



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΠΟΛΙΤΙΚΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

*«Αξιοποίηση του βιομηχανικού παραπροϊόντος (CBPD) στην
παραγωγική διαδικασία δομικών στοιχείων – σύνθεση, μηχανικές
ιδιότητες και ανθεκτικότητα»*

ΚΟΚΚΙΝΗ ΜΑΡΙΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ: Ε. ΜΠΑΔΟΓΙΑΝΝΗΣ

ΑΘΗΝΑ, 2011

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε υπό την επίβλεψη του Ευστράτιου Μπαδογιάννη, Λέκτορα στον τομέα Δομοστατικής της Σχολής Πολιτικών Μηχανικών. Έχει ως στόχο τη μελέτη της δυνατότητας αξιοποίησης του βιομηχανικού παραπροϊόντος της παραγωγικής διαδικασίας του τσιμέντου CBPD (Cement Bypass Dust), για την παρασκευή δομικών υλικών. Στο πλαίσιο αυτό μελετήθηκε η επίδραση του ποσοστού προσθήκης CBPD στις φυσικές και μηχανικές ιδιότητες και στην ανθεκτικότητα των δομικών στοιχείων.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαιτέρως τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Ευστράτιο Μπαδογιάννη για τη συνεχή καθοδήγηση και την αμέριστη συμπαράσταση από το ξεκίνημα μέχρι την ολοκλήρωση της διπλωματικής εργασίας. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Επ. Καθ. ΕΜΠ, κ. Χ. Ζέρη για τις συμβουλές του κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας. Τέλος, ευχαριστώ την Καθ. ΕΜΠ κ. Ε. Βιντζηλαίου για την επιστημονική της συμμετοχή σε αυτή τη σημαντική εκπαιδευτική διαδικασία.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω το προσωπικό του εργαστηρίου ποιοτικού ελέγχου σκυροδέματος της Α.Ε. Τσιμέντων TITAN για τη συνδρομή τους στην παρασκευή και πειραματική μελέτη των δοκιμίων σκυροδέματος. Επίσης ευχαριστώ τον Υ.Δ. Ι. Σφήκα, για την πολύτιμη βοήθεια του στις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν στο ΕΟΣ.

Επιπλέον θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου και τα αδέρφια μου για την αγάπη τους και την υπομονή τους καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΒΑΣΙΚΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ.....	1
1.1 ΤΣΙΜΕΝΤΟ (CEMENT).....	1
1.1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
1.1.2. ΣΥΝΘΕΤΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ ΠΟΡΤΛΑΝΤ	1
1.1.3. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ	4
1.1.3.1. ΛΕΠΤΟΤΗΤΑ	4
1.1.3.2. ΧΡΟΝΟΣ ΠΗΞΗΣ Η ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΣΥΝΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ	4
1.1.3.3. ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΟΓΚΟΥ - SOUNDNESS-ΔΟΚΙΜΗ LE-CHAPELLIER ..	5
1.1.3.4. ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ ΚΑΙ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ.....	5
1.2. ΑΔΡΑΝΗ ΥΛΙΚΑ.....	6
1.3. ΝΕΡΟ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΑ.....	7
1.2. ΣΥΝΘΕΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	9
1.3.ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	11
1.3.1. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΝΩΠΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	11
1.3.1.1. ΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑ.....	11
1.3.1.2 .ΜΟΝΑΔΙΑΙΟ ΒΑΡΟΣ	12
1.3.2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΚΛΗΡΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	13
1.3.2.1. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	13
1.3.2.2. ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΟΓΚΟΥ	16
1.3.2.3. ΕΡΠΥΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΥΡΡΙΚΝΩΣΗ	16
1.4. ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ.....	20
1.4.1. Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΟΥ ΠΟΡΩΔΟΥΣ	22
1.4.2. ΣΥΝΗΘΕΙΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΦΘΟΡΑΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ	23
1.4.2.1. ΑΛΚΑΛΟΠΥΡΙΤΙΚΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ.....	24
1.4.2.2. ΠΡΟΣΒΟΛΗ ΑΠΟ ΘΕΪΚΑ	25
1.4.2.3. ΠΡΟΣΒΟΛΗ ΑΠΟ ΟΞΕΑ.....	26
1.4.2.4. ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΟΠΛΙΣΜΟΥ	26
1.4.2.5. ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ	27
1.4.2.6. ΕΞΑΝΘΙΣΗ.....	28
1.4.2.7. ΠΑΓΕΤΟΣ.....	30
1.4.2.8. ΠΥΡΚΑΓΙΑ.....	30

Αξιοποίηση του βιομηχανικού παραπροϊόντος (CBPD) στην παραγωγική διαδικασία δομικών στοιχείων – σύνθεση, μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα.

