε να αντέχει το βάρος των φορτίων που θα φέρει.
4. Να μην προσβάλλεται από το νερό και τις ατμοσφαιρικές συνθήκες. [10,31]

3.2.1 Η χρησιμότητα των τσιμεντοκονιαμάτων

Τα κονιάματα τσιμέντου πρωτοεμφανίστηκαν μετά τα μισά του 18ου αιώνα. Ως τσιμεντοκονίαμα, ορίζεται το μίγμα άμμου, τσιμέντου και νερού. Ο σύγχρονος τύπος τσιμεντοκονιάματος, έχει χαμηλό σχετικά πορώδες, ανθεκτικότητα στη φθορά και υψηλή αντοχή.



Εικόνα 3.4 Κονίαμα τσιμέντου

Η αναλογία τσιμέντου προς άμμο εξαρτάται άμεσα από τον προορισμό του τσιμεντοκονιάματος. Διαφορετικές αναλογίες ισχύουν για τσιμεντοκονίαμα που προορίζεται για επιστρώσεις δαπέδων, διαφορετικές για στεγανές επικαλύψεις και διαφορετικές για την παρασκευή σκυροδεμάτων. Οι αναλογίες που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή τσιμεντοκονιαμάτων, καθώς και οι χρήσεις τους φαίνονται στον πίνακα 3.2 παρακάτω.

Το τσιμεντοκονίαμα παρουσιάζει υδραυλικές ιδιότητες, μεγάλη ικανότητα προσφύσεως, καθώς και υψηλή μηχανική αντοχή. Επιπλέον, το κόστος παρασκευής του είναι χαμηλό, δίνοντας οικονομικές κατασκευές. Για τους παραπάνω λόγους, οι κονίες τσιμέντου έγιναν από τα σημαντικότερα δομικά υλικά της σύγχρονης εποχής.

Η μηχανική αντοχή και η στεγανότητα των τσιμεντοκονιαμάτων, εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, οι κυριότεροι από τους οποίους είναι :

- Ο λόγος κονιάς προς αδρανή (K/A). Μεγαλύτερη αναλογία τσιμέντου προς άμμο δίνει συνήθως ανθεκτικότερα και στεγανότερα κονιάματα.
- Η χημική σύσταση των αδρανών υλικών που χρησιμοποιούνται (ασβεστολιθικά, πυριτικά) καθώς και από το σχήμα των αδρανών υλικών (γωνιώδη, στρογγυλά). Τα τσιμεντοκονιάματα με ασβεστολιθικά αδρανή παρουσιάζουν μεγαλύτερη αντοχή έναντι των πυριτικών, αλλά και μεγαλύτερη αβεβαιότητα όσον αφορά τη μέση τιμή αντοχής για διαφορετικές μετρήσεις ίδιων συνθέσεων.
- Ο λόγος ενυδάτωσης (N/T). Το πολύ νερό ελαττώνει την αντοχή και την στεγανότητα του κονιάματος, όπως συμβαίνει και στην αντίθετη περίπτωση παρουσίας νερού σε μικρότερη ποσότητα από την επιθυμητή. [3]

Οι τσιμεντοκονίες βρίσκουν εφαρμογή σε επικαλύψεις δομικών στοιχείων, προσδίδοντάς τους ανθεκτικότητα στους περιβαλλοντικούς παράγοντες. Επίσης, χρησιμοποιούνται ως πρώτη ύλη για την κατασκευή διάφορων τεχνητών υλικών, όπως τσιμεντόλιθοι και τσιμεντοσωλήνες. Ενώ παράλληλα χρησιμοποιούνται ως επιχρίσματα τοίχων και οροφών, επιστρώσεις δαπέδων και στεγανές επικαλύψεις δεξαμενών. Στον παρακάτω πίνακα, παρουσιάζονται οι χρήσεις των κονιών τσιμέντου, ανάλογα με την αντοχή που παρουσιάζουν.

Πίνακας 3.1 Χρήση τσιμεντοκονιαμάτων ανάλογα με την αντοχή τους

Αντοχή τσιμεντοκονιαμάτων	χρήσεις
90 MPa	Παρασκευή προκατασκευασμένων στοιχείων με ισχυρή συμπίκνωση ή φυγοκέντρωση (σωλήνες), Επιχρίσματα μέσα σε νερό
70 MPa	Αρμολογήματα
60 MPa	Υγρά θεμέλια, Κατασκευή επιχρισμάτων, Λιμενικά έργα
45 MPa	Κατασκευή θόλων και άλλων στοιχείων, που φορτίζονται ισχυρά
35 MPa	Γενικές χρήσεις σε όλα τα στοιχεία των κατασκευών

Πίνακας 3.2 Χρήση τσιμεντοκονιαμάτων με βάση την αναλογία Κ/Α

Κονία προς αδρανή (Κ/Α)	Είδος κονιαμάτων	χρήσεις
1/1.5 έως 1/2.5	Παχιά	Για στεγανά επιχρίσματα και επιστρώσεις
1/2 έως 1/3	Κανονικά	Για εξωτερικά επιχρίσματα
1/3 έως 1/4	Ισχνά	Για κτίσιμο θεμελίων από πέτρες σε υγρό περιβάλλον

Για την βελτίωση των ιδιοτήτων των κονιαμάτων τσιμέντου δύναται να προστεθούν πρόσθετα. Για την αύξηση της ελαστικότητας και πλαστικότητας των τσιμεντοκονιαμάτων συνίσταται η προσθήκη μικρής ποσότητας πολτού ασβέστου 0.04 έως 0.06 m³ ανά κυβικό μέτρο κονιάματος ή εναλλακτικά σκόνη υδράσβεστου περί το 10-15% του βάρους του τσιμέντου. Ενώ για την αύξηση της στεγανότητας δύναται να προστεθεί κατά την παρασκευή του κονιάματος θηραϊκή γη ή σκωρία υψικαμίνου . [36]

3.2.2 Ο ρόλος του νερού στα κονιάματα

Το νερό αποτελεί το τρίτο συστατικό των κονιαμάτων, μετά τα αδρανή και το τσιμέντο. Παράλληλα, εμπλέκεται σε μια σειρά χημικών αντιδράσεων, οι οποίες, μέσω της δημιουργίας ένυδρων κρυστάλλων, οδηγούν στην πήξη και σκλήρυνση του μείγματος. Για τον λόγο αυτό,

το νερό πρέπει να είναι τόσο καθαρό, ώστε να μην περιέχει συστατικά που μπορεί να επηρεάσουν τις χημικές αντιδράσεις.

Το νερό στα κονιάματα διαδραματίζει διπλό ρόλο. Το μεγαλύτερο μέρος του χρησιμοποιείται κατά τη διαδικασία της ανάμειξης του τσιμέντου με τα υπόλοιπα υλικά και καταναλώνεται στις χημικές αντιδράσεις που πραγματοποιούνται κατά την πήξη της κονιάς. Το υπόλοιπο χρησιμοποιείται στη διαβροχή των κόκκων των αδρανών και στη βελτίωση της πλαστιμότητας και εργασιμότητας του κονιάματος. Αυτό το μέρος επιδρά στις ιδιότητες του κονιάματος. Μικρή ποσότητα νερού δημιουργεί κονίαμα στεγανό και δύσκολο στην κατεργασία, αλλά με αυξημένες μηχανικές αντοχές και υψηλή στεγανότητα. Αντιθέτως, μεγάλη ποσότητα νερού δημιουργεί πλάστιμο ως υδαρές και εύκολο στην επεξεργασία υλικό, αλλά, ταυτόχρονα, μειώνεται η αντοχή του και η στεγανότητά του. Επομένως, ο υπολογισμός της κατάλληλης ποσότητας νερού είναι απαραίτητος για να προσδώσει στο κονίαμα την απαιτούμενη πλαστιμότητα, εργασιμότητα και ικανοποιητικώς επαρκή θλιπτική αντοχή.

Γενικά, αν η ποσότητα νερού δεν είναι επαρκής, δεν επιτυγχάνεται πλήρης σύνδεση των αδρανών του κονιάματος. Ενώ, όταν η ποσότητα του νερού είναι μεγαλύτερη από την απαιτούμενη, δεν απορροφάται πλήρως από την κονία και τα αδρανή. Το αρνητικό από την παραμονή ελεύθερου νερού είναι ότι, μετά την εξάτμισή του, δημιουργούνται πόροι και κοιλότητες, μειώνοντας, έτσι, τη συνοχή και τις αντοχές του κονιάματος. [7,31]

Λόγος νερού/τσιμέντου

Ο λόγος νερού προς τσιμέντο (N/T), δηλαδή ο λόγος μάζας νερού προς μάζα ξηρού τσιμέντου ή λόγος ενυδάτωσης, είναι η κυριότερη παράμετρος που καθορίζει τις ιδιότητες του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού. Αποτελεί σημαντικό εργαλείο στον υπολογισμό της κατάλληλης ποσότητας νερού που πρόκειται να χρησιμοποιηθεί.

- Σύμφωνα με την θεωρία, ένας λόγος ενυδάτωσης ίσος με 0,23 είναι απαραίτητος για πλήρη ενυδάτωση των συστατικών του κλίνκερ, αλλά αυτό δεν είναι αρκετό.
- Η γέλη C-S-H περιέχει περιοχές πληρωμένες με νερό, οι οποίες ονομάζονται «διαστρωματικοί χώροι» (interlayer spaces) ή «πόροι γέλης» (gel pores). Η μάζα της γέλης C-S-H συγκρατείται με δυνάμεις Van der Waals και δεσμούς υδρογόνου, λόγω της πολικότητας του νερού. Ο συνολικός όγκος του νερού στους «πόρους γέλης»

ανέρχεται σε περίπου $N/T=0,19$. Επομένως, προκύπτει ένας θεωρητικός συνολικός λόγος ενυδάτωσης, ίσος με 0,42 .

- Στην πράξη, όταν δεν χρησιμοποιούνται πρόσθετα, όπως ρευστοποιητές, απαιτείται αυξημένη ποσότητα νερού, έτσι ώστε ο λόγος N/T να είναι τουλάχιστον 0,50. Όμως, οι σύγχρονες απαιτήσεις ανθεκτικότητας του σκυροδέματος οδηγούν σε μικρότερους λόγους ενυδάτωσης. [34]

3.3 Χρήση πρόσμικτων κατά την παρασκευή τσιμεντοκονιμάτων

Τα πρόσμικτα κονιαμάτων τσιμέντου-σκυροδέματος αποτελούν έναν τομέα υψηλού ενδιαφέροντος για τους μηχανικούς.

Η γνώση τους, σε συνδυασμό με τη σωστή και ορθολογική του χρήση μπορεί να δώσει τις δέουσες λύσεις σε προβλήματα παρασκευής, κατεργασίας, σύνθεσης κι συντήρησης του κονιάματος ή σκυροδέματος αντίστοιχα.

Τα πρόσμικτα είναι ουσίες σε υγρή μορφή ή σκόνη, οι οποίες προστίθενται στο κονίαμα σε μικρές ποσότητες κατά τη φάση ανάμιξης, συνήθως βάσει του περιεχόμενου τσιμέντου, επηρεάζοντας τις ιδιότητες του κονιάματος-σκυροδέματος με χημικό ή και με φυσικό τρόπο. Τα τελευταία χρόνια βρισκόμαστε εμπρός θεαματικών εξελίξεων σε αυτόν τον τομέα και η εξήγηση είναι η βελτίωση των χαρακτηριστικών που προσφέρουν τα πρόσμικτα τόσο σε νωπό , όσο και σε σκληρυμένο κονίαμα. Χαρακτηριστικά όπως βελτίωση της εργασιμότητας, της πρόσφυσης, της στεγανότητας και της ανθεκτικότητας μεταξύ άλλων, παρουσιάζουν σημαντικές βελτιώσεις υπό τη χρήση πρόσμικτων.

Σύμφωνα με το Πρότυπο EN 206-1, οι ορισμοί και οι χρήσεις των προσμίκτων σκυροδέματος καθορίζονται από το Πρότυπο EN 934-2. [21]

▪ Μειωτής νερού

Καθιστά δυνατή τη μείωση του περιεχόμενου νερού σε ένα μείγμα χωρίς επίδραση στη συνεκτικότητά του, ή αυξάνει το εργάσιμό του χωρίς αλλαγή του περιεχόμενου νερού, ή επιτυγχάνει και τα δύο αποτελέσματα. Χρησιμοποιείται για την παρασκευή σκυροδέματος

υψηλών αντοχών για την κατασκευή γεφυρών, σηράγγων και άλλων κατασκευών μεγάλης εμβέλειας. [24]

- **Υπερρευστοποιητής**

Προστίθεται στο έτοιμο σκυρόδεμα ρευστοποιώντας το, χωρίς να απαιτείται επιπλέον νερό και άρα χωρίς να μειώνονται οι αντοχές του. Παράλληλα δρουν ενάντια στην απόμιξη των συστατικών του σκυροδέματος και βελτιώνουν σημαντικά την εργασιμότητα και την αντλησιμότητά του. Χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις σκυροδέτησης σε υψηλές θερμοκρασίες, καθώς και για μεταφορά σκυροδέματος σε μεγάλες αποστάσεις. [25]

- **Ρυθμιστής Ιξώδους**

Λόγω της προσαρμοστικότητας του, ανάλογα με τη σύνθεση του σκυροδέματος, ρυθμίζει το ιξώδες του μίγματος με τρόπο τέτοιο, ώστε να επιτυγχάνονται φανερά αντικρουόμενες ιδιότητες, όπως υψηλή ρευστότητα, μεγάλη ταχύτητα ροής και αντίσταση σε διαχωρισμό. Η ισορροπία μεταξύ των ιδιοτήτων αυτών δεν μπορεί να επιτευχθεί αν η ρευστότητα του σκυροδέματος πραγματοποιηθεί με την προσθήκη νερού. Η χρήση του είναι ιδανική στο αυτοσυμπυκνούμενο σκυρόδεμα, σε περιπτώσεις δύσκολων διατομών, προκατασκευασμένων δομικών στοιχείων και στοιχείων με αυξημένη ποσότητα οπλισμού. [26]

- **Αερακτικό**

Εισάγει συγκεκριμένη ποσότητα αέρα στο μείγμα με τη μορφή μικρών και ομοιόμορφα κατανεμημένων φυσαλίδων αέρα κατά τη φάση ανάμιξης και οι οποίες παραμένουν στη σκληρυμένη μάζα σκυροδέματος. Χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις σκυροδέματος που εκτίθεται σε κύκλους ψύξης-απόψυξης, φράγματα, λιμενικά έργα καθώς και διαδρόμους προσγείωσης/απογείωσης αεροδρομίων. [25]

- **Επιταχυντής πήξης**

Μειώνει το χρόνο που απαιτείται για την αρχική πήξη, αυξάνοντας τις πρώιμες αντοχές. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές, όπου απαιτείται ταχύτητα εργασιών, όπως επισκευές ή αγκυρώσεις. [24]

- **Επιταχυντής σκλήρυνσης**

Επιταχύνει τις πρώιμες αντοχές με ή χωρίς επίδραση στο χρόνο πήξης. Χρησιμοποιείται ευρέως σε προεντεταμένο σκυρόδεμα, καθώς και σε σκυροδέτηση σε θερμοκρασίες περιβάλλοντος έως και -10° C. [25]

- **Επιβραδυντής**

Επιβραδύνει το χρόνο για την αρχική πήξη και επιμηκύνει την εργασιμότητα. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές σκυροδέτησης, όπου απαιτείται η μεταφορά έτοιμου σκυροδέματος σε μεγάλες αποστάσεις, καθώς και σε περιπτώσεις σκυροδέτησης υπό υψηλές θερμοκρασίες. [24]

- **Στεγανωτικό μάζας**

Μειώνει την απορρόφηση νερού από τους τριχοειδείς πόρους του σκληρυμένου σκυροδέματος. Χρησιμοποιείται κατά την στεγάνωση των κατασκευών υπό σκυρόδεμα, που βρίσκονται υπό συνεχή ή παροδική καταπόνηση από το νερό. Η στεγάνωση απαιτείται να γίνει τόσο στο περίβλημα των δομικών στοιχείων, όσο και στην μάζα των κατασκευών. [24]

Παράλληλα, συχνή είναι η χρήση πρόσμικτων στα κονιαμάτα, που συνδυάζουν πάνω από μια ιδιότητες που προαναφέρθηκαν. Τέτοια προϊόντα αποτελούν οι συνδυασμοί επιβραδυντή/μειωτή νερού, επιβραδυντή/υπερρευστοποιητή και επιταχυντή/μειωτή νερού.

4. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

4.1 Πρώτες ύλες

Η χρήση μετακαολίνη υψηλής καθαρότητας ως πρόσθετο σε πάστες, τσιμεντοκονιάματα και σκυροδέματα προσφέρει αποδεδειγμένα πλεονεκτήματα, τα οποία αναλύονται σε προηγούμενο κεφάλαιο. Το αρκετά υψηλότερο κόστος, όμως, του μετακαολίνη υψηλής καθαρότητας δυσχεραίνει αρκετές φορές τη χρησιμοποίησή του. Αντίθετα, το κόστος του μετακαολίνη χαμηλής καθαρότητας δύναται να είναι μέχρι και 7 φορές μικρότερο, καθιστώντας τον με αυτόν τον τρόπο αρκετά πιο προσιτό.

Στα πλαίσια του πειραματικού μέρους της διπλωματικής αυτής εργασίας, πραγματοποιείται διερεύνηση σχετικά με την επίδραση της χρήσης μετακαολίνη στις μηχανικές αντοχές παστών και τσιμεντοκονιαμάτων, καθώς μέρος της ποσότητας του τσιμέντου αντικαθίσταται από μετακαολίνη χαμηλής καθαρότητας. Για το χαρακτηρισμό του μετακαολίνη διεξάγονται μετρήσεις περιθλασιμετρίας ακτίνων X (XRD), κοκκομετρικής ανάλυσης και Chapelle.

Τα πειράματα που υλοποιήθηκαν μπορούν να χωριστούν σε 2 σειρές συνθέσεων. Στην πρώτη πειραματική σειρά έγινε χρήση μετακαολίνη που παράχθηκε με έψηση καολίνη, ενώ στη δεύτερη σειρά πειραμάτων χρησιμοποιήθηκε μετακαολίνης που παράχθηκε από έψηση και λειοτρίβηση καολίνη (προηγήθηκε η έψηση της άλεσης). Οι συνθήκες έψησης του καολίνη ήταν 8 ώρες στους 800°C, ενώ οι συνθήκες άλεσης ήταν 200 στροφές ανά λεπτό (rpm) για 7 ώρες.