1.5. ΠΡΟΣΘΕΤΑ	31
1.5.1. ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΠΟΖΟΛΑΝΕΣ	31
1.5.2. ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ.....	35
2. ΤΣΙΜΕΝΤΟΛΙΘΟΙ	37
2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	37
2.2. ΣΥΝΘΕΣΗ - ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ	37
2.3. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ.....	37
3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ.....	39
3.1. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	39
3.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ.....	41
3.2.1. ΝΩΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	41
3.2.2. ΣΚΛΗΡΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ.....	42
3.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ.....	44
3.3.1. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΑΘΙΣΗΣ	44
3.3.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΑΔΙΑΙΟΥ ΒΑΡΟΥΣ	45
3.3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗΣ ΚΑΙ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ 5 ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ.....	46
3.3.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗ ΥΔΑΤΟΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ	47
3.3.5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΟΓΚΟΥ	49
3.3.6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΕΞΑΝΘΙΣΗ.....	50
3.4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	54

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

1. ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ - ΒΑΣΙΚΑ ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ

1.1 ΤΣΙΜΕΝΤΟ (CEMENT)

1.1.1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Συνδετική ύλη ή κονία είναι κάθε υλικό το οποίο με κατάλληλη προεργασία για παράδειγμα όταν αναμειχθεί με νερό μπορεί να γίνει πλαστικό, να εκδηλώνει συγκολλητικές ιδιότητες και βαθμιαία να στερεοποιείται έως ότου σχηματίσει μία σκληρή και συμπαγή μάζα με φυσικές και μηχανικές ιδιότητες. Η αιτία των συγκολλητικών ιδιοτήτων μπορεί να οφείλεται στην εξάτμιση του νερού όπως συμβαίνει στον πηλό ή λόγω χημικών αντιδράσεων όπως συμβαίνει στην άσβεστο ή στο τσιμέντο.

Τσιμέντο Πόρτλαντ είναι προϊόν μετά από έψηση σε θερμοκρασία κλινκεροποίησης ($1380\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $1420\text{ }^{\circ}\text{C}$) ενός κατάλληλα αλεσμένου πλήρως ομογενοποιημένου μείγματος που αποτελείται από 75% ασβεστολιθικά υλικά και 25% αργιλοπυριτικά υλικά και συνάλεση του προκύπτοντος προϊόντος που καλείται κλίνκερ με κατάλληλη ποσότητα γύψου $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ για τον έλεγχο της πήξης.

Το τσιμέντο Πόρτλαντ είναι υδραυλική κονία, δηλαδή κάτω από την επίδραση του νερού σχηματίζει σταθερές ένυδρες ενώσεις που είναι ελάχιστα υδατοδιαλυτές και έχουν μεγάλη συνάφεια μεταξύ τους και με τα αδρανή. Οι ενώσεις αυτές με την πάροδο του χρόνου αυξάνουν τη συνοχή των πολτών και των κονιαμάτων που προέρχονται από αυτές με αποτέλεσμα την ανάπτυξη αντοχών. Υπάρχουν και οι αερικές κονίες οι οποίες αναπτύσσουν αντοχές εκτιθέμενες στον αέρα, όπως ο ασβέστης. Ο υδραυλικός χαρακτήρας του τσιμέντου αποδίδεται κυρίως στα προϊόντα ενυδάτωσης πυριτικό διασβέστιο (C_2S) και στο πυριτικό τριασβέστιο (C_3S) που είναι τα κύρια ορυκτολογικά συστατικά του κλίνκερ και αποτελούν τα 2/3 της μάζας του.

1.1.2. ΣΥΝΘΕΤΑ ΤΣΙΜΕΝΤΑ ΠΟΡΤΛΑΝΤ

Τα σύνθετα τσιμέντα Πόρτλαντ είναι τα τσιμέντα που προέρχονται από τη συνάλεση κλίνκερ-Πόρτλαντ, γύψου και ποζολάνης φυσικής ή

τεχνητής. Αναλυτικά τα συστατικά των σύνθετων τσιμεντών Πόρτλαντ κατά EN 197-1 είναι :

1. Κλίνκερτσιμεντού Πόρτλαντ, K
Υδραυλικό υλικό που συνίσταται τουλάχιστον κατά τα 2/3 κ.β. από C_3S και C_2S ενώ το υπόλοιπο από τις αργλικές και σιδηροαργλικές φάσεις του κλίνκέρ. Δευτερεύοντα συστατικά είναι η γύψος και το ασβεστολιθικό φίλερ.
2. Σκωρία υψικαμίνου, S
Υλικό με λανθάνουσες υδραυλικές ιδιότητες παρουσιάζει και ποζολανικές ιδιότητες όταν ενεργοποιείται κατάλληλα.
3. Ποζολανικά υλικά, P, Q
Φυσικά ή βιομηχανικά υλικά πυριτικής ή αργιλοπυριτικής σύστασης. Μόνα τους όταν αναμειγνύονται με το νερό δε σκληρύνονται αλλά λεπτοαλεσμένα σε θερμοκρασία περιβάλλοντος με παρουσία νερού αντιδρούν με το $Ca(OH)_2$ που προκύπτει από την ενυδάτωση των συστατικών του κλίνκερ και σχηματίζουν ένυδρες ασβεστοπυριτικές και ασβεστοαργλικές ενώσεις που αναπτύσσουν αντοχές.
4. Ιπτάμενες τέφρες, V, W
5. Ψημένος σχιστόλιθος, T
6. Ασβεστόλιθος, L, LL
7. Πυριτική παιπάλη, D

Αξιοποίηση του βιομηχανικού παραπροϊόντος (CBPD) στην παραγωγική διαδικασία δομικών στοιχείων – σύνθεση, μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα.

Πίνακας 1.1. Σύνθετα τσιμέντα Πόρτλαντ κατά EN 197-1.

Κύριοι τύποι	Ονομασία των 27 προϊόντων (τύποι κοινών τσιμέντων)		Σύνθεση (επι της % κατά μάζα)										Δευτερεύοντα συστατικά		
			Κύρια συστατικά												
			Κλίνκερ	Σκωρία υψικαμίνου	Πυριτική παπάλη	Ποζολάνη	Ιπτάμενες τέφρες			Ψημένος σχιστόλιθος	Ασβεστό- λιθος				
K	S	D	P	Q	V	W	T	L	LL						
CEM I	Τσιμέντο Πόρτλαντ	CEM I	95-100												0-5
		CEM II/A-S	80-94	6-20											0-5
		CEM II/B-S	65-79	21-35											0-5
	Τσιμέντο Πόρτλαντ με πυριτική παπάλη	CEM II/A-D	90-94		6-10										0-5
		CEM II/A-P	80-94			6-20									0-5
		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
		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
		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
		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	
		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/A	65-89	-	<-----11-35----->										0-5
		CEM IV/B	45-64	-	<-----36-55----->										0-5
		CEM V/A	40-64	18-30	<-----18-30----->										0-5
		CEM V/B	20-39	31-50	<-----31-50----->										0-5

α) Οι τιμές του πίνακα αναφέρονται στο σύνολο των κυρίων και δευτερευόντων συστατικών
 β) Το ποσοστό της πυριτικής παπάλης περιορίζεται στο 10%
 γ) Στα τσιμέντα Πόρτλαντ-σύνθετα CEM II/A-M και CEM II/B-M, στα ποζολανικά 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

1.1.3. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ

Στο κεφάλαιο αυτό αναφέρονται οι σημαντικότερες ιδιότητες του τσιμέντου. Μπορούν να διακριθούν σε «φυσικές», όπως είναι η λεπτότητα, οι χρόνοι πήξης, η κανονική συνεκτικότητα και η σταθερότητα όγκου και «μηχανικές», με σημαντικότερες την αντοχή σε θλίψη και εφελκυσμό.

1.1.3.1. ΛΕΠΤΟΤΗΤΑ

Με τον όρο αυτό αναφερόμαστε στο μέσο μέγεθος των σωματιδίων. Η αύξηση της λεπτότητας συντελεί:

1. Στην ανάπτυξη μεγαλύτερων αντοχών στις πρώιμες ηλικίες
2. Στην επίτευξη καλύτερης εργασιμότητας
3. Στην έκλυση μεγαλύτερης θερμότητας κατά την ενυδάτωση
4. Στη μείωση της πιθανότητας απόμειξης του τσιμέντου από τα υπόλοιπα συστατικά του
5. Στην αύξηση της απαίτησης σε νερό
6. Στην ανάπτυξη μεγαλύτερης τάσης συρρίκνωσης
7. Στη μείωση της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος σε κύκλους ψύξης – απόψυξης καθώς και στην αύξηση των αναγκών αποθήκευσης.

Η λεπτότητα εκτιμάται με τον προσδιορισμό της κοκκομετρικής κατανομής των σωματιδίων και με τον υπολογισμό της ειδικής επιφάνειας δηλαδή της επιφάνειας των σωματιδίων ανά 1gr ή 1 kgr τσιμέντου (κατά Blaine, Wagner).

1.1.3.2. ΧΡΟΝΟΣ ΠΗΞΗΣ Η ΚΑΝΟΝΙΚΗ ΣΥΝΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

Αναφέρονται σε φυσικές ιδιότητες της πάστας του τσιμέντου και εξαρτώνται άμεσα από το περιεχόμενο νερό. Η δοκιμή γίνεται με τη συσκευή Vicat που προσδιορίζεται η ακριβής ποσότητα νερού σύμφωνα με το πρότυπο EN-196-3. Αρχή πήξης είναι η χρονική στιγμή στην οποία πάστα είναι τόσο συνεκτική ώστε δε μπορεί πλέον να διαμορφωθεί σε καλούπι (2-4 ώρες). Τέλος πήξης

Αξιοποίηση του βιομηχανικού παραπροϊόντος (CBPD) στην παραγωγική διαδικασία δομικών στοιχείων – σύνθεση, μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα.

είναι η χρονική στιγμή που το τσιμέντο έχει σκληρυνθεί σε σημείο ώστε να αντέχει ένα μικρό φορτίο(5 – 8ώρες).

1.1.3.3. ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ ΟΓΚΟΥ-SOUNDNESS-ΔΟΚΙΜΗ LE-CHAPELLIER

Η δοκιμή αυτή έχει ως σκοπό τον έλεγχο της πάστας του τσιμέντου σε σχέση με την μεταβολή του όγκου που μπορεί να συμβεί μετά την πήξη. Για παράδειγμα η αύξηση αυτή μπορεί να οφείλεται σε καθυστερημένη ενυδάτωση των MgO και CaO καθώς και στις αντιδράσεις της γύψου με το C₃A που γίνονται αργά στο εσωτερικό της τσιμεντόπαστας και μπορεί να εκδηλωθεί μετά από αρκετούς μήνες ως και λίγα χρόνια.