Επιπρόσθετα, σαν πρώτη ύλη χρησιμοποιήθηκε σύνθετο τσιμέντο Portland, υψηλής αντοχής 42,5 MPa (τυπική αντοχή 28 ημερών) και κανονικής ανάπτυξης αντοχών όσον αφορά το χρόνο. Συγκεκριμένα, ο τύπος τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκε κατά την παρασκευή των δειγμάτων ήταν CEM II / A-M – (P-LL) 42,5N.

Στην περίπτωση των κονιαμάτων, η άμμος που προστέθηκε ήταν αποκλειστικά πυριτική κοκκομετρίας 1 mm-2mm.

Για τις συνθέσεις χρησιμοποιήθηκε επίσης νερό βρύσης.

Παρακάτω, ακολουθεί αναλυτική περιγραφή του πειραματικού σχεδιασμού, της διαδικασίας και της μεθοδολογίας που εφαρμόστηκε για την παρασκευή των δειγμάτων, καθώς και η

περιγραφή και τα αποτελέσματα των χαρακτηρισμών που πραγματοποιήθηκαν τόσο σε επίπεδο υλικών, όσο και σε επίπεδο προϊόντος.

4.2 Πειραματικός σχεδιασμός και παραγωγική διαδικασία συνθέσεων

Στο πειραματικό μέρος της διπλωματικής αυτής εργασίας πραγματοποιήθηκε η παραγωγή 39 συνολικά συνθέσεων.

Πιο συγκεκριμένα παρήχθησαν τρία δοκίμια αναφοράς (REF), μια πάστα (CEM) αποτελούμενη αποκλειστικά από νερό και τσιμέντο και δύο κονιάματα (MOR) αποτελούμενα από νερό, τσιμέντο και προσθήκη άμμου σε αναλογία άμμου προς τσιμέντου κατά βάρος δύο προς ένα (2/1) και τρία προς ένα (3/1).

Ακολούθησε η παραγωγή 18 συνθέσεων με προσθήκη ψημένου καολίνης σε ποσοστά από 2,5% έως 15% κατά βάρος τσιμέντου με βήμα 2,5% κάθε φορά. Αναλυτικά, παρασκευάστηκαν 6 πάστες τσιμέντου, 6 κονιάματα με αναλογία άμμου προς τσιμέντο 2/1 και 6 κονιάματα με αναλογία άμμου προς τσιμέντο 3/1. Ακολούθως και αντιστοίχως, υλοποιήθηκαν 18 συνθέσεις με προσθήκη ψημένου και αλεσμένου καολίνης.

Ο λόγος νερού προς τσιμέντο, N/T (λόγος ενυδάτωσης), που εφαρμόστηκε ήταν για όλες τις συνθέσεις 0,45 (gr/gr).



Εικόνα 4.1 Καλούπι δοκιμών

Στον πίνακα 4.1 παρουσιάζονται οι ποσότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν ανά σύνθεση. Στην ονοματολογία των δειγμάτων ο όρος 0,45 αναφέρεται στο λόγο ενυδάτωσης, ενώ ο όρος CEM δείχνει ότι παράχθηκε πάστα, ο όρος MOR δείχνει ότι παράχθηκε κονίαμα και ο όρος MK καταδεικνύει τη χρήση μετακαολίνη σε ποσοστό ίσο με τον αναγραφόμενο αριθμό δίπλα από τον όρο MK.

Πίνακας 4.1 Ποσότητες υλικών ανά σύνθεση

Ονομασία Σύνθεσης	Νερό (ml)	Τσιμέντο (g)	Άμμος (g)	Μετακαολίνης (g)
REF - 0.45CEM	450	1000	0	0
REF - 0,45MOR(2/1)	450	1000	2000	0
REF - 0.45MOR(3/1)	450	1000	3000	0
0.45CEM - MK 2.5%	450	975	0	25
0.45CEM - MK 5%	450	950	0	50
0.45CEM - MK 7.5%	450	925	0	75
0.45CEM - MK 10%	450	900	0	100
0.45CEM - MK 12.5%	450	875	0	125
0.45CEM - MK 15%	450	850	0	150
0.45MOR(2/1) - MK 2.5%	450	975	2000	25
0.45MOR(2/1) - MK 5%	450	950	2000	50
0.45MOR(2/1) - MK 7.5%	450	925	2000	75
0.45MOR(2/1) - MK 10%	450	900	2000	100
0.45MOR(2/1) - MK 12.5%	450	875	2000	125
0.45MOR(2/1) - MK 15%	450	850	2000	150
0.45MOR(3/1) - MK 2.5%	450	975	3000	25
0.45MOR(3/1) - MK 5%	450	950	3000	50
0.45MOR(3/1) - MK 7.5%	450	925	3000	75
0.45MOR(3/1) - MK 10%	450	900	3000	100
0.45MOR(3/1) - MK 12.5%	450	875	3000	125
0.45MOR(3/1) - MK 15%	450	850	3000	150

Για κάθε μία σύνθεση παρασκευάστηκαν τρία κυβικά δοκίμια διαστάσεων (50x50x50)mm, τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής.

Για την παρασκευή των παστών αναμίχθηκαν οι κατάλληλες ποσότητες νερού μαζί με το τσιμέντο Portland, στη σκόνη του οποίου είχε νωρίτερα προστεθεί και αναμιχθεί το αντίστοιχο ποσοστό μετακαολίνη που αντιστοιχούσε σε κάθε σύνθεση.

Στην περίπτωση των κονιαμάτων, η άμμος προστίθεται στο μίγμα σε 2 ισόποσες δόσεις και αφού το νερό έχει αναμιχθεί με το τσιμέντο και τον μετακαολίνη, ώστε να αναμιχθεί σταδιακά προς την τελική δημιουργία των κονιαμάτων.

Τα δοκίμια μετά την παραγωγή τους παρέμειναν για 24 ώρες σε περιβάλλον υγρασίας και έπειτα ξεκαλουπώθηκαν και συντηρήθηκαν για 7 μέρες μέσα στο νερό και τις υπόλοιπες ημέρες μέχρι τη μέτρηση των θλιπτικών τους αντοχών, συντηρήθηκαν σε συνθήκες περιβάλλοντος.



Εικόνα 4.2 Συντήρηση δοκιμίων σε περιβάλλον υγρασίας (1ο 24ωρο μετά την παραγωγή τους)



Εικόνα 4.3 Συντήρηση δοκιμίων μέσα στο νερό για 7 μέρες

4.3 Χαρακτηρισμοί υλικών

4.3.1 Περιθλασιμετρία Ακτίνων X (XRD)

Μια από τις πιο κλασικές μεθόδους ανάλυσης για τη μελέτη της κρυσταλλικής δομής ενός ορυκτού ή/ και τον προσδιορισμό των κύριων ορυκτών φάσεων ενός πετρώματος είναι η ανάλυση δειγμάτων με περιθλασιμετρία ακτίνων X. Αν και χρησιμοποιείται για ποιοτική και ποσοτική ανάλυση, η συγκεκριμένη μέθοδος δεν ενδείκνυται για τον προσδιορισμό φάσεων που συμμετέχουν σε μικρό ποσοστό. Στην παρούσα διπλωματική, πραγματοποιήθηκε ανάλυση XRD στον καολίνη Ε πριν και μετά την έψηση του προς δημιουργία μετακαολίνη.

Περίθλαση ορίζεται το κυματικό φαινόμενο, κατά το οποίο παρατηρείται μια φαινομενική κάμψη και διάδοση σε νέα διεύθυνση των κυμάτων, όταν αυτά συναντούν ή διέρχονται από ένα αντικείμενο.

Οι ακτίνες X που χρησιμοποιούνται για την ανάλυση δειγμάτων έχουν μήκος κύματος σε εύρος από 0,5 ως 2,5 Å (1 Å= 0,1 nm).

Για την παραγωγή ακτίνων X απαιτείται μία πηγή ηλεκτρονίων, καθώς και ένας τρόπος επιτάχυνσής τους. Επίσης είναι απαραίτητο ένα υλικό, το οποίο χρησιμοποιούμενο ως στόχος, θα παράξει τις ακτίνες X. Είναι σύνηθες, η παραγωγή τους να λαμβάνει χώρα εντός κενού, ανάμεσα σε μία κάθοδο και μία άνοδο, με ανάπτυξη τάσης ηλεκτρικού ρεύματος 30-50 kV.



Εικόνα 4.4 Περιθλασίμετρο ακτίνων X (XRD)

Η διαδικασία που ακολουθείται για την πραγματοποίηση της ανάλυσης έχει ως εξής: Αρχικά, εισάγεται το δείγμα στο μηχάνημα στους ειδικούς υποδοχείς, συνήθως σε μορφή κόνεως, ενώ υπάρχουν και περιθλασίμετρα που εκτελούν αναλύσεις και σε άλλες μορφές δείγματος. Έπειτα, μονοχρωματική ακτινοβολία ακτίνων X γνωστού μήκους κύματος προσπίπτει πάνω στα πλεγματικά επίπεδα των προς εξέταση δειγμάτων. Η μέθοδος βασίζεται στον προσδιορισμό των εσωτερικών διαστημάτων των επιπέδων του κρυσταλλικού πλέγματος, τα οποία είναι χαρακτηριστικά του κάθε ορυκτού. Με αυτόν τον τρόπο, προκύπτει ένα ακτινοδιάγραμμα. Για την περαιτέρω κατανόηση του διαγράμματος ως προς τις ορυκτολογικές φάσεις που απεικονίζει, πραγματοποιείται αναζήτηση σε πίνακες με πρότυπα ορυκτά. Πλέον, υπάρχουν βάσεις δεδομένων σε λογισμικά που μπορεί κανείς να ανατρέξει. [29]

Για την ανάλυση των προς εξέταση δειγμάτων αυτής της εργασίας χρησιμοποιήθηκε συσκευή περίθλασης ακτίνων X, Bruker D8 Focus, για εύρος γωνιών από 5° έως 70° και βήμα αύξησης 0.02° ανά δευτερόλεπτο.

4.3.2 Κοκκομετρική ανάλυση

Με την κοκκομετρική ανάλυση μπορεί να υπολογιστεί η κατανομή του μεγέθους των κόκκων ενός υλικού. Η κοκκομετρική ανάλυση είναι η πιο διαδεδομένη και η πιο συχνά διενεργούμενη δοκιμή για τα αδρανή υλικά, γιατί η κατανομή του μεγέθους των κόκκων ενός αδρανούς υλικού επηρεάζει άμεσα όλες τις ιδιότητες των κονιαμάτων και του σκυροδέματος. Τα αποτελέσματα της κοκκομετρικής ανάλυσης αποδίδουν πολύτιμα δεδομένα για τις ιδιότητες του πορώδους του ιστού των αδρανών υλικών στις κατασκευές. [28]

Η κοκκομετρική ανάλυση πραγματοποιήθηκε με τη μέθοδο περίθλασης ακτίνων laser, με τη βοήθεια του οργάνου Malvern Mastersizer για τον καολίνη Ε και για το υλικό που προέκυψε μετά από έψηση στους 800°C για 8 ώρες. Για τον προσδιορισμό της κοκκομετρίας του υλικού που προέκυψε μετά την έψηση και λειοτρίβηση για 7 ώρες στα 200 rpm χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της δυναμικής σκέδασης φωτός (Dynamic Light Scattering, DLS) και συγκεκριμένα η συσκευή Anton Par Litesizer500.



Εικόνα 4.5 Όργανο ανάλυσης κοκκομετρίας Malvern Mastersizer

4.3.3 Δοκιμή Chapelle

Η δοκιμή Chapelle είναι η μέθοδος που εφαρμόζεται για τον προσδιορισμό της ποζολανικότητας ενός υλικού. Στην παρούσα διπλωματική, εφαρμόστηκε στα δύο είδη μετακαολίνη που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή των παστών και κονιαμάτων τσιμέντου. Ο υπολογισμός της γίνεται μέσω της υδρασβέστου $[Ca(OH)_2]$ που καταναλώνεται κατά την ποζολανική αντίδραση.

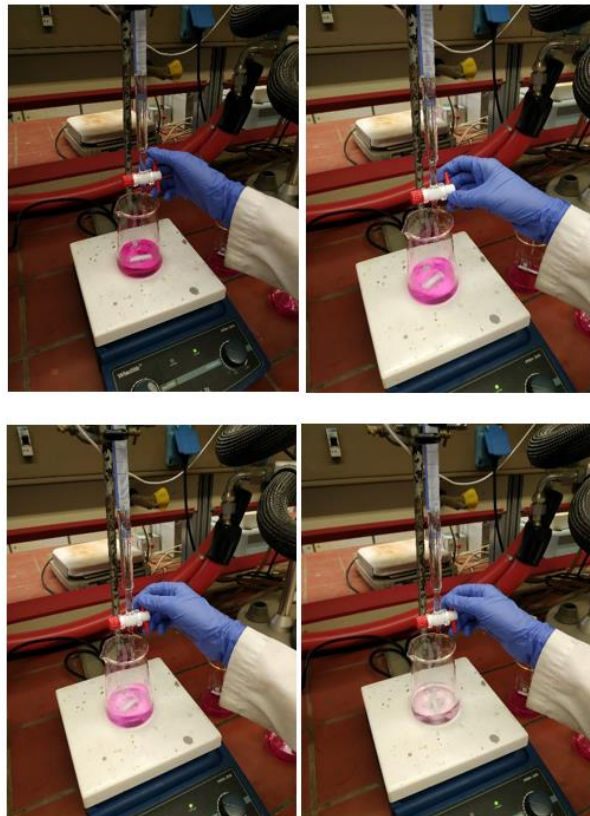
Αρχικά, ζυγίζονται 1 g του υπό εξέταση μετακαολίνη και 2 g οξείδιο ασβεστίου (CaO) και τοποθετούνται σε κατάλληλη σφαιρική φιάλη, μαζί με 250 ml απιονισμένου νερού, η οποία τοποθετείται σε θερμαινόμενη φωλιά στους $90\text{ }^{\circ}C$ (85 ± 5) για 16 ώρες. Το μείγμα πρέπει να αναδεύεται καθ' όλη τη διάρκεια της διαδικασίας. Η φιάλη συνδέεται με ψυκτήρα, ώστε να μην υπερθερμανθεί και να αποφευχθούν οι απώλειες. Μετά την πάροδο των 16 ωρών, το μείγμα αφήνεται να ψυχθεί μέχρι να φτάσει σε θερμοκρασία περιβάλλοντος.



Εικόνα 4.6 Σφαιρική φιάλη εντός θερμαινόμενης φωλιάς

Έπειτα, προστίθεται στο μείγμα ένα διάλυμα που αποτελείται από 250 ml απιονισμένου νερού και 60 g σακχαρόζης. Το διάλυμα πρέπει να έχει αναδευτεί και ομογενοποιηθεί πλήρως. Το νέο μείγμα μεταφέρεται σε κωνική φιάλη ή ποτήρι ζέσεως κατάλληλου μεγέθους και αναδύεται σε μαγνητικό αναδευτήρα/ πλάκα ανάδευσης για 15 λεπτά.

Στη συνέχεια, με τη βοήθεια σιφωνιού και πιπέτας, συλλέγονται 200 ml του μείγματος και οδηγούνται σε διήθηση υπό κενό. Όταν ολοκληρωθεί η διήθηση, λαμβάνονται 25 ml του διηθήματος. Σε αυτά προστίθενται λίγες σταγόνες δείκτη, που στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι φαινολοφθαλεΐνη και το διάλυμα, από άχρωμο, μετατρέπεται σε έντονο ροζ. Το διάλυμα των 25 ml τιτλοδοτείται με υδροχλώριο (HCl) συγκέντρωσης 0,1 N, το οποίο βρίσκεται σε προχοΐδα 50 ml που έχει τοποθετηθεί πάνω από το διάλυμα. Κατά την τιτλοδότηση καταγράφεται ο όγκος υδροχλωρίου που απαιτείται εφόσον το διάλυμα γίνει άχρωμο.



Εικόνα 4.7 Διαδικασία τιτλοδότησης ωσότου το διάλυμα γίνει άχρωμο

Η διαδικασία αυτή πραγματοποιείται τρεις φορές συνολικά, ώστε να αποφευχθούν πιθανά σφάλματα.

Η διαδικασία πρέπει πρώτα να έχει πραγματοποιηθεί με διάλυμα αναφοράς, το οποίο δεν περιέχει μετακαολίνη, για να έχει μετρηθεί ο όγκος υδροχλωρίου που απαιτείται μέχρι να

αποχρωματιστεί το διάλυμα. Τα αποτελέσματα μεταφέρονται στον παρακάτω τύπο, ώστε να υπολογιστεί τελικά η ποσότητα υδρασβέστου που μπορεί να καταναλωθεί από τον εκάστοτε μετακαολίνη.

$$\text{mg of Ca(OH)}_2 = 2 \times \frac{V_1 - V_2}{V_1} \times \frac{74}{56} \times 1000$$

όπου

V1: ο όγκος HCl που χρειάστηκε για να αποχρωματιστεί το διάλυμα αναφοράς και

V2: ο όγκος HCl που χρειάστηκε για να αποχρωματιστεί το διάλυμα με μετακαολίνη

4.3.4 Δοκιμή άπλωσης τσιμεντοκονίας

Κατά τη διάρκεια υλοποίησης των συνθέσεων, πραγματοποιήθηκε για κάθε σύνθεση δοκιμή άπλωσης. Η δοκιμή άπλωσης, αποτελεί δοκιμή κατά την οποία υπολογίζεται η εργασιμότητα των παστών και κονιαμάτων τσιμέντου όσο αυτά παραμένουν ακόμα νωπά. Πραγματοποιείται ταυτόχρονα με την παρασκευή των δοκιμών.

Αρχικά, μέρος της τσιμεντοκονίας τοποθετείται σε λαδωμένο καλούπι σχήματος κόλουρου κώνου, φτιαγμένο από ανοξείδωτο ατσάλι, ύψους 50mm και διαμέτρου 100mm στη βάση και 70mm στη κορυφή. Η διάμετρος του κυκλικού δίσκου πάνω στον οποίο τοποθετείται το καλούπι και γίνεται η μέτρηση είναι 254mm. Αφότου το καλούπι του μηχανήματος άπλωσης συμπληρωθεί έως τη μέση, συμπυκνώνεται με κυλινδρική ράβδο, διαμέτρου 40mm και βάρους 250 γραμμαρίων, με 10 ή περισσότερα χτυπήματα ώστε η τσιμεντοκονία να απλωθεί ομοιόμορφα. Έπειτα, το καλούπι πληρώνεται με το μείγμα, το οποίο συμπυκνώνεται με τη ράβδο επίσης με 10 ή περισσότερα χτυπήματα και στη συνέχεια, το καλούπι αφαιρείται κατακόρυφα, αφήνοντας την τσιμεντοκονία να απλωθεί στο δίσκο του μηχανήματος άπλωσης. Ο δίσκος τραντάζεται 15 φορές σε διάστημα 15 δευτερολέπτων, συμβάλλοντας στην περαιτέρω άπλωση της κονίας.