1.1.3.4. ΑΝΤΟΧΗ ΣΕ ΘΛΙΨΗ ΚΑΙ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ

Οι μηχανικές αντοχές του τσιμέντου αποτελούν την πιο χαρακτηριστική του ιδιότητα, με τις αντίστοιχες δοκιμές να αναφέρονται σε όλα τα διεθνή πρότυπα. Κυρίως μετρώνται η αντοχή σε θλίψη (compressivestrength) και η αντοχή σε εφελκυσμό (flexuralstrength).

Η μέτρηση των αντοχών σύμφωνα και με το Ευρωπαϊκό πρότυπο EN196-1, γίνεται σε ηλικίες 1, 2, 7 και 28 ημερών, σε κατάλληλα δοκίμια.

Δύο είναι οι βασικοί παράγοντες που επιδρούν στην ανάπτυξη των μηχανικών αντοχών: η χημική – ορυκτολογική του σύσταση και η λεπτότητα του.

Όσον αφορά στην ορυκτολογική σύσταση του τσιμέντου, τέσσερα βασικά ορυκτολογικά συστατικά του κλίνκερ(C₃S,C₃A,C₂S και C₄AF) καθορίζουν την ανάπτυξη των αντοχών του τσιμέντου. Έτσι τα C₃S,C₃Aσυντελούν στην ανάπτυξη των αντοχών μέχρι τις 28 ημέρες και τα C₂S και C₄AF προσδίδουν τις αντοχές σε μεγαλύτερες ηλικίες.

Παράλληλα η ανάπτυξη των αντοχών του τσιμέντου, επηρεάζεται από τη χημική του σύσταση, και συγκεκριμένα από την περιεκτικότητα του σε «ελεύθερα» – διαλυτά αλκάλια, σε θειικά (SO₃) και σε ελεύθερη άσβεστο (fCaO).

Τα διαλυτά αλκάλια υπάρχουν στο κλίνκερ υπό μορφή θειικών ενώσεων και η περιεκτικότητας τους εκφράζεται με το ισοδύναμο K₂O (K₂O_{eq}= K₂O+1.52Na₂O)και κυμαίνεται από 0-1.5 % κ.β..Τα διαλυτά αλκάλια, έχουν

1. Σκυρόδεμα – βασικά συστατικά

Θετική επίδραση στις πρώιμες αντοχές και αρνητική στις αντοχές μετά τις 7 ημέρες.

Τα θειϊκά προέρχονται κυρίως από την περιεχόμενη γύψο. Σύμφωνα με το EN 197-1, η μέγιστη επιτρεπόμενη περιεκτικότητα είναι 3.5-4.0 %, ανάλογα με τον τύπο του τσιμεντού. Αυξημένη περιεκτικότητα σε θειϊκά (>2.5 %), οδηγεί σε μείωση των αντοχών.

Σχετικά με το fCaO, η αυξημένη περιεκτικότητά του, προοδευτικά συντελεί αρνητικά στη μηχανική αντοχή της τσιμεντόπαστας, λόγω της ρηγμάτωσης που προκαλεί η καθυστερημένη ενυδάτωση του και ο σχηματισμός Ca(OH)₂.

Τέλος, η λεπτότητα του τσιμεντού είναι ιδιαίτερα σημαντική για την ανάπτυξη των αντοχών του. Τα περισσότερα τσιμέντα έχουν λεπτότητα 2500-4500 cm²/g. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, αύξηση της λεπτότητας κατά 100 cm²/g, οδηγεί σε αύξηση της f₂₈ από 0.5-1 MPa. Η επίδραση της λεπτότητας είναι ιδιαίτερα σημαντική στις πρώιμες ηλικίες αντοχών και λιγότερο σε μεγαλύτερες ηλικίες.

1.2. ΑΔΡΑΝΗ ΥΛΙΚΑ

Τα αδρανή υλικά οφείλουν την ονομασία τους στο γεγονός ότι παραμένουν χημικώς αδρανή στο σκυρόδεμα. Τα αδρανή τα οποία είναι βασικό συστατικό του σκυροδέματος είναι άθραυστες ή θραυσμένες φυσικές ή τεχνητές ορυκτές ή ανακυκλωμένες ύλες. Συνδέονται ή συγκολλούνται μεταξύ τους και συμβάλλουν μηχανικά μόνο στην αντοχή του τελικού προϊόντος. Τα καταλληλότερα πετρώματα για να χρησιμοποιηθούν ως αδρανή υλικά είναι τα ασβεστολιθικά και τα πυριτικά.

Τα αδρανή πρέπει να διαθέτουν τρία βασικά χαρακτηριστικά: να έχουν επαρκή αντοχή, επαρκή πρόσφυση και χημική συνεκτικότητα με τη τσιμεντοκονία. Άλλα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος είναι η αντοχή του μητρικού πετρώματος, η καθαρότητα (ύπαρξη ή όχι πρόσμεικτων ουσιών), η χημική τους συμπεριφορά, η κοκκομετρική διαβάθμιση (το σχήμα και το μέγεθος των κόκκων).

Διακρίνονται επτά κατηγορίες αδρανών ανάλογα με τη χρήση:

1. Αδρανή σκυροδέματος (ΕΛΟΤ EN 12620)

Αξιοποίηση του βιομηχανικού παραπροϊόντος (CBPD) στην παραγωγική διαδικασία δομικών στοιχείων – σύνθεση, μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα.