Τελικά, μετράται η διάμετρος άπλωσης της τσιμεντοκονίας σε 2 διαφορετικές διευθύνσεις κάθετες μεταξύ τους, καταλήγοντας στο μέσο όρο της διαμέτρου, ο οποίος αποτελεί την τελική

τιμή άπλωσης της τσιμεντοκονίας σύμφωνα με την οποία γίνεται και η εκτίμηση της εργασιμότητας του μείγματος.

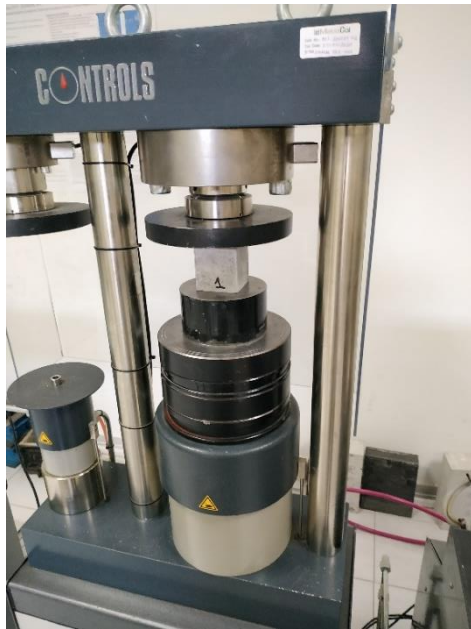


Εικόνα 4.8 Διαδικασία άπλωσης τσιμεντοκονίας

4.3.5 Δοκιμή μονοαξονικής θλίψης

Αφότου τα δοκίμια ωριμάσουν, μετά το πέρας των 28 ημερών, υποβάλλονται σε δοκιμή μονοαξονικής θλίψης, προκειμένου να γίνει ο υπολογισμός της θλιπτικής τους αντοχής f_c . Πριν τη δοκιμή τα δοκίμια ζυγίζονται και μετρώνται οι διαστάσεις τους σε κάθε άξονα παίρνοντας έξι τιμές για κάθε πλευρά του δοκιμίου.

Προτού κάθε δοκίμιο τοποθετηθεί στο κέντρο της επιφάνειας φόρτισης της κάτω στήλης του μηχανήματος, αυτή καθαρίζεται και απομακρύνεται οτιδήποτε δύναται να αλλοιώσει την ορθή μέτρηση αντοχής του δοκιμίου. Η άνω στήλη αφότου το δοκίμιο τοποθετηθεί, ξεκινά τη λειτουργία της με ρυθμό φόρτισης 1,2 kN/s μέχρι να παρατηρηθεί αστοχία του δοκιμίου.



Εικόνα 4.9 Διάταξη δοκιμής σε μονοαξονική θλίψη, για τον προσδιορισμό της θλιπτικής αντοχής f_c



Εικόνα 4.10 Δοκίμιο αφότου αστοχήσει

Η αντοχή σε θλίψη, δίνεται από τον τύπο :

$$f_c = F / A_c$$

όπου :

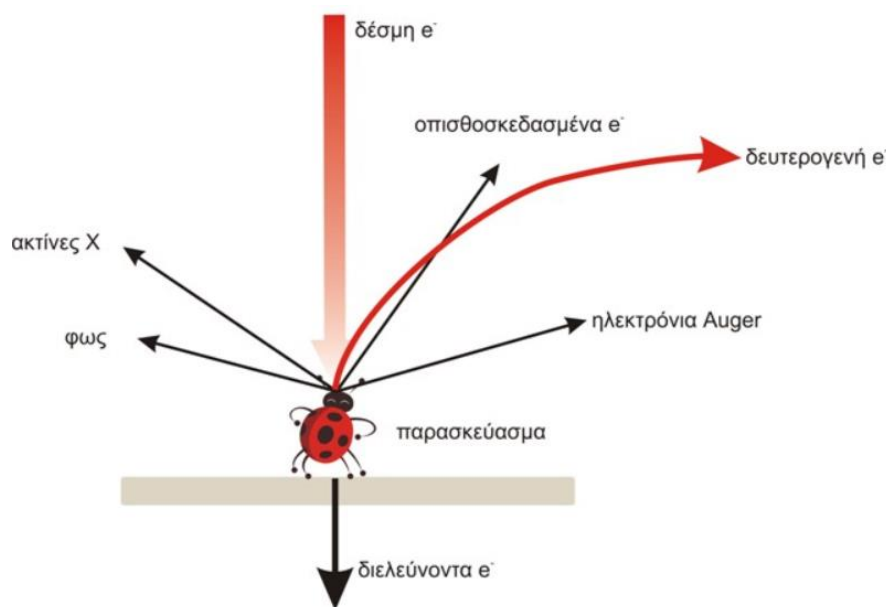
f_c : η θλιπτική αντοχή, σε MPa (N/mm^2)

F : το μέγιστο φορτίο που ασκείται μέχρι την αστοχία του δοκιμίου, σε N

A_c : το εμβαδόν της πλευράς του δοκιμίου που έρχεται σε επαφή με την πλάκα φόρτισης, σε mm^2

4.3.6 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης (SEM)

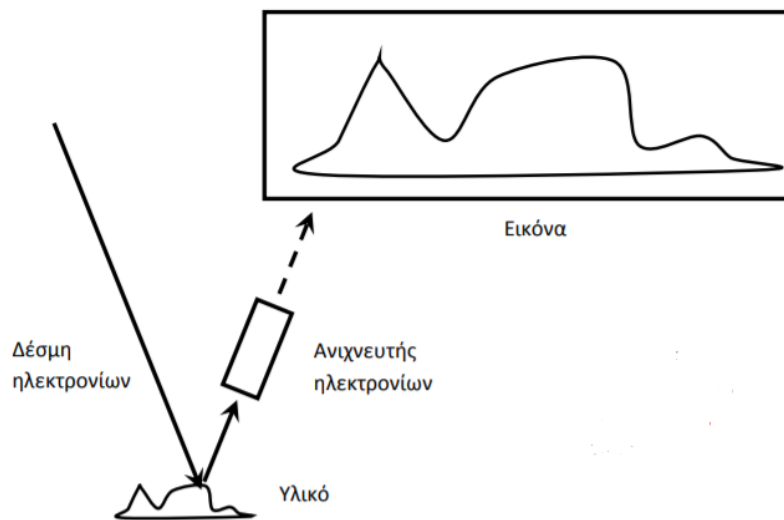
Το Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο Σάρωσης (ΗΜΣ) παράγει καλά εστιασμένες εικόνες με μεγάλη λεπτομέρεια, έχοντας παράλληλα διακριτική ικανότητα που δύναται να φτάσει τα 3 nm. Το ΗΜΣ χρησιμοποιεί μια δέσμη ηλεκτρονίων, η οποία σαρώνει την επιφάνεια του δείγματος με πολύ μεγάλη ταχύτητα. Η δέσμη των ηλεκτρονίων παράγεται από ένα νήμα και ένα σύστημα ανόδου καθόδου, όπου εφαρμόζεται υψηλή τάση, της τάξεως των 15-20 kV, για την επιτάχυνση των ηλεκτρονίων. Η δέσμη αυτή, αφού εστιαστεί από σύστημα συγκεντρωτών φακών, βομβαρδίζει το δείγμα με αποτέλεσμα κάποια από τα ηλεκτρόνια να το διαπερνούν και κάποια να σκεδάζονται ή να άγονται. Συγχρόνως προκαλείται η παραγωγή δευτερογενών ηλεκτρονίων, ακτίνων X και ηλεκτρονίων Auger, όπως παρουσιάζεται στην παρακάτω εικόνα.



Εικόνα 4.11 Οι διάφοροι τρόποι αλληλεπίδρασης δείγματος και δέσμης επιταχυσμένων ηλεκτρονίων

Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια που προέρχονται από την επιφάνεια του δείγματος έχουν μικρή σχετικά ενέργεια που σχετίζεται με την τοπογραφία του. Αυτά τα δευτερογενή ηλεκτρόνια συλλέγονται και στέλνονται σαν ένα ηλεκτρονικό σήμα μέσω ενός ενισχυτή εικόνας σε ένα καθοδικό σωλήνα, όπου γίνεται και η παρατήρηση ή/ και η φωτογράφιση του δείγματος. Στα σύγχρονα ΗΜΣ το αναλογικό ψηφιακό σήμα ψηφιοποιείται και η παρατήρηση, ο έλεγχος αλλά και η λειτουργία του μικροσκοπίου, γίνονται μέσω ηλεκτρονικού υπολογιστή. Τα υπόλοιπα

ηλεκτρόνια ή ακτινοβολίες που παράγονται μπορούν να μας δώσουν άλλες πληροφορίες σχετικές με την υφή και τη σύσταση του δείγματος. [27]



Εικόνα 4.12 Σχηματική αναπαράσταση λειτουργίας του ΗΜΣ

5. ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

5.1 Ορυκτολογική ανάλυση

Στα διαγράμματα XRD 5.1 και 5.2 που ακολουθούν, παρουσιάζονται οι ορυκτολογικές φάσεις του υλικού που χρησιμοποιήθηκε ως πρόσθετο, στην παρούσα διπλωματική, προς δημιουργία παστών και κονιαμάτων τσιμέντου.

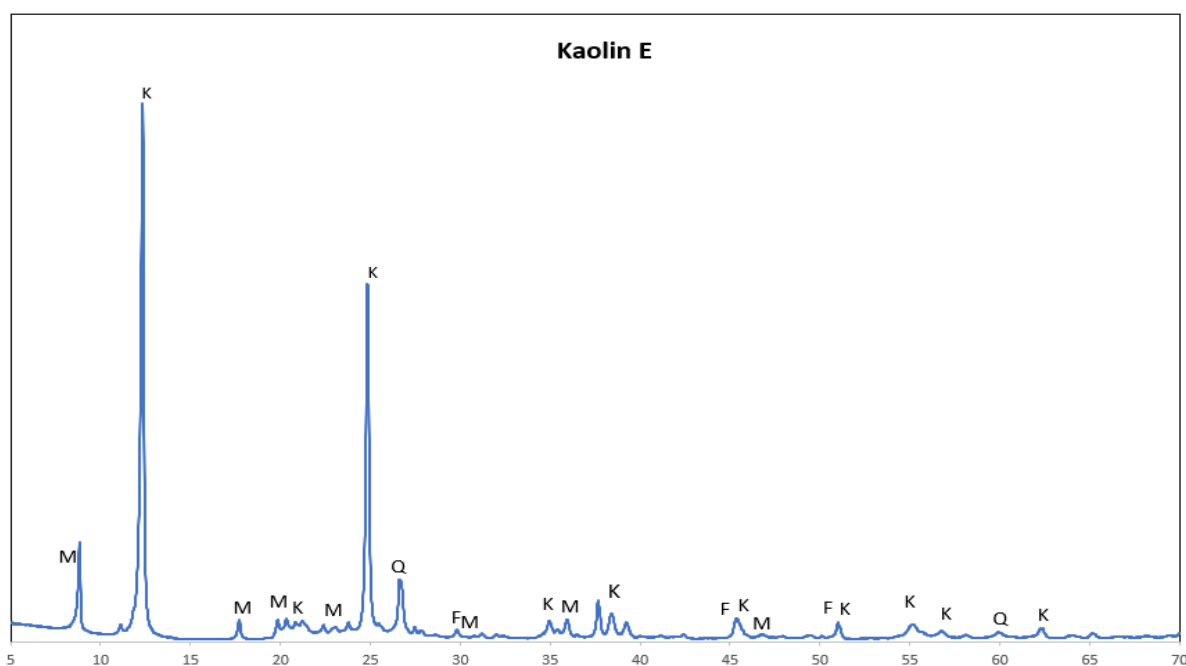
Στο πρώτο διάγραμμα παρουσιάζεται το XRD του αρχικού υλικού (καολίνης E), προτού αυτό υποστεί επεξεργασία.

Στο δεύτερο διάγραμμα παρουσιάζεται το XRD του υλικού που προέκυψε μετά από έψηση του καολίνης E στους 800° C για οκτώ ώρες.

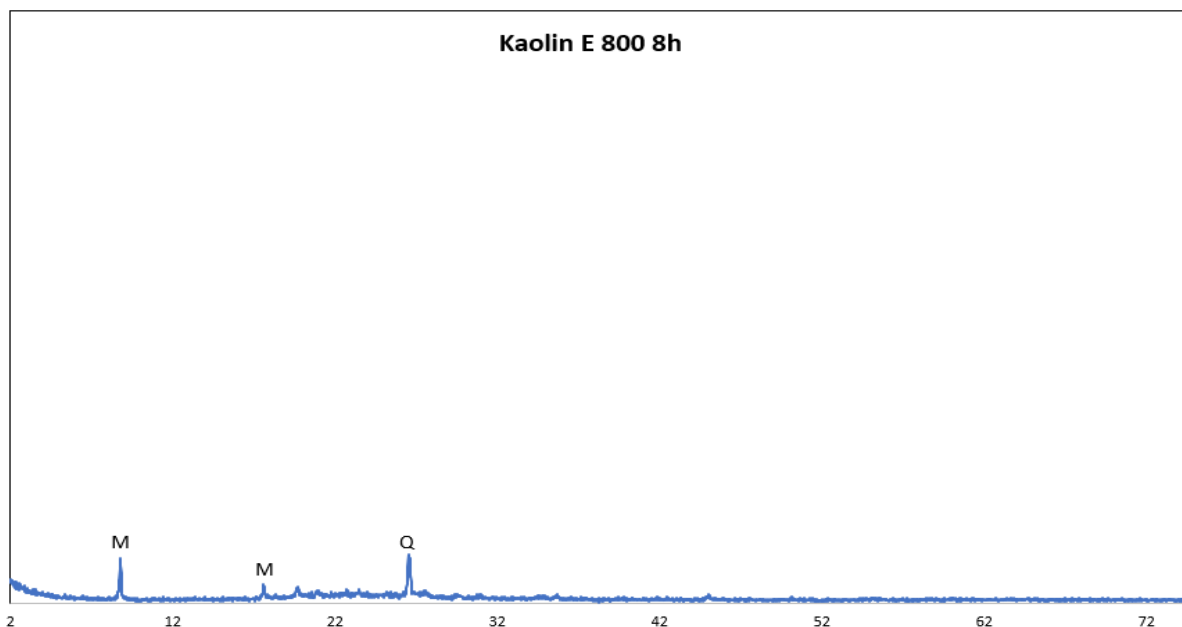
Τα επί μέρους ορυκτά του καολίνης, τα οποία εμφανίζονται στα διαγράμματα XRD, παρουσιάζονται στον πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1 Επί μέρους ορυκτά του καολίνης

K	Καολινίτης
M	Μαρμαρυγίες
F	Άστριοι
Q	Χαλαζίας



Διάγραμμα 5.1 Διάγραμμα XRD καολίνης E

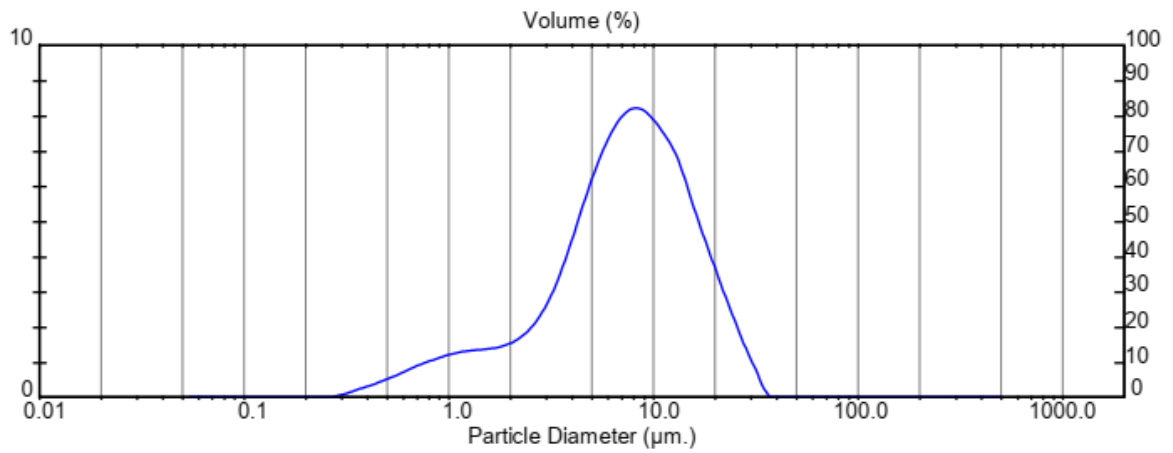


Διάγραμμα 5.2 Διάγραμμα XRD καολίνη E, έπειτα από έψηση για 8 ώρες στους 800° C

Από τα διαγράμματα 5.1 και 5.2, παρατηρείται πως μετά την έψηση υπάρχει διαφοροποίηση στην ορυκτολογική σύσταση του υλικού. Πιο συγκεκριμένα, εξαφανίζονται οι κορυφές του καολινίτη και των αστρίων, ενώ φαίνεται να παραμένουν ακόμη κάποιες μικρές ποσότητες χαλαζία και μαρμαρυγιών. Το υλικό που προκύπτει είναι μετακαολίνης.

5.2 Αποτελέσματα κοκκομετρικής ανάλυσης

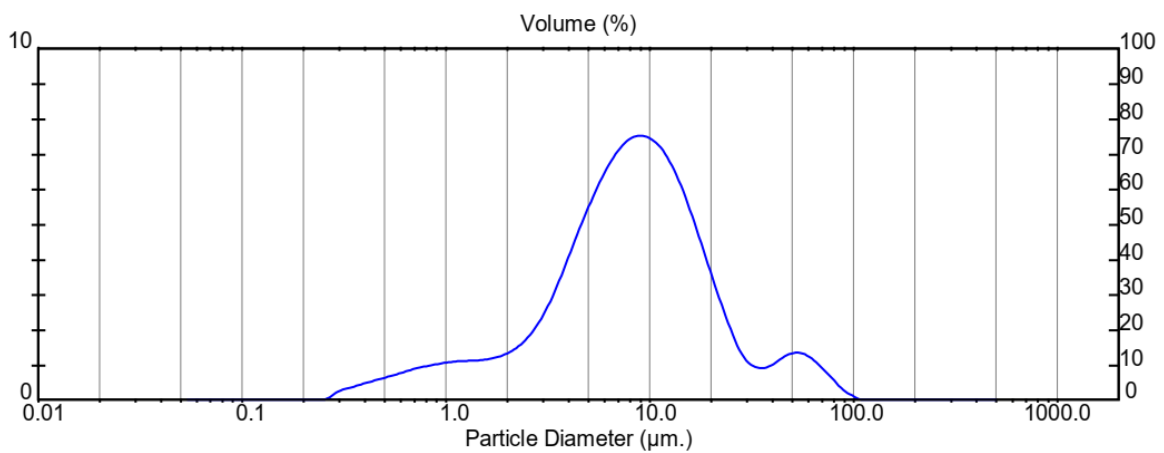
Στα διαγράμματα 5.3 έως 5.5 και τους πίνακες 5.2 έως 5.4 που ακολουθούν, παρουσιάζεται η κοκκομετρική κατανομή του καολίνη E προτού υποστεί επεξεργασία καθώς και μετά την έψηση του στους 800° C για 8 ώρες, οι οποίες πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο περίθλασης ακτίνων laser, και η κοκκομετρική κατανομή του καολίνη E, έπειτα από την έψηση του στους 800° C για 8 ώρες και την άλεση του για 7 ώρες με ταχύτητα 200rpm, η οποία μετρήθηκε με τη μέθοδο της δυναμικής σκέδασης φωτός (DLS) .



Διάγραμμα 5.3 Κοκκομετρική κατανομή του καολίνης E

Πίνακας 5.2 Καολίνης E - Μέτρηση laser

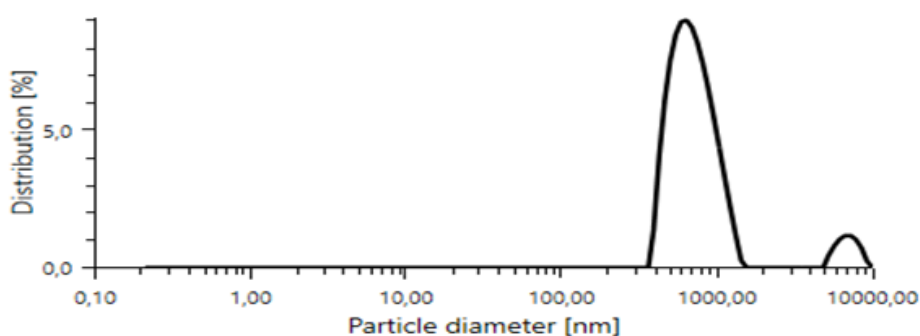
Όγκος %	Κοκκομετρία (μm)
10	1.75
50	7.46
90	17.75



Διάγραμμα 5.4 Κοκκομετρική κατανομή του καολίνης E μετά από έψηση στους 800° C για 8 ώρες

Πίνακας 5.3 Καολίνης Ε – Έψηση στους 800°C για 8 ώρες - Μέτρηση laser

Όγκος %	Κοκκομετρία (μm)
10	1.79
50	8.18
90	23.57



Διάγραμμα 5.5 Κοκκομετρική κατανομή του καολίνης Ε, ο οποίος έχει υποστεί θερμική καταργασία στους 800°C για 8 ώρες και λειοτρίβηση για 7 ώρες με ταχύτητα 200rpm

Πίνακας 5.4 Έψηση στους 800°C για 8 ώρες και λειοτρίβηση για 7 ώρες με ταχύτητα 200rpm – Μέτρηση DLS

Όγκος %	Κοκκομετρία (nm)
94	712,4
6	6944

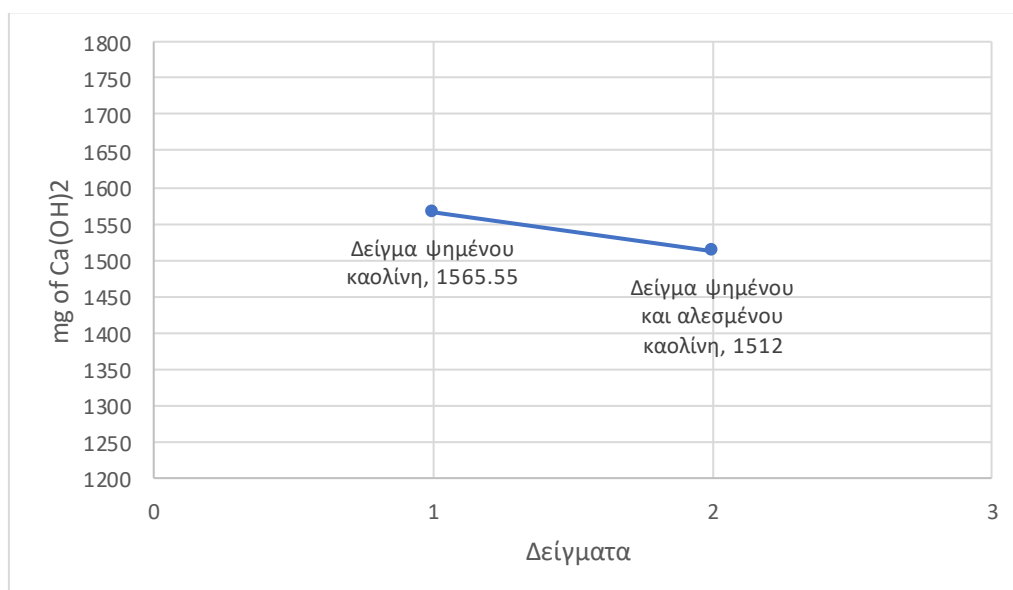
Σύμφωνα με τα παραπάνω αποτελέσματα, η κοκκομετρία του καολίνης Ε φαίνεται να αυξάνεται μετά την διαδικασία της έψησης. Αυτό πιθανότατα οφείλεται στη δημιουργία συσσωματωμάτων μεταξύ των κόκκων του υλικού. Αντίθετα, μετά τη λειοτρίβηση παρατηρείται αισθητή μείωση του μεγέθους των κόκκων, παρά τη μικρή ταχύτητα άλεσης που χρησιμοποιήθηκε.

5.3 Αποτελέσματα δοκιμής Chapelle

Στον πίνακα 5.5, που ακολουθεί, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής Chapelle. Συγκεκριμένα, παρατίθεται ο όγκος του υδροχλωρίου που χρησιμοποιήθηκε κατά την τιτλοδότηση και τελικά η υδράσβεστος που καταναλώθηκε τόσο στο δείγμα αναφοράς, όσο και στα δύο δείγματα μετακαολίνη.

Πίνακας 5.5 Αποτελέσματα δοκιμής Chapelle

Δείγμα	Αρχικός Όγκος (ml)	Τελικός Όγκος (ml)	Όγκος (ml)	Ca(OH) ₂ (mg)
Αναφοράς	0	28	28	783.07
	2.3	30.3	28	
	15.7	43.6	27.9	
8 h, 800° C	0	11.6	11.6	1565.55
	11.6	22.9	11.3	
	22.9	34.2	11.3	
8 h, 800° C & 7h, 200 rpm	0	12	12	1512.00
	12	23.9	11.9	
	23.9	35.9	11.9	



Διάγραμμα 5.6 Κατανάλωση mg Ca(OH)₂ δειγμάτων μετακαολίνη

Σύμφωνα με τα παραπάνω στοιχεία, δεν φαίνεται να υπάρχει ουσιαστική διαφοροποίηση μεταξύ του ψημένου καολίνης και του ψημένου και αλεσμένου. Αυτό δείχνει ότι η ταχύτητα άλεσης είναι αρκετά χαμηλή και δεν συνεισφέρει σε περαιτέρω ενεργοποίηση.

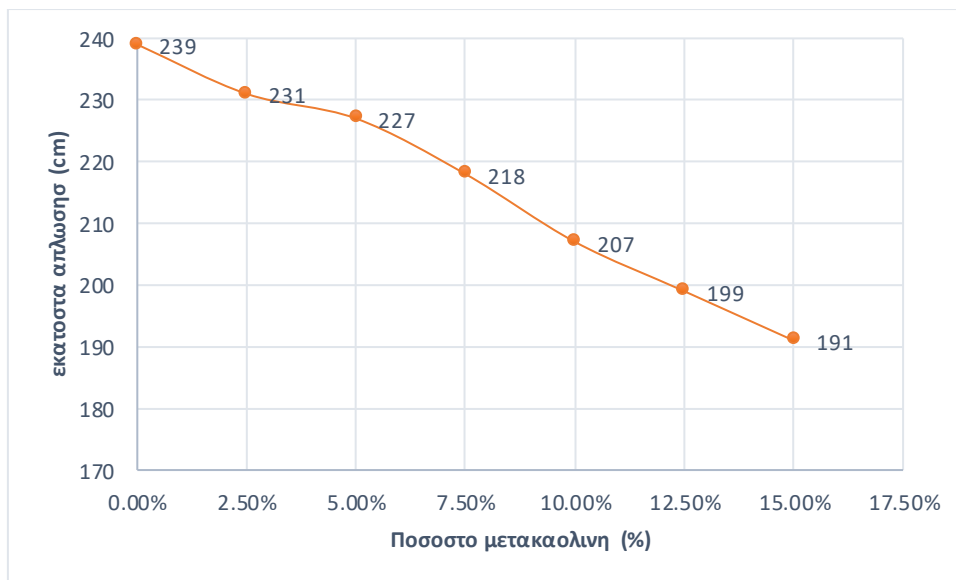
5.4 Αποτελέσματα δοκιμής άπλωσης

Στον πίνακα 5.6 παρουσιάζονται οι δύο μετρήσεις διαμέτρου, καθώς και η μέση άπλωση για κάθε σύνθεση, στην οποία χρησιμοποιήθηκε ψημένος καολίνης ως πρόσθετο. Επίσης, παρατίθενται τα διαγράμματα με τα αποτελέσματα των δοκιμών άπλωσης ομαδοποιημένα σε πάστες και κονιάματα.

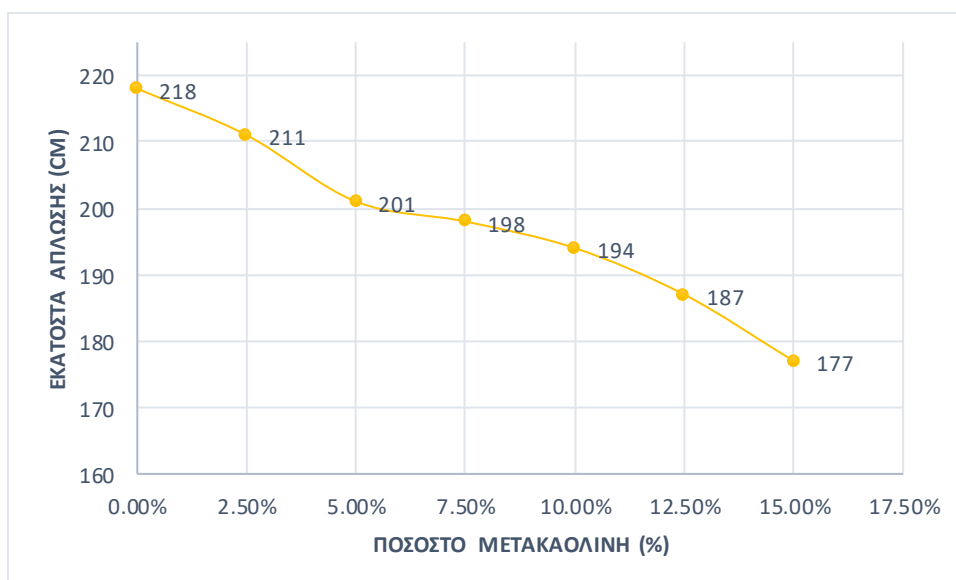
Πίνακας 5.6 Αποτελέσματα δοκιμών άπλωσης συνθέσεων με ψημένο καολίνη

Σύνθεση	Μέτρηση 1ης διαμέτρου (mm)	Μέτρηση 2ης διαμέτρου (mm)	Άπλωση μείγματος- Μέσος όρος διαμέτρων (mm)
0.45CEM – REF	240	238	239
0.45CEM - MK 2.5%	232	230	231
0.45CEM - MK 5%	230	224	227
0.45CEM - MK 7.5%	219	217	218
0.45CEM - MK 10%	210	203	207
0.45CEM - MK 12.5%	202	196	199
0.45CEM - MK 15%	192	189	191
0.45MOR(2/1) – REF	220	216	218
0.45MOR(2/1) - MK 2.5%	212	210	211
0.45MOR(2/1) - MK 5%	203	198	201
0.45MOR(2/1) - MK 7.5%	201	195	198
0.45MOR(2/1) - MK 10%	195	193	194
0.45MOR(2/1) - MK 12.5%	188	185	187
0.45MOR(2/1) - MK 15%	178	175	177

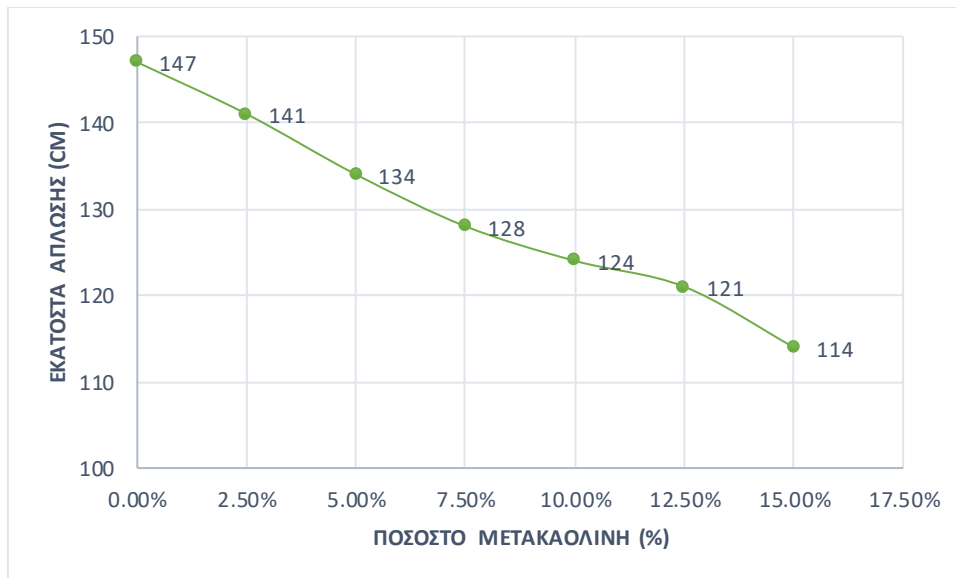
0.45MOR(3/1) – REF	147	147	147
0.45MOR(3/1) - MK 2.5%	142	140	141
0.45MOR(3/1) - MK 5%	135	133	134
0.45MOR(3/1) - MK 7.5%	129	126	128
0.45MOR(3/1) - MK 10%	126	122	124
0.45MOR(3/1) - MK 12.5%	123	119	121
0.45MOR(3/1) - MK 15%	115	113	114



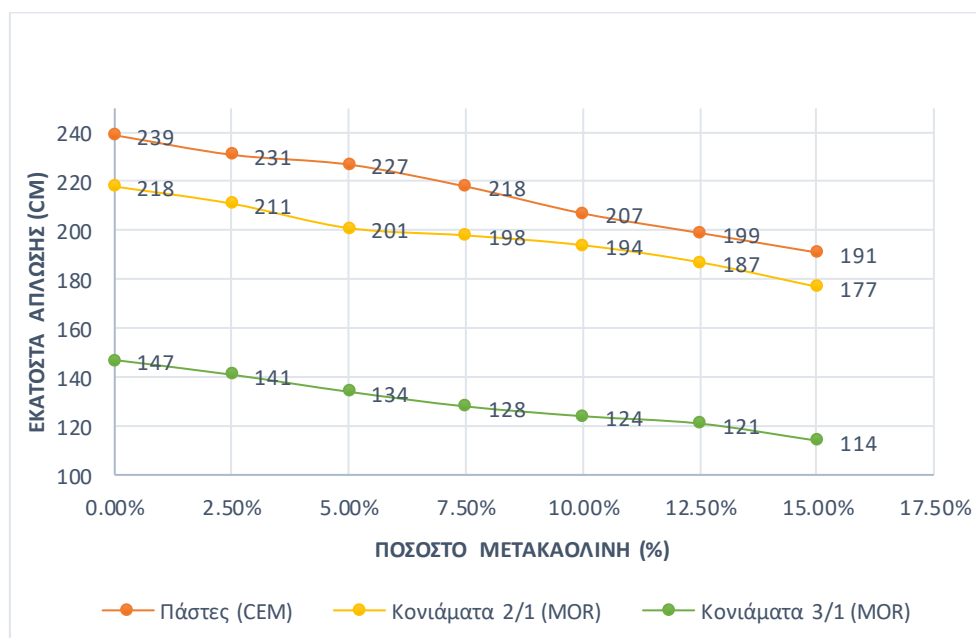
Διάγραμμα 5.7 Αποτελέσματα δοκιμής άπλωσης παστών με ψημένο καολίνη



Διάγραμμα 5.8 Αποτελέσματα δοκιμής άπλωσης τσιμεντοκονιαμάτων 0.45MOR(2/1) με ψημένο καολίνη



Διάγραμμα 5.9 Αποτελέσματα δοκιμής άπλωσης τσιμεντοκονιαμάτων 0.45MOR(3/1) με ψημένο καολίνη

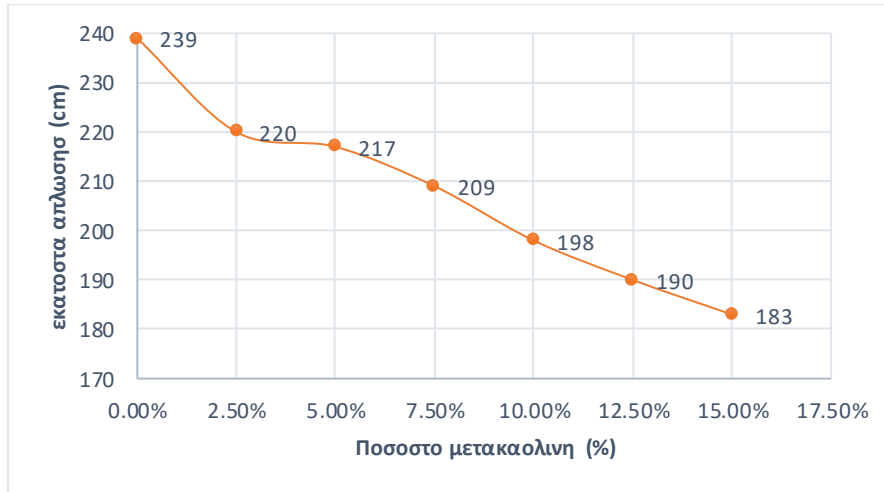


Διάγραμμα 5.10 Σύγκριση αποτελεσμάτων δοκιμών άπλωσης με ψημένο καολίνη

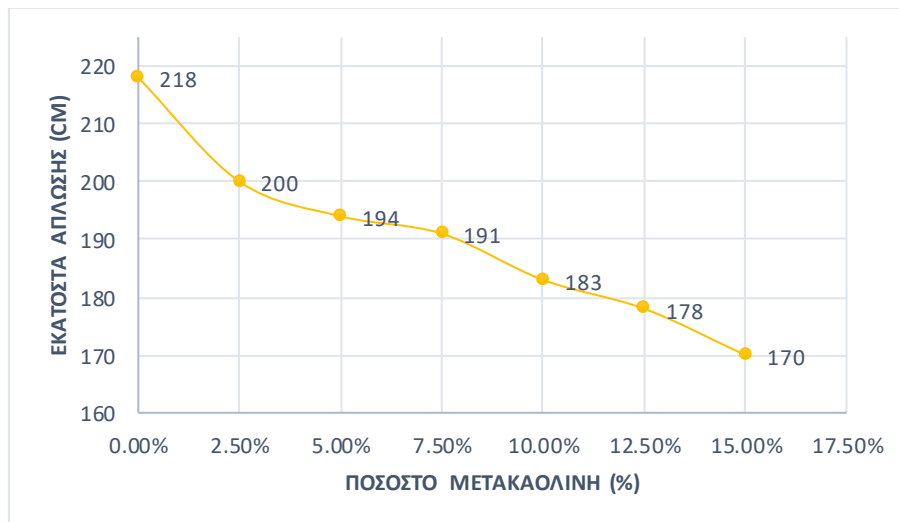
Στην συνέχεια στον πίνακα 5.7 παρουσιάζονται οι δύο μετρήσεις διαμέτρου, καθώς και η μέση άπλωση για κάθε σύνθεση, στην οποία χρησιμοποιήθηκε ψημένος και αλεσμένος καολίνης ως πρόσθετο. Επίσης, παρατίθενται τα αντίστοιχα διαγράμματα με τα αποτελέσματα των δοκιμών άπλωσης ομαδοποιημένα σε πάστες και κονιάματα.