2. Αδρανή ασφαλομιγμάτων(ΕΛΟΤ EN 13043)
3. Αδρανή κονιαμάτων(ΕΛΟΤ EN 13139)
4. Αδρανή για ογκόλιθους για λιμενικά και υδραυλικά έργα(ΕΛΟΤ EN 13383-1)
5. Αδρανή για έρμα σιδηροδρομικής γραμμής(ΕΛΟΤ EN 13450)
6. Αδρανή για βάσεις και υποβάσεις σταθεροποιημένες ή μη(ΕΛΟΤ EN 13242)
7. Ελαφροβαρή Αδρανή(ΕΛΟΤ EN 13055)

Το μέγεθος των αδρανών ορίζεται με ένα κατώτερο (d) και ένα ανώτερο (D) μέγεθος κόσκινου και εκφράζεται ως d/D (mm). Ανάλογα με τη χρήση χρησιμοποιούμε διάφορα κλάσματα αδρανών για παράδειγμα στο σκυρόδεμα χρησιμοποιούμε τέσσερα κλάσματα (Χαλίκι,Γαρμπίλι,Άμμος 0/4ή0/2). Ακριβέστερη εικόνα για το μέγεθος των αδρανών δίνει η κοκκομετρική τους σύνθεση ή διαβάθμιση, δηλαδή ο διαχωρισμός και η κατάταξη των κόκκων σε ομάδες με βάση το μέγεθος. Το μέγεθος των κόκκων προσδιορίζεται με πρότυπα κόσκινα που έχουν καθορισμένους διαμέτρους οπών. Οι κόκκοι που περνούν από το κόσκινο με διάμετρο οπών 7 mm και δεν περνούν από το κόσκινο με διάμετρο οπών 3 mm θεωρείται ότι έχουν διάμετρο (μέγεθος) μεταξύ 3 mm και 7 mm. Τα κόσκινα που χρησιμοποιούνται στην Ελλάδα είναι τα κόσκινα των Γερμανικών και Αμερικάνικων Κανονισμών. Με βάση τις παραπάνω συμβατικές διαμέτρους των κόκκων προσδιορίζεται η κοκκομετρική σύνθεση ενός μείγματος κόκκων ως ποσοστιαία κατά βάρος αναλογία κάθε κατηγορίας μεγέθους κόκκων υλικού.

1.3. ΝΕΡΟ ΚΑΙ ΒΕΛΤΙΩΤΙΚΑ

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

Για το νερό που χρησιμοποιείται για την παρασκευή του σκυροδέματος υπάρχει μια ανοχή σχετικά με την ποιότητά του, σε αντίθεση με τα νερά που δρουν εξωτερικά και μόνιμα. Και αυτό γιατί η ποσοστιαία αναλογία του

1. Σκυρόδεμα – βασικά συστατικά

νερού ανάμειξης, και συνεπώς και κάθε ξένης ουσίας μέσα σε αυτό, είναι μικρή και εξάλλου οι ουσίες αυτές δρουν μέχρι να εξαντληθούν. Στην περίπτωση όμως εξωτερικών νερών, όπως το θαλασσινό νερό ή τα νερά αποχετεύσεων, η δράση τους είναι μόνιμη και η ποσότητα των επιβλαβών ουσιών ανεξάντλητη, αφού τα νερά αυτά ανανεώνονται συνεχώς.

Οι κυριότερες από τις χημικές ουσίες που έχουν δυσμενή επίδραση στην εξέλιξη των χημικών αντιδράσεων, με αποτέλεσμα είτε τη μείωση της τελικής αντοχής είτε την καθυστέρηση της πήξης είναι η ζάχαρη, τα οξέα, τα λάδια, τα λίπη και οι οργανικές ουσίες.

Το χρησιμοποιούμενο νερό πρέπει να ανταποκρίνεται στην προδιαγραφή EN 1008. Συμμετέχει σε ποσοστό περίπου 6% κ.β σε μια τυπική σύνθεση σκυροδέματος. Κατά βάση χρησιμοποιείται το πόσιμο νερό. Σε μερικές περιπτώσεις (άοπλο σκυρόδεμα) μπορεί να χρησιμοποιηθεί θαλασσινό νερό ή νερό γεώτρησης.

Βελτιωτικά ή χημικά πρόσμεικτα (admixture) είναι τα υλικά που προστίθενται, σε μικρές ποσότητες σε σχέση με τη μάζα του τσιμέντου, κατά τη διάρκεια ανάμειξης του σκυροδέματος με σκοπό να τροποποιήσουν τις ιδιότητες κυρίως του νωπού αλλά και του σκληρυμένου σκυροδέματος.

Ανάλογα με την κύρια δράση τους τα υλικά αυτά κατατάσσονται στις εξής κατηγορίες α. ρευστοποιητικά β. αερακτικά επιβραδυντικά δ. επιταχυντικά ε. στεγανωτικά. Εκτός από τα παραπάνω υλικά υπάρχουν και άλλων ειδών πρόσμεικτα όπως τα αντιπαγετικά, τα διογκωτικά και τα αντιβραδυντικά.

Τα ρευστοποιητικά στηρίζονται στη μείωση της επιφανειακής τάσης του νερού και των δυνάμεων συνοχής μεταξύ των κόκκων του τσιμέντου, με αποτέλεσμα, όσο διαρκεί η δράση τους, να αυξάνουν τη ρευστότητα του σκυροδέματος. Σημαντική εξέλιξη στον τομέα αυτό είναι οι υπερρευστοποιητές που δημιουργούν πολύ μεγάλη ρευστότητα χωρίς αύξηση του απαιτούμενου νερού. Τα υλικά αυτά λύνουν το πρόβλημα της εργασιμότητας και κατ'επέκταση της αντλησιμότητας και διάστρωσης του σκυροδέματος, χωρίς την επιζήμια αύξηση του νερού ανάμειξης, ενώ έχουν επιπρόσθετα και επιβραδυντική δράση. Τα αερακτικά είναι υλικά που προκαλούν την ανάπτυξη μικρών φυσαλίδων, μεγέθους 0.02-0.2mm, μέσα

Αξιοποίηση του βιομηχανικού παραπροϊόντος (CBPD) στην παραγωγική διαδικασία δομικών στοιχείων – σύνθεση, μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα.

στο σκυρόδεμα και αυξάνουν τον περιεχόμενο αέρα στα επίπεδα 6–8%. Επιπρόσθετα έχουν και ρευστοποιητική δράση. Τα επιβραδυντικά στηρίζονται στην απομόνωση των ταχύπηκτων αργλικών ενώσεων και κυρίως του αργλικού τριασβεστίου. Η δράση αυτή διαρκεί περίπου 1–2h και έτσι το σκυρόδεμα μπορεί να μεταφερθεί στον τόπο διάστρωσης του. Για το λόγο αυτό, τέτοια υλικά χρησιμοποιούνται κατά κανόνα στο έτοιμο σκυρόδεμα. Αντίθετη δράση έχουν τα επιταχυντικά, τα οποία διευκολύνουν την ενυδάτωση του αργλικού τριασβεστίου και των πυριτικών ενώσεων.

Οι κανονισμοί ορίζουν την απαιτούμενη ελάχιστη βελτιωτική δράση καθώς και το μέγιστο επιτρεπόμενο όριο αλλοίωσης των άλλων ιδιοτήτων. Επίσης σύμφωνα και με τον Ευρωπαϊκό Κανονισμό EN 206-1, η ολική ποσότητα των προσμίκτων δεν πρέπει να ξεπερνά την μέγιστη συνιστώμενη από τον κατασκευαστή δόση και σε κάθε περίπτωση να μην ξεπερνά τα 50 g/Kg τσιμέντου.

1.2. ΣΥΝΘΕΣΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η μελέτη σύνθεσης σκυροδέματος πραγματοποιείται σε δύο φάσεις. Αρχικά, με την επιλογή των συστατικών (είδος τσιμέντου, αδρανών και προσθέτων) η οποία γίνεται σύμφωνα με τις κοινές τεχνικές προδιαγραφές για το σκυρόδεμα (Πίνακας 1.2). Σε δεύτερη φάση πραγματοποιείται ο καθορισμός της αναλογίας ανάμειξης των συστατικών του σκυροδέματος, δηλαδή του τσιμέντου, του νερού, των αδρανών και τυχόν χρησιμοποιούμενων προσθέτων, έτσι ώστε να πληρούνται οι προδιαγραφές που έχουν τεθεί από τον κατασκευαστή ή τον υπεύθυνο μηχανικό ενός έργου. Η διαδικασία η οποία ακολουθείται είναι η παρακάτω:

1. Επιλέγεται η κατηγορία του σκυροδέματος ανάλογα με τις απαιτήσεις του έργου και τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Έτσι προδιαγράφονται ο τύπος του τσιμέντου, ο μέγιστος λόγος νερό/τσιμέντο, τα όρια της κοκκομετρικής διαβάθμισης των αδρανών, η ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμέντο. Λαμβάνονται υπόψη τυχόν περιορισμοί ή άλλοι κανόνες που ορίζονται από τα διεθνή ή έθνικα πρότυπα και προδιαγραφές (ΕΛΟΤ EN-206, ΚΤΣ-97).