Πίνακας 5.7 Αποτελέσματα δοκιμών άπλωσης συνθέσεων με ψημένο και αλεσμένο καολίνη

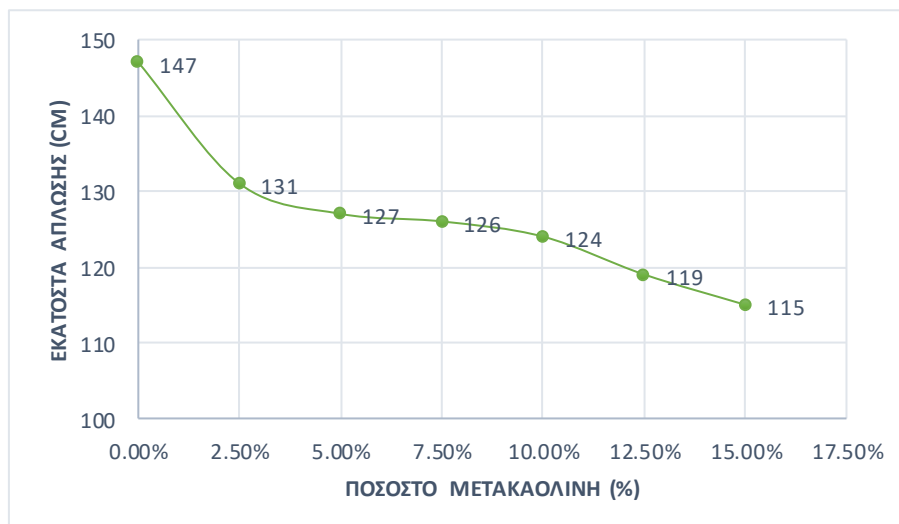
Σύνθεση	Μέτρηση 1ης διαμέτρου (mm)	Μέτρηση 2ης διαμέτρου (mm)	Άπλωση μείγματος- Μέσος όρος διαμέτρων (mm)
0.45CEM – REF	240	238	239
0.45CEM - MK 2.5%	221	219	220
0.45CEM - MK 5%	218	216	217
0.45CEM - MK 7.5%	209	208	209
0.45CEM - MK 10%	197	199	198
0.45CEM - MK 12.5%	188	191	190
0.45CEM - MK 15%	182	183	183
0.45MOR(2/1) – REF	220	216	218
0.45MOR(2/1) - MK 2.5%	201	198	200
0.45MOR(2/1) - MK 5%	195	193	194
0.45MOR(2/1) - MK 7.5%	191	191	191
0.45MOR(2/1) - MK 10%	182	184	183
0.45MOR(2/1) - MK 12.5%	178	177	178
0.45MOR(2/1) - MK 15%	169	170	170
0.45MOR(3/1) – REF	147	147	147
0.45MOR(3/1) - MK 2.5%	129	132	131
0.45MOR(3/1) - MK 5%	127	128	127
0.45MOR(3/1) - MK 7.5%	126	126	126
0.45MOR(3/1) - MK 10%	124	123	124
0.45MOR(3/1) - MK 12.5%	118	119	119
0.45MOR(3/1) - MK 15%	115	11	115



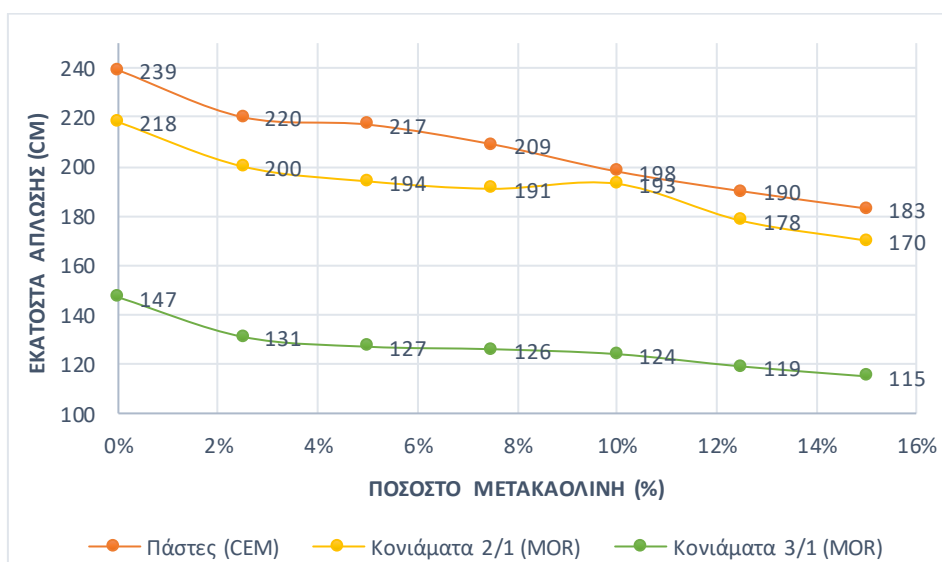
Διάγραμμα 5.11 Αποτελέσματα δοκιμής άπλωσης παστών με ψημένο και αλεσμένο καολίνη



Διάγραμμα 5.12 Αποτελέσματα δοκιμής άπλωσης τσιμεντοκονιαμάτων 0.45MOR(2/1) με ψημένο και αλεσμένο καολίνη



Διάγραμμα 5.13 Αποτελέσματα δοκιμής άπλωσης τσιμεντοκονιαμάτων 0.45MOR(3/1) με ψημένο και αλεσμένο καολίνη



Διάγραμμα 5.14 Σύγκριση αποτελεσμάτων δοκιμών άπλωσης, με ψημένο και αλεσμένο καολίνη

Από τους πίνακες 5.6, 5.7 αλλά και από τα διαγράμματα της άπλωσης διεξάγονται τα παρακάτω συμπεράσματα:

- Η εργασιμότητα των συνθέσεων τόσο στις πάστες, όσο και στα τσιμεντοκονιάματα μειώνεται όσο αυξάνεται το ποσοστό του μετακαολίνης. Με τη σταδιακή αύξηση του μετακαολίνης (από 2,5% έως 15%), μειώνεται σε όλες τις περιπτώσεις συνθέσεων η αρχική άπλωση σε ποσοστό έως και 20-25%.
- Τα μείγματα των παστών είχαν όλα καλή εργασιμότητα.
- Η ρεολογία των κονιαμάτων με αναλογία άμμου προς τσιμέντο 2/1 ήταν καλή και χωρίς τη χρήση ρευστοποιητή.
- Η ρεολογία των δειγμάτων με αναλογία άμμου προς τσιμέντο 3/1 είναι αρκετά δύσκολη. Κατά συνέπεια, μείγματα με τέτοια αναλογία άμμου προς τσιμέντο απαιτούν τη χρήση ρευστοποιητή ώστε να είναι εργάσιμα.
- Η ρεολογία των κονιαμάτων αναλογίας άμμου προς τσιμέντο 2/1 είναι αυξημένη κατά ποσοστό 35% αναφορικά με τη ρεολογία των κονιαμάτων αναλογίας άμμου προς τσιμέντο 3/1.
- Οι πάστες έχουν αυξημένη εργασιμότητα περίπου 7-12% σε σχέση με τα κονιάματα αναλογίας άμμου-τσιμέντου 2/1.

- Κατά την προσθήκη ψημένου και αλεσμένου καολίνης έναντι ψημένου, η ρεολογία όλων των συνθέσεων μειώνεται κατά 5%, εξαιρουμένων των τσιμεντοκονιαμάτων (3/1) με ποσοστό μετακαολίνη 10%, 12,5% και 15%.
- Στα τσιμεντοκονιάματα, μεγαλύτερη μείωση εργασιμότητας σημειώνεται μεταξύ της σύνθεσης αναφοράς τσιμεντοκονιάματος 3/1, και του δείγματος με ποσοστό ψημένου και αλεσμένου καολίνης 2.5% και είναι της τάξεως του 10%.
- Τέλος, στις πάστες, η μεγαλύτερη μείωση εργασιμότητας σε σχέση με την σύνθεση αναφοράς πάστας σημειώνεται σε εκείνη με ποσοστό 15% ψημένου και αλεσμένου καολίνης και είναι της τάξεως του 25%.

5.5 Αποτελέσματα δοκιμής μονοαξονικής θλίψης

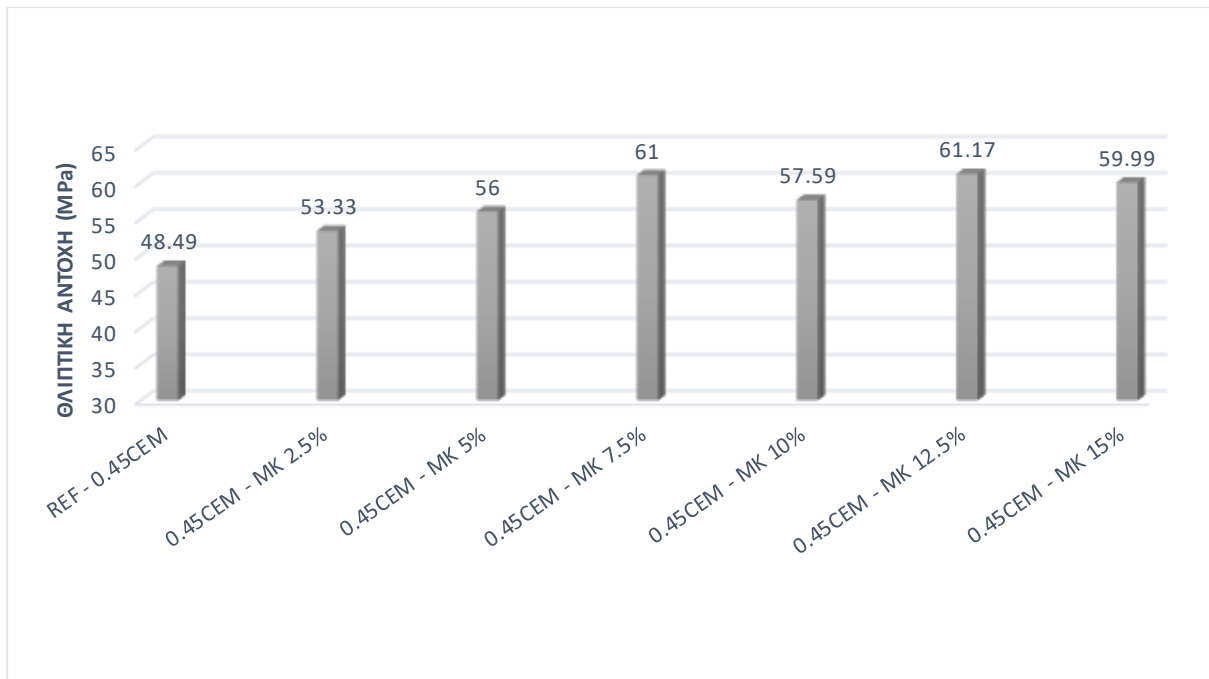
Στον πίνακα 5.8, παρουσιάζεται η πυκνότητα των δοκιμίων, το μέγιστο φορτίο που ασκείται μέχρι την αστοχία του δοκιμίου, η θλιπτική αντοχή του εκάστοτε δοκιμίου καθώς και η μέση θλιπτική αντοχή για κάθε σύνθεση. Σε όλες τις συνθέσεις που παρήχθησαν χρησιμοποιήθηκε ψημένος καολίνης ως πρόσθετο.

Πίνακας 5.8 Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης συνθέσεων με ψημένο καολίνη

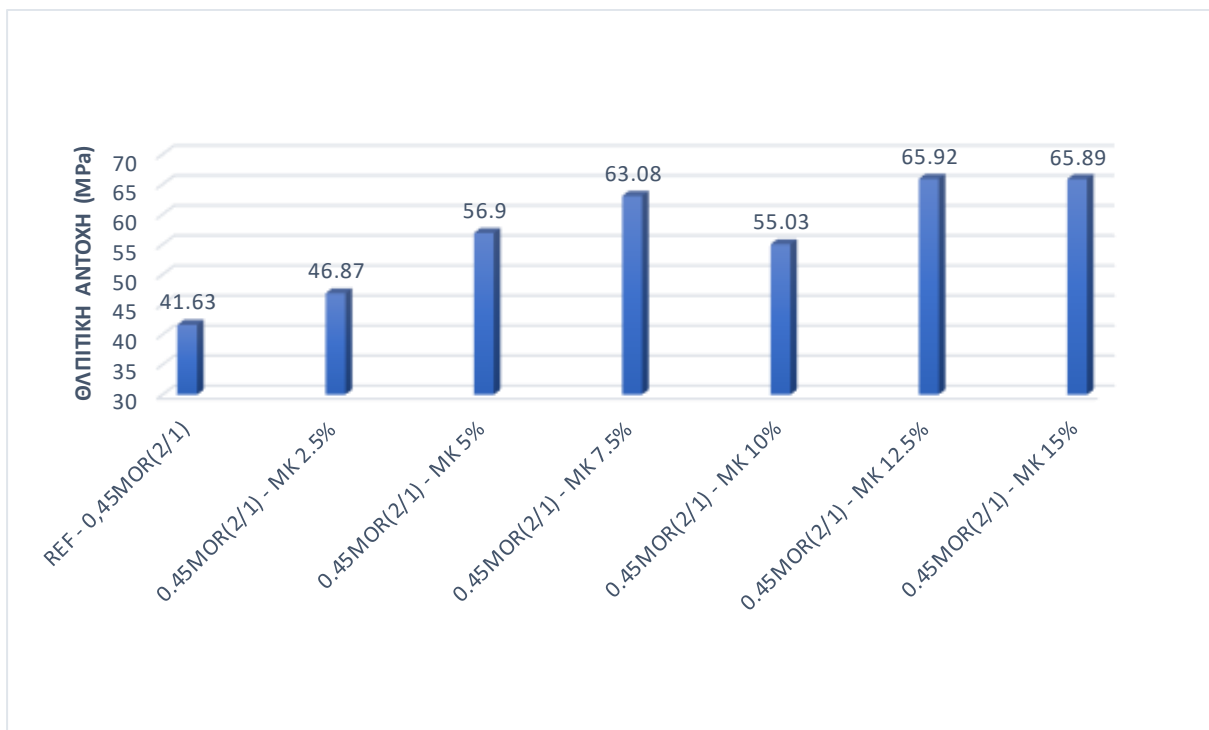
Σύνθεση	Δοκίμιο	Πυκνότητα δοκιμίου (kg/m ³)	F (kN)	F _c (MPa)	Μέσος όρος F _c (MPa)
REF - 0.45CEM	1ο	1759	126.60	49.20	48.49
	2ο	1765	119.64	46.55	
	3ο	1769	126.80	49.72	
REF - 0,45MOR(2/1)	1ο	2097	105.59	41.73	41.63
	2ο	2102	104.29	40.86	
	3ο	2109	107.12	42.28	
REF - 0.45MOR(3/1)	1ο	2162	91.36	36.32	38.64
	2ο	2152	98.96	38.56	
	3ο	2150	103.98	41.03	
0.45CEM - MK 2.5%	1ο	1753	137.09	53.23	53.33
	2ο	1767	136.90	53.10	

	3o	1754	139.15	53.66	
0.45CEM - MK 5%	1o	1756	138.79	54.04	56.00
	2o	1760	141.87	57.83	
	3o	1762	135.85	56.13	
0.45CEM - MK 7.5%	1o	1771	146.04	59.80	61.00
	2o	1776	151.39	61.69	
	3o	1761	154.02	61.50	
0.45CEM - MK 10%	1o	1754	139.93	56.42	57.59
	2o	1773	142.98	58.83	
	3o	1762	145.56	57.51	
0.45CEM - MK 12.5%	1o	1745	146.18	60.03	61.17
	2o	1752	155.27	64.10	
	3o	1759	148.02	59.37	
0.45CEM - MK 15%	1o	1764	152.31	59.63	59.99
	2o	1774	161.27	62.84	
	3o	1757	148.06	57.49	
0.45MOR(2/1) - MK 2.5%	1o	2124	122.85	48.67	46.87
	2o	2120	119.72	47.43	
	3o	2136	112.99	44.51	
0.45MOR(2/1) - MK 5%	1o	2159	143.37	56.55	56.90
	2o	2161	142.95	57.34	
	3o	2173	145.41	56.82	
0.45MOR(2/1) - MK 7.5%	1o	2188	155.28	61.37	63.08
	2o	2180	168.52	66.74	
	3o	2162	150.24	61.14	
0.45MOR(2/1) - MK 10%	1o	2230	141.63	56.29	55.03
	2o	2213	144.07	56.23	
	3o	2206	136.00	52.57	
0.45MOR(2/1) - MK 12.5%	1o	2145	165.80	67.42	65.92
	2o	2140	168.38	67.70	
	3o	2145	155.50	62.65	
	1o	2166	171.33	67.63	