1. Σκυρόδεμα – βασικά συστατικά

Πίνακας 1.2.Συνήθεις τεχνικές απαιτήσεις σκυροδέματος

Επιθυμητή ιδιότητα	Εφαρμογή	Υλικά
Υψηλή εργασιμότητα(χωρίς απόμειξητων συστατικών)	<ol style="list-style-type: none"> Υποβρύχια σκυροδέτηση Δύσκολες- βαθιές σκυροδετήσεις, με πυκνό οπλισμό Αυτοεπιπεδούμενησκυροδέτηση 	Ρευστοποιητές- χαμηλό (w/c) Πρόσθετα τσιμέντου και σκυροδέματος Αδρανή χαμηλής κοκκομετρίας
Ταχεία πήξη	<ol style="list-style-type: none"> Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα 	Επιταχυντές
Αργή πήξη	<ol style="list-style-type: none"> Αντιμετώπιση δημιουργίας θερμογεφυρών, στις ενώσεις Αποφυγή ρηγματώσης (deflectioncracking) Εξομάλυνση θερμοκρασιακών διαφορών 	Επιβρανδυτές
Υψηλή πρώιμη αντοχή	<ol style="list-style-type: none"> Σκυρόδεμα ταχείας ξεκαλούπωσης Σκυροδέτηση σε χαμηλές θερμοκρασίες Προεντεταμένο σκυρόδεμα 	Τσιμέντο υψηλής πρώιμης αντοχής(ΤypeIII) Πλαστικοποιητές-Υπερρευστοποιητές Επιταχυντές
Χαμηλή θερμότητα ενυδάτωσης	<ol style="list-style-type: none"> Κατασκευές μεγάλου όγκου-μάζας: -Πλάκες αυξημένου πάχους - Έτοιμη τοιχοποιΐα -Φράγματα 	Τσιμέντο μέτριας θερμότητας ενυδάτωσης (ΤypeII). Σύνθετα τσιμέντα (Τype IPM)ή σκυρόδεμα με πρόσθετα Τσιμέντο χαμηλής θερμότητας ενυδάτωσης Σύνθετα τσιμέντα (Τype IPM) ή σκυρόδεμα με πρόσθετα
Υψηλή ανθεκτικότητα	<ol style="list-style-type: none"> Αντοχή στον παγετό. Ανθεκτικότηταστα θειικά (έδαφος, θάλασσα). Ανθεκτικότητα στην αλκαλοπυριτική αντίδραση των αδρανών 	Αερακτικά Τσιμέντο με ανθεκτικότητα στα θειικά(ΤypeIIorV). Σύνθετα τσιμέντα ή σκυρόδεμα με πρόσθετα. Ρευστοποιητές- χαμηλό (w/c) Τσιμέντο χαμηλής περιεκτικότητας σε αλκάλια. Αδρανή ανθεκτικά στα αλκάλια
Χαμηλή διαπερατότητα	<ol style="list-style-type: none"> Δεξαμενές νερού Δεξαμενές αερίων Γενικές απαιτήσεις ανθεκτικότητας 	Ρευστοποιητές - χαμηλό (w/c) Πρόσθετα σκυροδέματος
Σταθερότηταδιαστάσεων	<ol style="list-style-type: none"> Δεξαμενές νερού και αερίων. Πολυόροφες κατασκευές Κατασκευές με ειδική απαίτηση ως προς την ακρίβεια των διαστάσεων 	Ρευστοποιητές - χαμηλό (w/c) Μειωτές νερού Αδρανή υψηλής αντοχής
Χαμηλή θερμική διαστολή	<ol style="list-style-type: none"> Πυρίμαχες κατασκευές Θερμοκρασιακές διακυμάνσεις 	Αδρανή χαμηλού συντελεστή θερμικής διαστολής
Χαμηλή πυκνότητα	<ol style="list-style-type: none"> Πολυόροφες κατασκευές Θερμομόνωση 	Ελαφριά αδρανή
Υψηλή πυκνότητα	<ol style="list-style-type: none"> Θωράκιση από ακτινοβολία Κατασκευές αντιστάθμισης βάρους 	Βαριά αδρανή
Χαμηλή θερμική αγωγιμότητα	<ol style="list-style-type: none"> Θερμομόνωση 	Ελαφριά αδρανή

Αξιοποίηση του βιομηχανικού παραπροϊόντος (CBPD) στην παραγωγική διαδικασία δομικών στοιχείων – σύνθεση, μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα.

2. Ορίζεται η κατηγορία του σκυροδέματος με βάση τις αντοχές θλίψης ή/ και την κατηγορία κάθισης, ανάλογα με τις απαιτήσεις του κατασκευαστή ή του υπεύθυνου μηχανικού.
3. Προσδιορίζεται ο λόγος νερό/τσιμέντο και η περιεκτικότητα σε τσιμέντο με βάση υπάρχοντα εργαστηριακά δεδομένα ή με την πραγματοποίηση εργαστηριακών δοκιμών.
4. Προσδιορίζεται η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών όπως και η ποσοστιαία συμμετοχή κάθε κοκκομετρικού κλάσματος στο σκυρόδεμα.

1.3.ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

1.3.1. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΝΩΠΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Νωπό σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται το σκυρόδεμα που μόλις έχει παρασκευαστεί περιέχοντας όλα τα συστατικά του. Παραμένει σε ρευστή-πλαστική κατάσταση και δύναται να συμπυκνωθεί-μορφοποιηθεί σε καλούπια διατηρώντας την ομοιογένεια του.

1.3.1.1. ΕΡΓΑΣΙΜΟΤΗΤΑ

Με τον όρο εργασιμότητα ή εργάσιμο χαρακτηρίζεται γενικά η ευκολία με την οποία είναι δυνατόν να μεταφερθεί, διαστρωθεί και συμπυκνωθεί το σκυρόδεμα. Σύμφωνα με έναν άλλο ορισμό, η εργασιμότητα ορίζεται ως το έργο που απαιτείται για να υπερνικηθούν οι εσωτερικές τριβές και να επιτευχθεί πλήρης συμπύκνωση.

Το εργάσιμο είναι μια πολύ χρήσιμη έννοια στην πράξη, γιατί αποδίδει ακριβώς αυτό που ενδιαφέρει τον κατασκευαστή κατά το χρόνο της σκυροδέτησης. Είναι μια σύνθετη ιδιότητα και συνδέεται με άλλες ρεολογικές ιδιότητες, όπως οι παρακάτω:

1. τη ρευστότητα, που σημαίνει την ευκολία με την οποία ρέει ένα υλικό. Η ρευστότητα εξαρτάται κυρίως από την ποσότητα του νερού ανάμειξης.