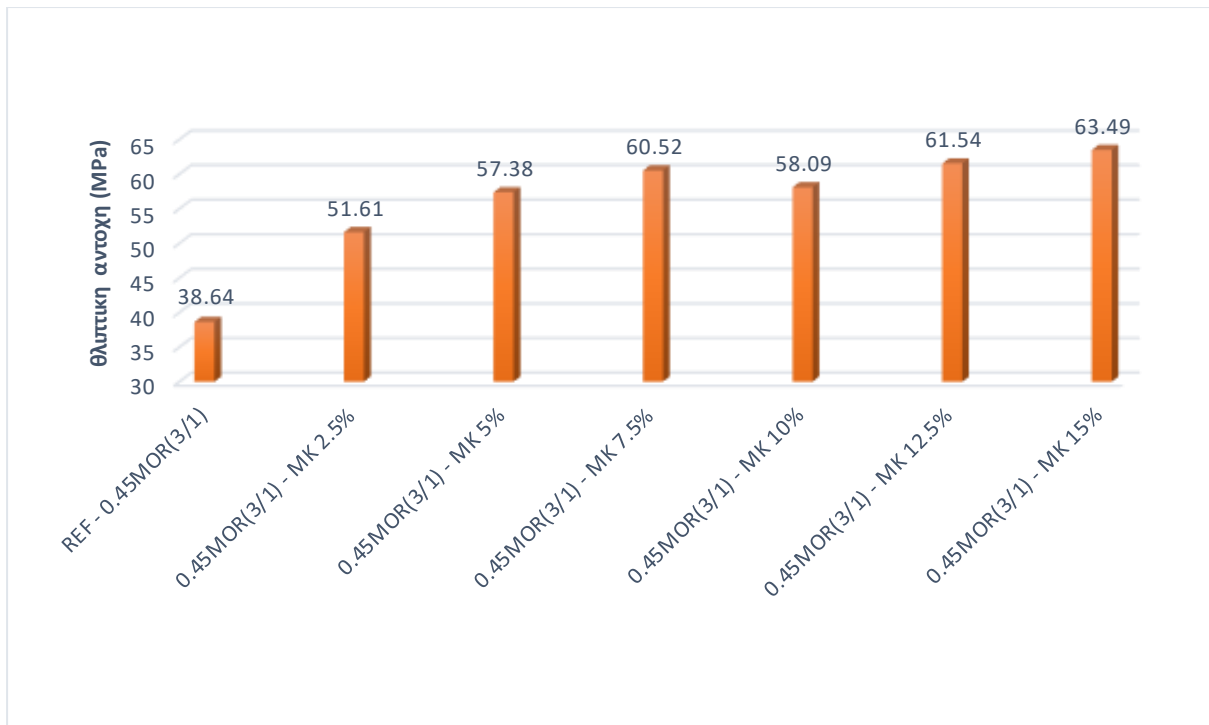
0.45MOR(2/1) - MK 15%	2o	2145	166.45	66.71	65.89
	3o	2147	160.68	63.33	
0.45MOR(3/1) - MK 2.5%	1o	2220	125.93	51.50	51.61
	2o	2224	132.16	52.90	
	3o	2245	128.59	50.42	
0.45MOR(3/1) - MK 5%	1o	2228	147.70	58.63	57.38
	2o	2241	141.03	55.67	
	3o	2231	147.79	57.84	
0.45MOR(3/1) - MK 7.5%	1o	2236	149.75	59.28	60.52
	2o	2250	161.61	63.70	
	3o	2262	148.32	58.60	
0.45MOR(3/1) - MK 10%	1o	2290	143.54	55.78	58.09
	2o	2283	153.24	60.85	
	3o	2270	144.18	57.64	
0.45MOR(3/1) - MK 12.5%	1o	2240	158.18	62.89	61.54
	2o	2248	155.58	61.59	
	3o	2239	151.18	60.13	
0.45MOR(3/1) - MK 15%	1o	2234	163.54	64.76	63.49
	2o	2277	167.28	64.88	
	3o	2242	156.32	60.82	



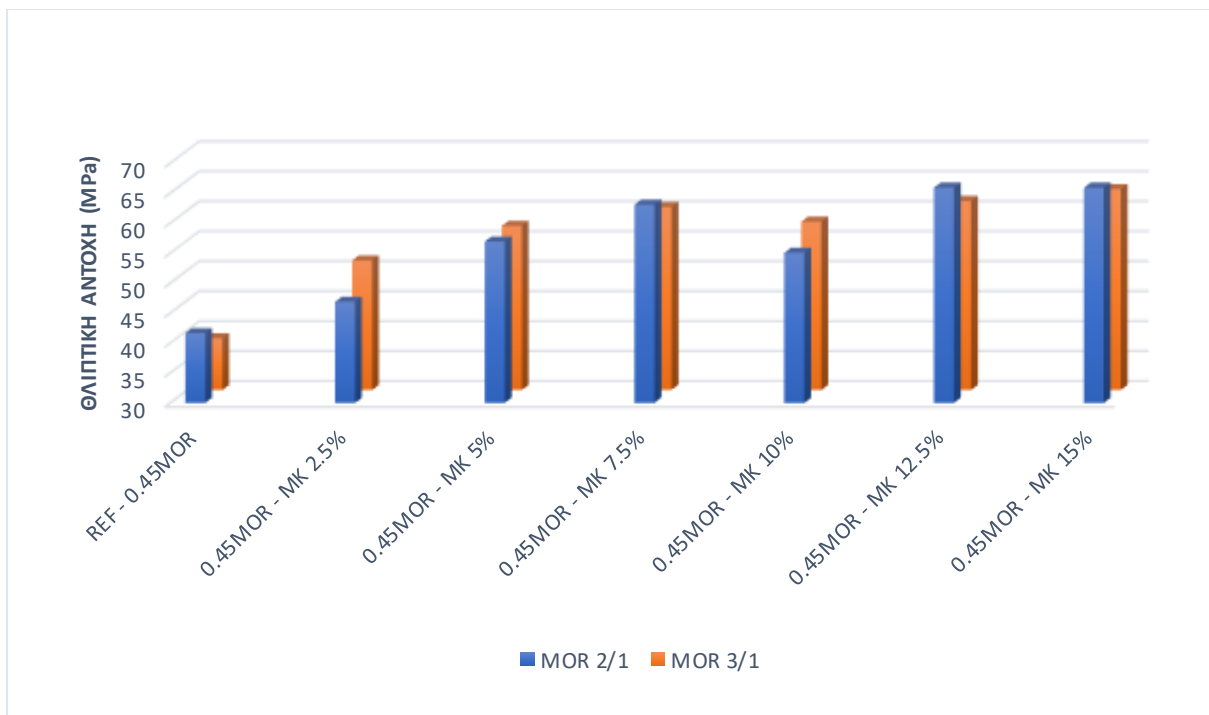
Διάγραμμα 5.15 Αντοχή συνθέσεων παστών τσιμέντου (CEM), με ψημένο καολίνη



Διάγραμμα 5.16 Αντοχή συνθέσεων κονιάματος τσιμέντου 2/1 (MOR), με ψημένο καολίνη



Διάγραμμα 5.17 Αντοχή συνθέσεων κονιάματος τσιμέντου 3/1 (MOR), με ψημένο καολίνη



Διάγραμμα 5.18 Σύγκριση αντοχών συνθέσεων κονιαμάτων 2/1-3/1 (MOR), με ψημένο καολίνη

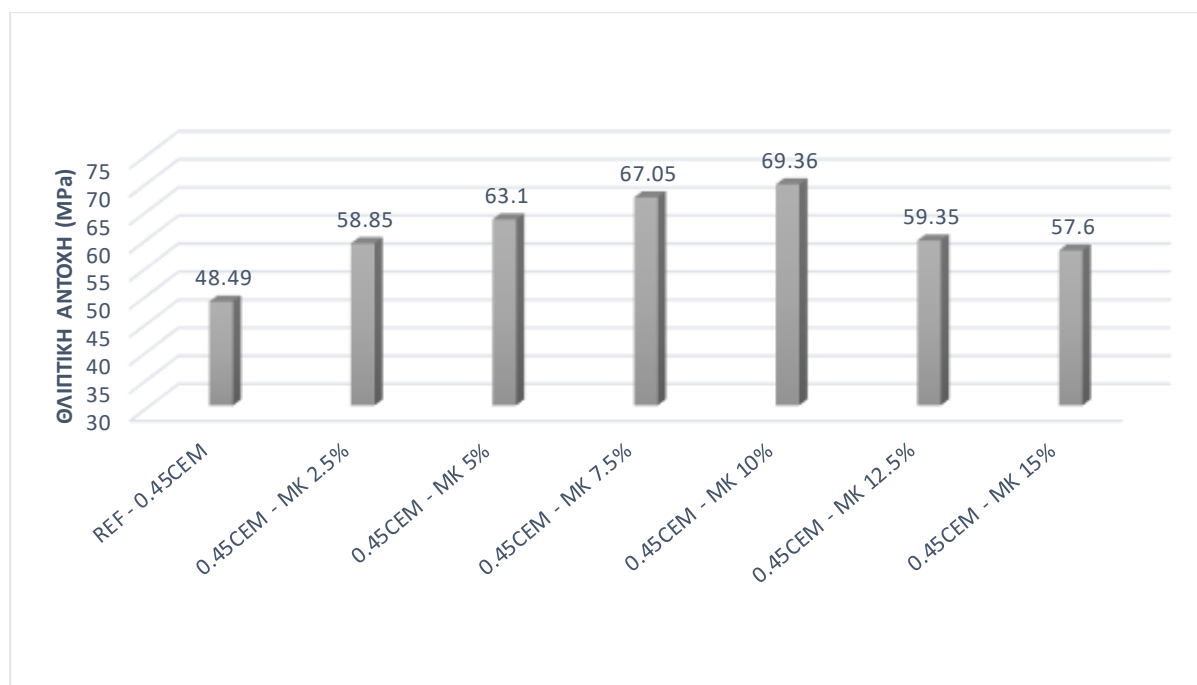
Στον πίνακα 5.9 , παρουσιάζεται η πυκνότητα των δοκιμών, το μέγιστο φορτίο που ασκείται μέχρι την αστοχία του δοκιμίου, η θλιπτική αντοχή του εκάστοτε δοκιμίου καθώς και η μέση θλιπτική αντοχή για κάθε σύνθεση. Σε όλες τις συνθέσεις που παρήχθησαν χρησιμοποιήθηκε ψημένος και αλεσμένος καολίνης ως πρόσθετο.

Πίνακας 5.9 Αποτελέσματα δοκιμών μονοαξονικής θλίψης συνθέσεων με ψημένο και αλεσμένο καολίνη

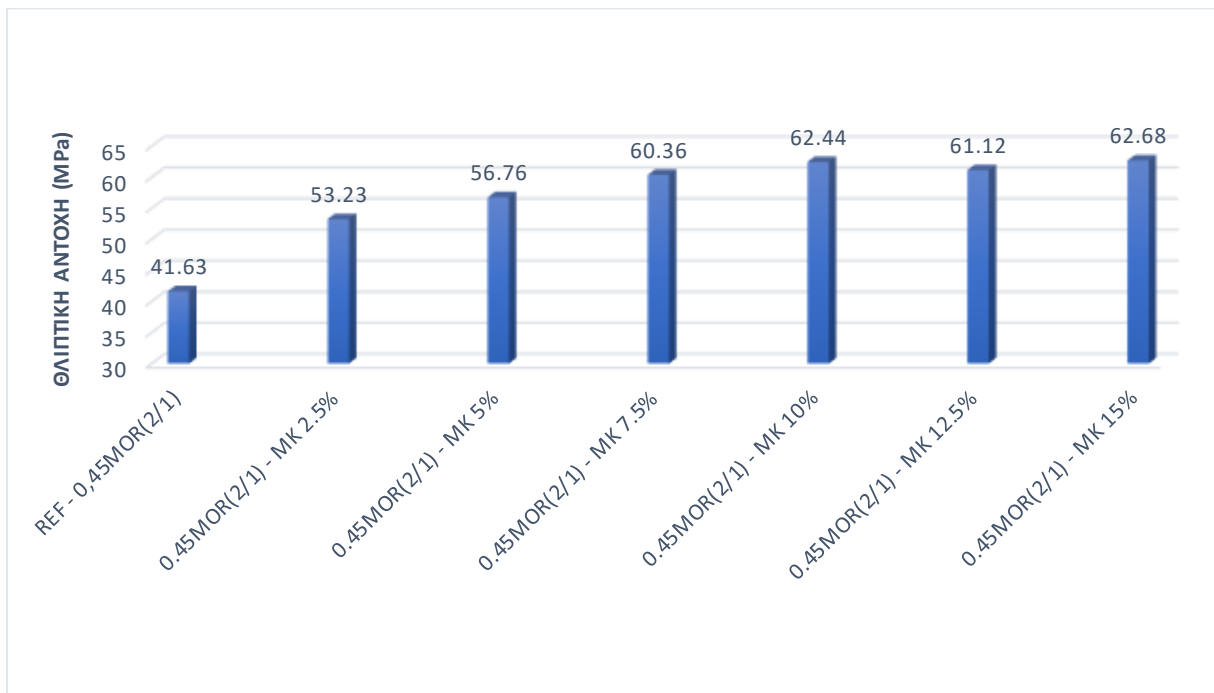
Σύνθεση	Δοκίμιο	Πυκνότητα δοκιμίου (kg/m ³)	F (kN)	F _c (MPa)	Μέσος όρος F _c (MPa)
REF - 0.45CEM	1ο	1759	126.60	49.20	48.49
	2ο	1765	119.64	46.55	
	3ο	1769	126.80	49.72	
REF - 0,45MOR(2/1)	1ο	2097	105.59	41.73	41.63
	2ο	2102	104.29	40.86	
	3ο	2109	107.12	42.28	
REF - 0.45MOR(3/1)	1ο	2162	91.36	36.32	38.64
	2ο	2152	98.96	38.56	
	3ο	2150	103.98	41.03	
0.45CEM - MK 2.5%	1ο	1765	150.82	59.75	58.85
	2ο	1746	151.78	61.21	
	3ο	1771	143.69	55.60	
0.45CEM - MK 5%	1ο	1772	152.69	61.42	63.10
	2ο	1785	160.71	65.26	
	3ο	1775	159.79	62.63	
0.45CEM - MK 7.5%	1ο	1785	162.90	64.08	67.05
	2ο	1763	164.86	67.77	
	3ο	1753	169.43	69.31	
0.45CEM - MK 10%	1ο	1762	166.08	67.80	69.36
	2ο	1773	170.40	68.48	
	3ο	1774	179.93	71.79	

0.45CEM - MK 12.5%	1o	1787	145.92	57.54	59.35
	2o	1766	140.85	56.51	
	3o	1798	155.23	61.00	
0.45CEM - MK 15%	1o	1812	140.48	54.76	57.60
	2o	1786	156.38	59.11	
	3o	1826	152.03	58.92	
0.45MOR(2/1) - MK 2.5%	1o	2278	131.83	51.07	53.23
	2o	2283	138.15	54.76	
	3o	2265	138.30	53.86	
0.45MOR(2/1) - MK 5%	1o	2243	145.59	56.09	56.76
	2o	2233	141.64	55.03	
	3o	2237	149.70	59.15	
0.45MOR(2/1) - MK 7.5%	1o	2260	152.06	59.63	60.36
	2o	2242	152.68	59.52	
	3o	2259	157.52	61.92	
0.45MOR(2/1) - MK 10%	1o	2258	165.25	64.29	62.44
	2o	2263	161.70	63.56	
	3o	2270	156.46	61.69	
0.45MOR(2/1) - MK 12.5%	1o	2250	157.19	62.09	61.12
	2o	2243	158.50	62.23	
	3o	2249	149.52	59.04	
0.45MOR(2/1) - MK 15%	1o	2275	160.33	62.87	62.68
	2o	2263	160.45	63.04	
	3o	2258	158.38	62.12	
0.45MOR(3/1) - MK 2.5%	1o	2230	135.15	52.80	55.53
	2o	2238	143.32	57.64	
	3o	2252	141.31	56.15	
0.45MOR(3/1) - MK 5%	1o	2270	149.72	57.37	59.55
	2o	2262	150.08	59.53	
	3o	2275	155.21	61.74	
	1o	2290	156.47	61.24	

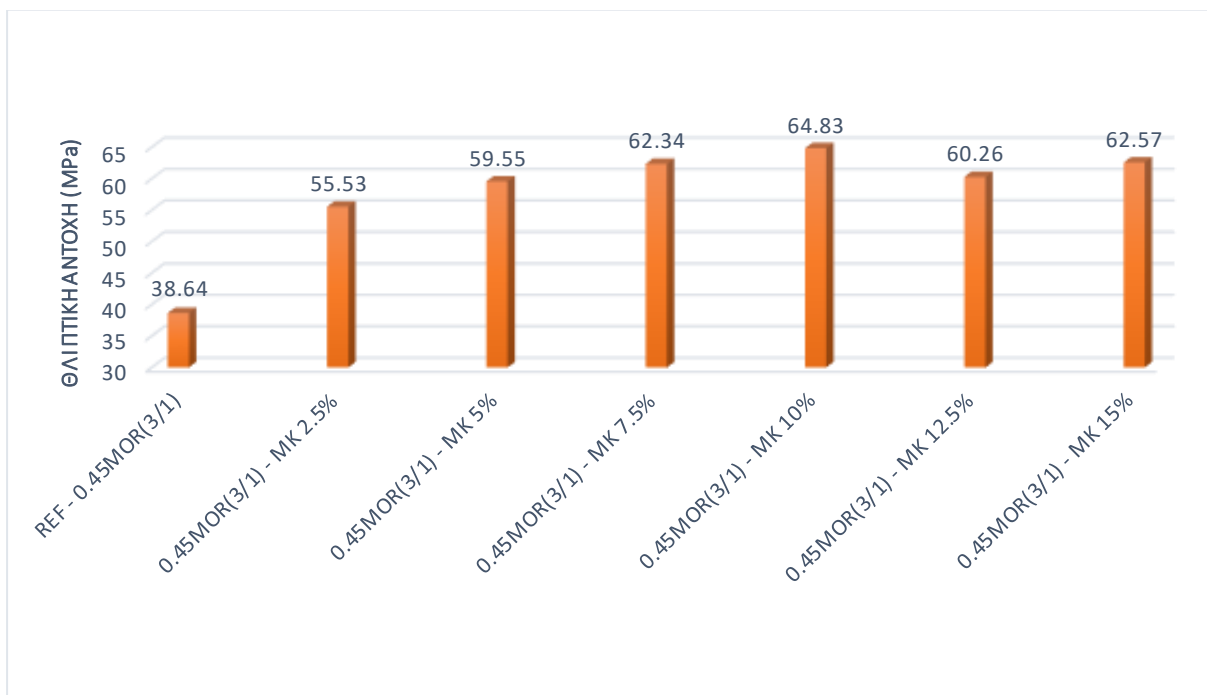
0.45MOR(3/1) - MK 7.5%	2ο	2295	158.01	64.10	62.34
	3ο	2282	157.07	61.69	
0.45MOR(3/1) - MK 10%	1ο	2250	165.75	65.10	64.83
	2ο	2262	160.58	62.95	
	3ο	2271	167.82	66.46	
0.45MOR(3/1) - MK 12.5%	1ο	2248	161.61	61.21	60.26
	2ο	2239	153.73	58.66	
	3ο	2254	155.18	60.91	
0.45MOR(3/1) - MK 15%	1ο	2263	160.60	62.93	62.57
	2ο	2251	155.72	61.37	
	3ο	2248	163.75	63.40	



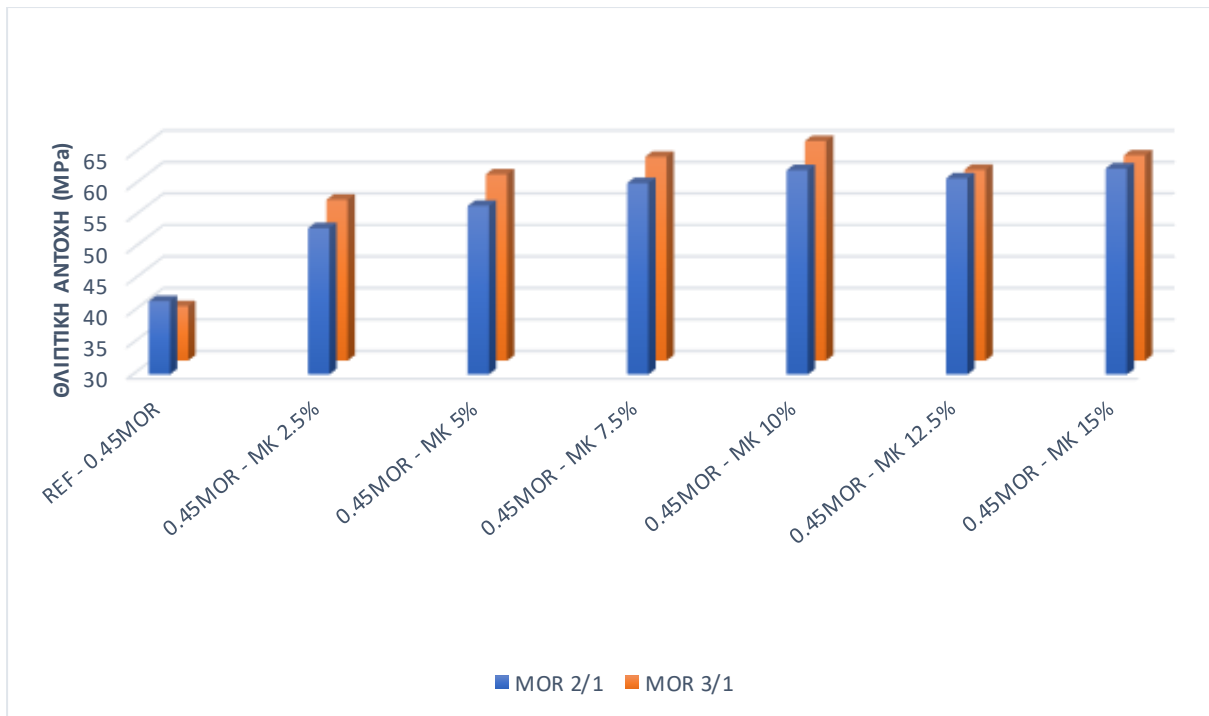
Διάγραμμα 5.19 Αντοχή συνθέσεων παστών τσιμέντου (CEM), με ψημένο και αλεσμένο καολίνη



Διάγραμμα 5.20 Αντοχή συνθέσεων κονιάματος τσιμέντου 2/1 (MOR), με ψημένο και αλεσμένο καολίνη



Διάγραμμα 5.21 Αντοχή συνθέσεων κονιάματος τσιμέντου 3/1 (MOR), με ψημένο και αλεσμένο καολίνη



Διάγραμμα 5.22 Σύγκριση αντοχών συνθέσεων κονιαμάτων 2/1-3/1 (MOR), με ψημένο και αλεσμένο καολίνη

Όπως φαίνεται από τους πίνακες 5.8-5.9 και τα παραπάνω διαγράμματα μονοαξονικής θλίψης, προκύπτουν τα παρακάτω συμπεράσματα :

- Σημειώθηκε αλματώδης αύξηση της θλιπτικής αντοχής σε όλες τις συνθέσεις με την προσθήκη μετακαολίνη σε αυτές, είτε προήλθε από έψηση καολίνη είτε από έψηση και λειοτρίβηση, συγκριτικά με τις συνθέσεις αναφοράς. Στις συνθέσεις κονιαμάτων με αναλογία άμμου προς τσιμέντο 3/1 παρουσιάστηκε και στις δυο περιπτώσεις μετακαολίνη τεράστια αύξηση της θλιπτικής αντοχής της τάξεως του 68%.
- Η αύξηση της θλιπτικής αντοχής των δοκιμίων είτε παρέμεινε σταθερή είτε μειώθηκε ελαφρά, για ποσοστό μετακαολίνη μεγαλύτερο από 7,5% για τις συνθέσεις με ψημένο καολίνη και από 10% για τις συνθέσεις με ψημένο και αλεσμένο καολίνη.

Όσον αφορά τις συνθέσεις στις οποίες χρησιμοποιήθηκε ως πρόσθετο ψημένος καολίνης, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα :

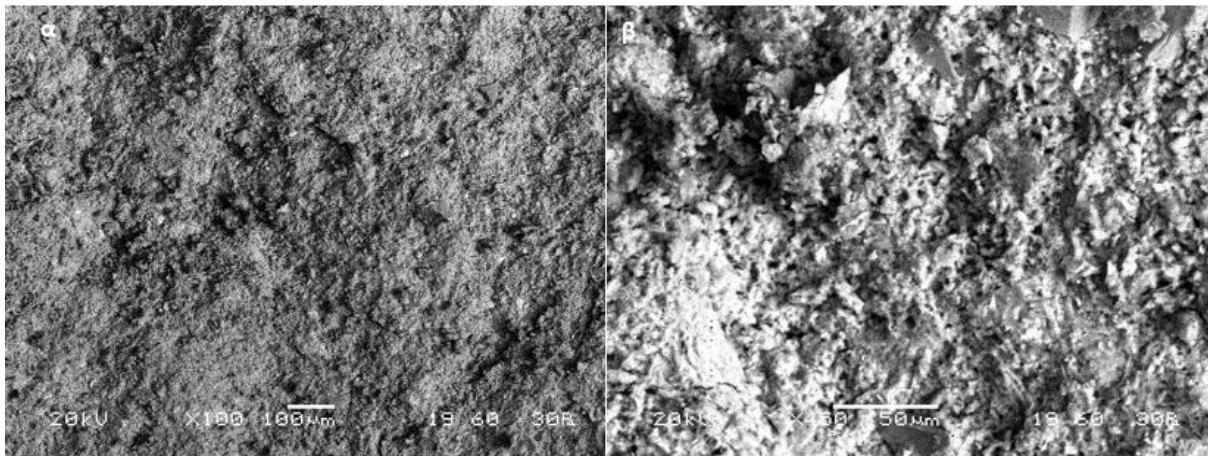
- Η θλιπτική αντοχή των συνθέσεων τόσο στις πάστες, όσο και στα τσιμεντοκονιάματα με τη χρήση ψημένου καολίνη, αυξάνεται σε πολύ μεγάλο βαθμό, για ποσοστό μετακαολίνη μέχρι 7.5%. Από το ποσοστό αυτό και έπειτα η θλιπτική αντοχή, παραμένει σχεδόν σταθερή με εξαίρεση τα δείγματα των συνθέσεων που περιέχουν μετακαολίνη σε ποσοστό 10%, όπου και παρατηρείται μείωση της θλιπτικής αντοχής.
- Η θλιπτική αντοχή στις συνθέσεις παστών, από τη σύνθεση αναφοράς έως την σύνθεση με ποσοστό μετακαολίνη 7.5%, αυξάνεται σε ποσοστό 27%, ενώ στις συνθέσεις των τσιμεντοκονιαμάτων αυξάνεται σε πολύ μεγαλύτερο ποσοστό, με τις αντίστοιχες συνθέσεις MOR(2/1) να παρουσιάζουν αύξηση της θλιπτικής αντοχής 53% και τις αντίστοιχες συνθέσεις MOR(3/1) να έχουν μία αύξηση της τάξεως του 58%.
- Η μεγαλύτερη τιμή της θλιπτικής αντοχής καταγράφηκε για τις συνθέσεις 0.45 MOR(2/1) – MK 12.5% και 15% με αντοχή τα 65.92 και 65.89 MPa, αντίστοιχα, και ακολούθησε η θλιπτική αντοχή των δοκιμίων της σύνθεσης 0.45 MOR(3/1) – MK 15% με τιμή 63.49 MPa.
- Αντίθετα η θλιπτική αντοχή στις συνθέσεις παστών από 7.5% έως 15% δεν σημειώνει καμία αύξηση, ενώ στις συνθέσεις των τσιμεντοκονιαμάτων, παρουσιάζει αύξηση 4-5%, με εξαίρεση τις συνθέσεις με περιεκτικότητα σε μετακαολίνη 10% κατά βάρος τσιμέντου.
- Η θλιπτική αντοχή και των δύο κονιαμάτων παρουσιάζεται βελτιωμένη συγκριτικά με τις πάστες για ποσοστό μετακαολίνη από 5% και πάνω. Εξαίρεση αποτελεί η σύνθεση του κονιάματος (2/1) με ποσοστό MK 10% και η αντίστοιχη του κονιάματος (3/1) με ποσοστό MK 7.5%.
- Η θλιπτική αντοχή των κονιαμάτων (3/1) παρουσιάζεται βελτιωμένη συγκριτικά με τα κονιάματα (2/1), κυρίως στα μικρότερα ποσοστά μετακαολίνη και πιο συγκεκριμένα για ποσοστά MK 2.5%, 5% και 10%. Ενώ για μεγαλύτερα ποσοστά MK 7.5%, 12.5% και 15% η θλιπτική αντοχή των κονιαμάτων (2/1) παρουσιάζει μεγαλύτερες τιμές.

Ενώ, όσον αφορά τις συνθέσεις στις οποίες χρησιμοποιήθηκε ως πρόσθετο ψημένος και αλεσμένος καολίνης, προκύπτουν τα εξής συμπεράσματα :

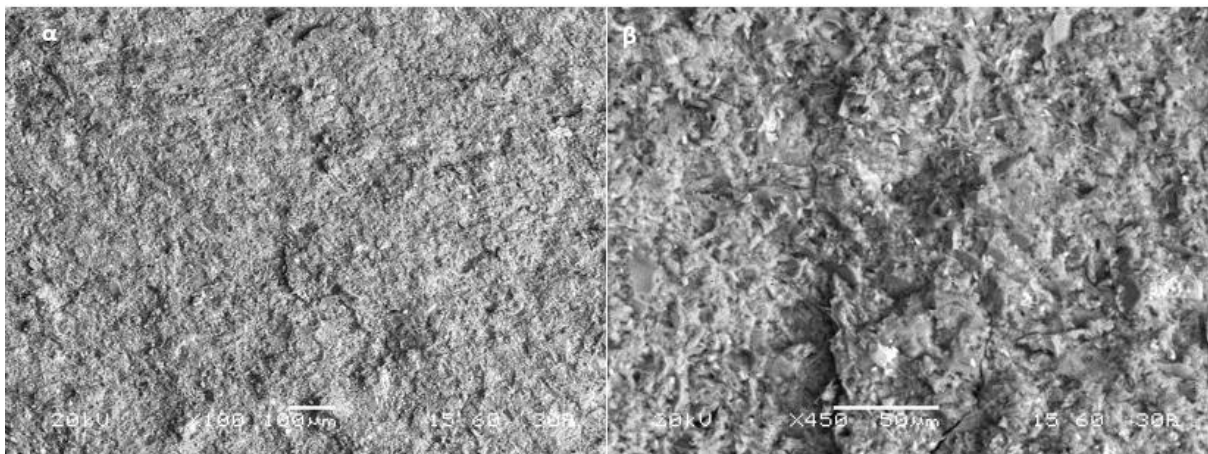
- Η θλιπτική αντοχή των συνθέσεων με τη χρήση ψημένου και αλεσμένου καολίνη, αυξάνεται επίσης σε πολύ μεγάλο βαθμό, μέχρι ποσοστό μετακαολίνη το 10%. Για μεγαλύτερα ποσοστά, η θλιπτική αντοχή είτε μειώνεται, όπως στις πάστες και τα κονιάματα (3/1), είτε παραμένει σταθερή, όπως στα κονιάματα (2/1).
- Η θλιπτική αντοχή στις συνθέσεις παστών, από τη σύνθεση αναφοράς έως την σύνθεση με ποσοστό μετακαολίνη 10%, αυξάνεται σε ποσοστό 43%, ενώ στις συνθέσεις των τσιμεντοκονιαμάτων αυξάνεται σε ακόμα μεγαλύτερο ποσοστό, με τις αντίστοιχες συνθέσεις MOR(2/1) να παρουσιάζουν αύξηση της θλιπτικής αντοχής 50% και τις αντίστοιχες συνθέσεις MOR(3/1) να έχουν μία αύξηση της τάξεως του 68%.
- Η μεγαλύτερη τιμή της θλιπτικής αντοχής καταγράφηκε για τις συνθέσεις 0.45 CEM – MK 10% και 7.5% με αντοχή τα 69.36 και 67.05 MPa, αντίστοιχα.
- Η θλιπτική αντοχή των παστών παρουσιάζεται βελτιωμένη συγκριτικά με τις συνθέσεις κονιαμάτων για ποσοστό μετακαολίνη έως 10%. Ενώ, για ποσοστό 12.5% και 15%, τα κονιάματα παρουσιάζουν μεγαλύτερη θλιπτική αντοχή.
- Η θλιπτική αντοχή των κονιαμάτων (3/1) παρουσιάζεται βελτιωμένη συγκριτικά με τα κονιάματα (2/1), με εξαίρεση τις συνθέσεις με ποσοστό MK 12.5% και 15%, που εμφανίζουν παραπλήσια θλιπτική αντοχή.

5.6 Αποτελέσματα μικροσκοπίας SEM

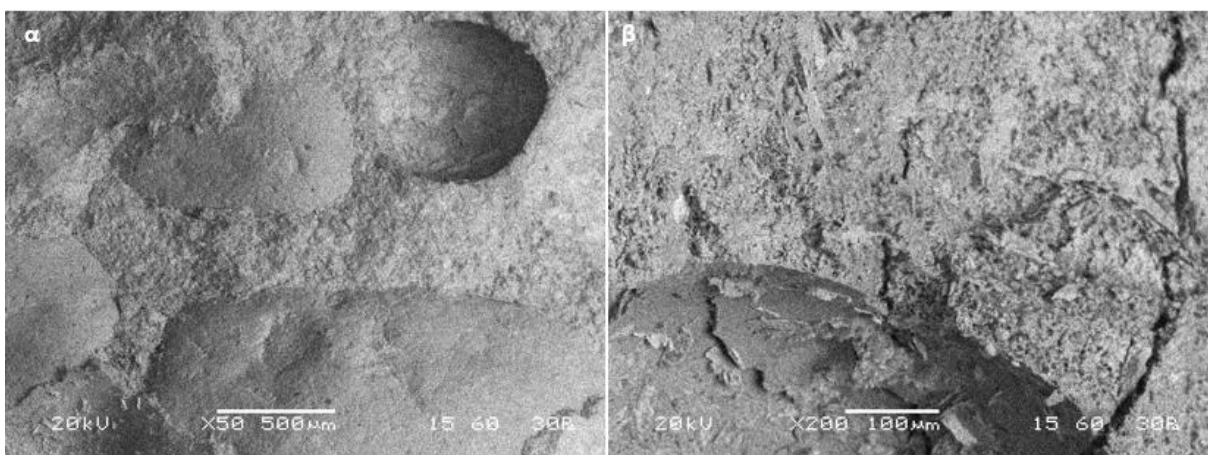
Με τη βοήθεια του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης (SEM), στις παρακάτω εικόνες παρουσιάζεται η δομή των παστών και κονιαμάτων τσιμέντου με τη χρήση είτε ψημένου καολίνη είτε ψημένου και αλεσμένου. Πιο συγκεκριμένα, μελετάται η μικροδομή των παστών και κονιαμάτων τσιμέντου αναλογίας άμμου προς τσιμέντο 3/1, με 2.5% και 15% μετακαολίνη σε μεγέθυνση x100 και x450 παρουσιάζονται στις εικόνες 5.1-5.8. Οι εικόνες στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο ελήφθησαν αφότου τα δοκίμια είχαν θραυστεί, κατά τη διάρκεια της μονοαξονικής θλίψης.



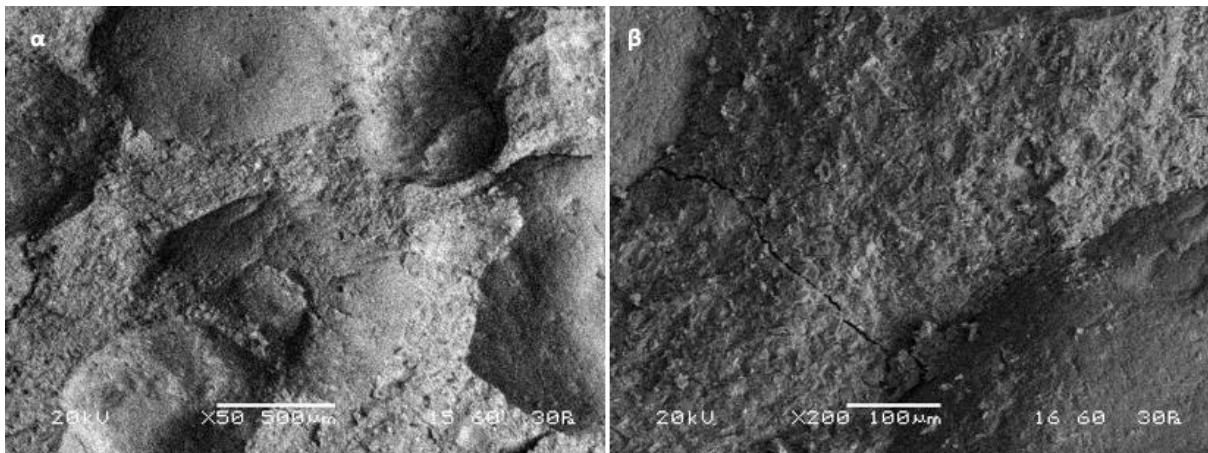
Εικόνα 5.1 SEM πάστας τσιμέντου με 2.5% καολίνη Ε που έχει υποστεί έψηση στους 800°C για 8 ώρες σε μεγέθυνση α) x100 και β) x450



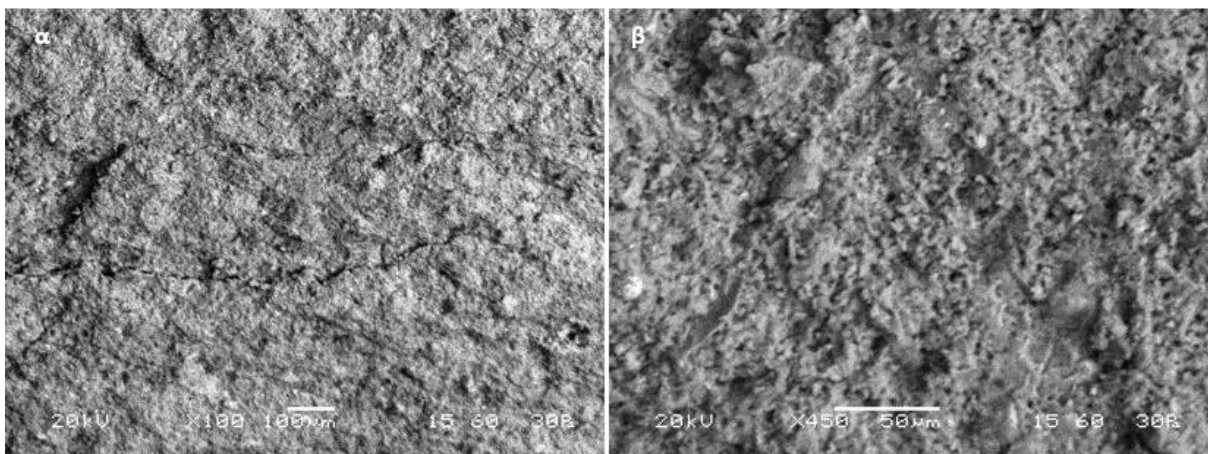
Εικόνα 5.2 SEM για πάστα τσιμέντου με 15% καολίνη Ε που έχει υποστεί έψηση στους 800°C για 8 ώρες σε μεγέθυνση α) x100 και β) x450



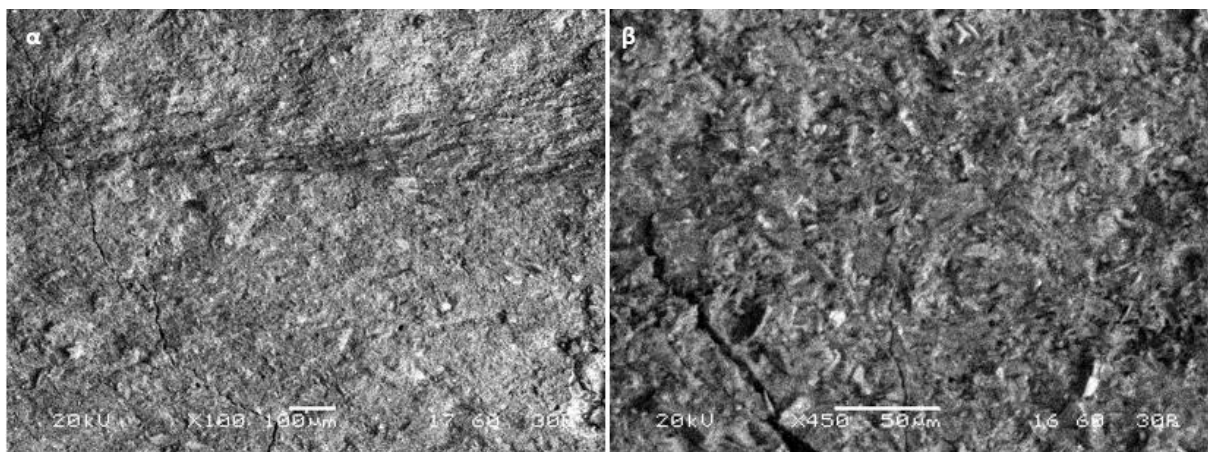
Εικόνα 5.3 SEM για κονίαμα τσιμέντου 3/1 με 2.5% καολίνη Ε που έχει υποστεί έψηση στους 800°C για 8 ώρες σε μεγέθυνση α) x100 και β) x450



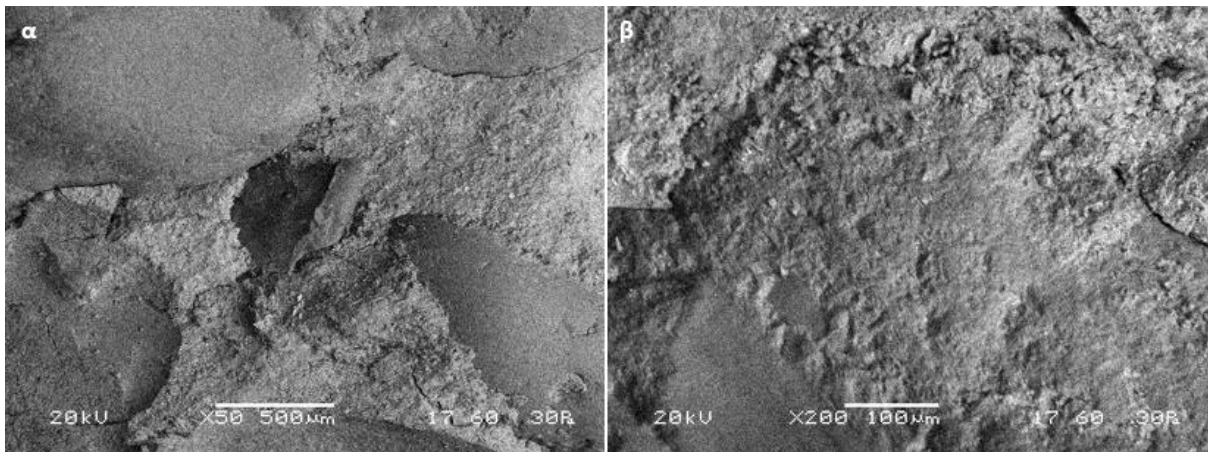
Εικόνα 5.4 SEM για κονίαμα τσιμέντου 3/1 με 15% καολίνη Ε που έχει υποστεί έψηση στους 800°C για 8 ώρες σε μεγέθυνση α) x100 και β) x450



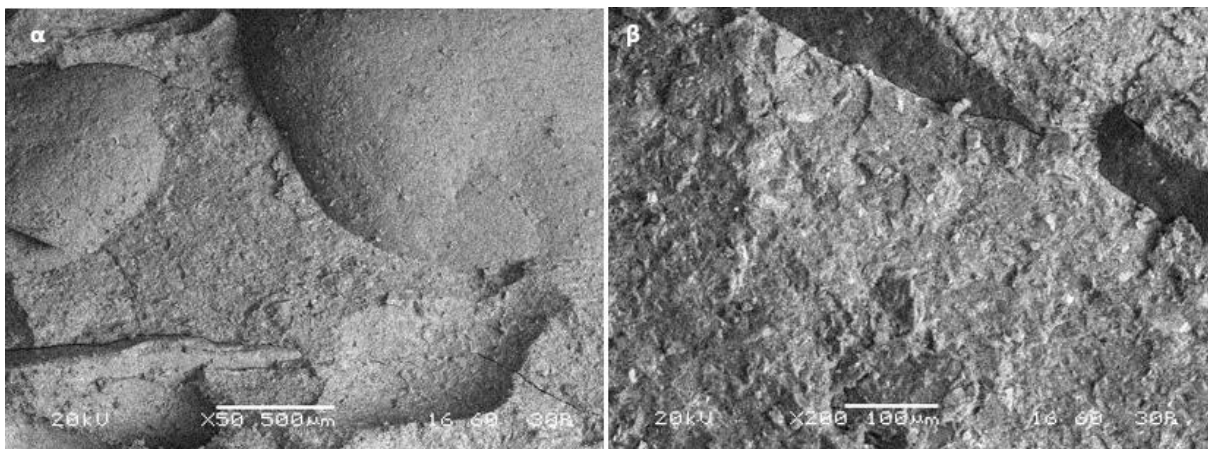
Εικόνα 5.5 SEM για πάστα τσιμέντου με 2.5% καολίνη Ε που έχει υποστεί έψηση στους 800°C για 8 ώρες και λειοτρίβηση σε 200rpm για 7 ώρες σε μεγέθυνση α) x100 και β) x450



Εικόνα 5.6 SEM για πάστα τσιμέντου με 15% καολίνη Ε που έχει υποστεί έψηση στους 800°C για 8 ώρες και λειοτρίβηση σε 200rpm για 7 ώρες σε μεγέθυνση α) x100 και β) x450



Εικόνα 5.7 SEM για κονίαμα τσιμέντου 3/1 με 2,5% καολίνη Ε που έχει υποστεί έψηση στους 800°C για 8 ώρες και λειοτρίβηση σε 200rpm για 7 ώρες σε μεγέθυνση α) x100 και β) x450



Εικόνα 5.8 SEM για κονίαμα τσιμέντου 3/1 με 15% καολίνη Ε που έχει υποστεί έψηση στους 800°C για 8 ώρες και λειοτρίβηση σε 200rpm για 7 ώρες σε μεγέθυνση α) x100 και β) x450

Στις πάστες, συγκρίνοντας τις εικόνες 5.1 και 5.2 παρατηρείται ότι τα δείγματα με 15% μετακαολίνη παρουσιάζουν πιο συμπαγή δομή και μικρότερο πορώδες από αυτά με 2,5% μετακαολίνη.

Στα κονιάματα τσιμέντου μέσω του SEM, παρατηρούνται οι δυο φάσεις και πιο συγκεκριμένα η μητρική (τσιμέντο) και οι κόκκοι της άμμου, οι οποίοι είναι πολύ καλά ενσωματωμένοι στην πάστα του τσιμέντου. Η συνοχή πάστας τσιμέντου – αδρανών είναι πολύ καλή σε όλα τα δείγματα, τόσο με 2,5% όσο και με 15% μετακαολίνη (εικόνες 5.3 και 5.4).

Η σύγκριση μεταξύ των εικόνων 5.1 – 5.4 που αφορούν δείγματα με ψημένο καολίνη και των εικόνων 5.5 – 5.8 που αφορούν τα υλικά με ψημένο και λειοτριβημένο καολίνη επιβεβαιώνει το συμπέρασμα που έχει ήδη εξαχθεί από τις μετρήσεις θλιπτικής αντοχής αλλά και τις δοκιμές *chapelle*, ότι δεν φαίνεται να υπάρχει διαφοροποίηση μεταξύ του ψημένου καολίνη και του ψημένου και λειοτριβημένου.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής, ήταν η διερεύνηση της επίδρασης χρήσης μετακαολίνη χαμηλής καθαρότητας στις ιδιότητες παστών και κονιαμάτων τσιμέντου. Συνολικά παρήχθησαν 36 συνθέσεις παστών και κονιαμάτων τσιμέντου με ποσοστά μετακαολίνη από 2.5% έως 15% καθώς και τρεις συνθέσεις αναφοράς, χωρίς την προσθήκη μετακαολίνη. Από τα πειράματα που έγιναν και την μετέπειτα μελέτη και επεξεργασία των αποτελεσμάτων τους, προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Μέσω της άλεσης του ήδη ψημένου καολίνη, παρατηρείται η επιδείνωση των ρεολογικών ιδιοτήτων και η βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των παστών και κονιαμάτων τσιμέντου.
- Τα αποτελέσματα της δοκιμής Chapelle έδειξαν ότι οι στροφές (200rpm) στις οποίες αλέστηκε ο καολίνης δεν ήταν αρκετές, ώστε να αυξηθεί η ποζολανικότητα του υλικού.
- Η εργασιμότητα των παστών και κονιαμάτων τσιμέντου σημείωσε σημαντική μείωση, όσο το ποσοστό του μετακαολίνη αυξανόταν. Η σύνθεση, της οποίας η εργασιμότητα μειώθηκε περισσότερο από τις 36 συνολικά, ήταν το κονίαμα με αναλογία άμμου προς τσιμέντο 3/1 και ποσοστό μετακαολίνη 15%.
- Η θλιπτική αντοχή αυξήθηκε σε θεαματικό βαθμό σε όλες τις συνθέσεις, συγκριτικά με τις συνθέσεις αναφοράς. Γεγονός που επισημαίνει τη σημαντική επίδραση του μετακαολίνη στις μηχανικές ιδιότητες των παστών και κονιαμάτων τσιμέντου, παρόλη τη χαμηλή καθαρότητα του.
- Η κατακόρυφη αύξηση της θλιπτικής αντοχής, σταθεροποιήθηκε τόσο στις συνθέσεις παστών, όσο και σε αυτές των κονιαμάτων στην περίπτωση της χρήσης ψημένου καολίνη, όταν το ποσοστό του μετακαολίνη έφτασε το 7.5%. Αντίστοιχα για τις συνθέσεις με

ψημένο και αλεσμένο καολίνη η θλιπτική αντοχή σταθεροποιήθηκε σε ποσοστό μετακαολίνη 10%.

- Μεγαλύτερη αύξηση στην θλιπτική αντοχή παρουσίασαν οι συνθέσεις τσιμεντοκονιαμάτων 3/1, συγκριτικά με τις συνθέσεις αναφοράς, αύξηση που έφτασε ακόμα και το 68%.
- Η μεγαλύτερη τιμή θλιπτικής αντοχής (69,36 MPa) σημειώθηκε στη σύνθεση πάστας με ποσοστό ψημένου και αλεσμένου καολίνη 10%.

7. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Μπαδογιάννης, Γ. Ε., (2002): Αξιοποίηση Καολινών στην Τεχνολογία Σκυροδέματος, Αθήνα: ΕΜΠ- Σχολή Χημικών Μηχανικών
2. Duda W.,(1975), Cement data book, Wesbaden, Berlin: Vauverlag Gmb H.
3. Neville A. M. & Brooks J. J., (1999). Concrete Technology, London: Longman.
4. Περράκη-Λοϊσίου Θ., (2007): Βιομηχανικά Ορυκτά και Πετρώματα (Σημειώσεις), Εθνικό Μετσόβειο Πολυτεχνείο Αθηνών, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων-Μεταλλουργών, Τομέας Γεωλογικών Επιστημών.
5. Τσακαλάκης, Κ. Γ., (2009): Τεχνολογία Παραγωγής Τσιμέντου και Σκυροδέματος, Αθήνα: Ε.Μ.Π. - Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων- Μεταλλουργών.
6. Phung T. T. H., (2013). Metakaolin as an Additive in Composite Cement.
7. Τσίμας Σ. & Τσιβιλής Σ., (2011): Επιστήμη και Τεχνολογία Τσιμέντου, Αθήνα: Ε.Μ.Π. - Σχολή Χημικών Μηχανικών.
8. P. Kumar, Mehta, Monteiro & Paulo J., 2006. Concrete Microstructure, Properties and Materials. s.l.:McGraw-Hill.
9. Duggal, S. K., 2008. Building Materials. New Delhi: New Age International Publishers
10. Γκούντας, Ι. Δ., 2014. Σκυρόδεμα και Δομικές Κατασκευές
11. Τριανταφύλλου, Α., 2011. Δομικά Υλικά. 9η Έκδοση
12. Moropoulou, A. and Lampropoulos, K. (2014) ‘Cement & Concrete’

13. Παπαγιάννης, Ι. & Οικονόμου, Ν., 1997. Σημειώσεις Δομικών Υλικών
14. G. Batis, P. Pantazopoulou, S. Tsivilis, E. Badogiannis (2005): The effect of metakaolin on the corrosion behavior of cement mortars, *Journal of Cement & Concrete Composites*
15. Καραστεργίου, Α., 2009. Μελέτη της Συνεργατικής Υδροθερμικής Κατεργασίας Ιπτάμενης Τέφρας και Μεταλλουργικής Σκωρίας για την Παρασκευή Δομικών Υλικών
16. Smith R.M. and Collins L., 1993. *Aggregates: Sand, gravel and crushed rock aggregates for construction purposes (2nd ed)*. Geological Society Engineering Geology
17. Τσίτουρας Α. (2013), Αξιοποίηση Ελληνικών καολινών στην τεχνολογία των γεοπολυμερών (Διδακτορική Διατριβή), Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Χημικών Μηχανικών
18. Hellenic Cement Industry Association - <http://www.hcia.gr/>
19. Lafarge - <https://www.lafarge.gr/>
20. CEMBUREAU - The European Cement Association - <https://cembureau.eu>
21. Texnikos.gr - <https://www.texnikos.gr/domisi/61-prosmikta-skyrodematos>
22. Τεχνικό Επιμελητήριο Ελλάδος - http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/P_CEMENT
23. Rinker materials , concrete company - <https://www.rinkerpipe.com/TechnicalInfo/files/InfoBriefs/IS102TypesPortlandCement.pdf>
24. Isomat, www.isomat.gr

25. Marmoline, www.marmoline.gr
26. Ravago , greece.ravagobuildingsolutions.com
27. Γεωπονικό Πανεπιστήμιο Αθηνών , www.aua.gr
28. Pavetest , www.pavetest.gr
29. ΕΚΠΑ , Τμήμα Γεωλογίας και Γεωπεριβάλλοντος,
https://eclass.upatras.gr/modules/document/file.php/GEO317/18_5_9_X-Ray%20and%20XRD%20Theory%20-%20XRD%20evaluation%20-%20NKUA%202017.pdf
30. Τεχνικό Επιμελητήριο Αθηνών ,
http://portal.tee.gr/portal/page/portal/MATERIAL_GUIDES/P_CEMENT
31. Γριζιώτη Α. (2012), Έλεγχος συμβατότητας συνθετικών κονιαμάτων με τους δομικούς λίθους του ενετικού φρουρίου Κουλέ (Διπλωματική), Πολυτεχνείο Κρήτης, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων
32. Ταταρόπουλος Ν. (2019), Πρότυπα Ποιότητας Σκυροδέματος (Διπλωματική), Πανεπιστήμιο Πειραιώς, Τμήμα Οργάνωσης και Διοίκησης Επιχειρήσεων
33. Φίτος Μ. (2014), Ποζολανική δραστικότητα μηχανικά τροποποιημένων μετακαολινών και εφαρμογή τους στην τεχνολογία σκυροδέματος (Διπλωματική), Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Μηχανικών Μεταλλείων Μεταλλουργών
34. Γκαμαράζης Π. (2018), Μελέτη παραμέτρων ανθεκτικότητας σκυροδέματος με τσιμεντοειδή πρόσθετα (Διπλωματική), Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών
35. Κοκκίνη Μαρία (2011), Αξιοποίηση του βιομηχανικού παραπροϊόντος (CBPD) στην παραγωγική διαδικασία δομικών στοιχείων – σύνθεση, μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα (Διπλωματική), Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο, Σχολή Πολιτικών Μηχανικών

36. Δημητρίου Σ. (2007), Μελέτη Σύνθεσης Σκυροδέματος (Διπλωματική), Ανώτατο Τεχνολογικό Εκπαιδευτικό Ίδρυμα Θεσσαλονίκης, Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών
37. e-Αρχιμήδης , www.e-archimedes.gr
38. Interbeton , <http://www.interbeton.gr/>