1. Σκυρόδεμα – βασικά συστατικά

2. την πλαστικότητα, δηλαδή η ικανότητα του υλικού να παραμορφώνεται χωρίς διακοπή της συνέχειάς του.
3. τη συνοχή, που εκφράζει το αποτέλεσμα των δυνάμεων που έλκουν τα μόρια μεταξύ τους και επομένως είναι μία από τις ιδιότητες που συντελούν στην πλαστικότητα.
4. τη συμπυκνωσιμότητα που εκφράζει τη δυνατότητα του υλικού να συμπυκνωθεί και εξαρτάται από τον αρχικό βαθμό συμπύκνωσης.

Το εργάσιμο αυξάνεται γενικά όσο αυξάνεται το νερό ανάμειξης, δηλαδή η ρευστότητα του μείγματος. Η ρευστότητα εξαρτάται περισσότερο από την ποσότητα του νερού ανάμειξης και πολύ λιγότερο από τον λόγο N/T. Για την ίδια ρευστότητα το απαιτούμενο νερό γενικά ελαττώνεται, όσο ελαττώνεται η ειδική επιφάνεια των αδρανών. Έτσι ελαττώνεται όσο αυξάνεται ο μέγιστος κόκκος και η καμπύλη κοκκομετρικής διαβάθμισης των αδρανών κατεβαίνει. Από την άλλη πλευρά όμως, η αύξηση του μέγιστου κόκκου και των χονδρόκοκκων αδρανών συντελεί στη μείωση της πλαστικότητας και της συνοχής, με κίνδυνο την απόμειξη του νωπού σκυροδέματος.

Η μέτρηση της εργασιμότητας δεν μπορεί να γίνει άμεσα. Γι' αυτό έχουν προταθεί διάφορες μέθοδοι με τις οποίες μετριέται μία ή περισσότερες από τις άλλες ιδιότητες που αναφέρθηκαν παραπάνω. Με τις μετρήσεις αυτές αποκτάται μια έμμεση κατά προσέγγιση εικόνα του βαθμού εργασιμότητας του σκυροδέματος. Η κυριότερη από τις μεθόδους είναι η κάθιση σύμφωνα με την οποία ένας μεταλλικός κόλουρος κώνος προτυποποιημένων διαστάσεων, ανοιχτός πάνω και κάτω, τοποθετείται σε ειδική τράπεζα, πληρώνεται με σκυρόδεμα και συμπυκνώνεται με καθορισμένο τρόπο. Μετά την πλήρωση αφαιρείται ο κώνος κατακόρυφα, οπότε το σκυρόδεμα παραμορφώνεται και κάθεται. Μετριέται η διαφορά του ύψους του υλικού μετά την πτώση, σε σχέση με το αρχικό του ύψος (ASTMC143) και η προκύπτουσα τιμή, σε mm, είναι η κάθιση.

1.3.1.2 .ΜΟΝΑΔΙΑΙΟ ΒΑΡΟΣ

Πυκνότητα ή μοναδιαίο βάρος ορίζεται ως το βάρος (Kg) ενός m^3 σκυροδέματος. Εκφράζει το βαθμό συμπύκνωσης του μείγματος και

Αξιοποίηση του βιομηχανικού παραπροϊόντος (CBPD) στην παραγωγική διαδικασία δομικών στοιχείων – σύνθεση, μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα.

σχετίζεται άμεσα με την τιμή της αντοχής. Ένα τυπικό σκυρόδεμα έχει μοναδιαίο βάρος περίπου 2300 Kg/m^3 .

1.3.2. ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΣΚΛΗΡΥΜΕΝΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Σκληρυμένο σκυρόδεμα χαρακτηρίζεται το σκυρόδεμα που έχει στερεοποιηθεί και έχει αναπτύξει μηχανικές αντοχές.

1.3.2.1. ΜΗΧΑΝΙΚΗ ΑΝΤΟΧΗ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η αντοχή του σκυροδέματος σε μηχανική καταπόνηση θεωρείται ως η πιο σημαντική ιδιότητά του και εκφράζει την ικανότητα του υλικού να αντεπεξέλθει στη μηχανική καταπόνηση που υπόκειται. Η ποσοτική της εκτίμηση δίνεται σε μονάδες φορτίου ανά επιφάνεια (N/mm^2 ή Mpa). Η αντοχή συνδέεται άμεσα με τη δομή της τσιμεντόπαστας και είναι μια αναντικατάστατη μεταβλητή στο σχεδιασμό των κατασκευών.

Η αντοχή του σκυροδέματος, σε συγκεκριμένη ηλικία, συντήρηση και θερμοκρασία θεωρείται ότι εξαρτάται κυρίως από δύο παράγοντες: το λόγο W/C και το βαθμό συμπύκνωσης.

Μονοαξονική θλιπτική αντοχή

Η μονοαξονική θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος, f_c , αποτελεί το πιο χαρακτηριστικό μέγεθος του υλικού και μπορεί εύκολα να προσδιοριστεί πειραματικά. Η θλιπτική αντοχή αποτελεί γενικό δείκτη της ποιότητας του σκυροδέματος, γιατί όλες, σχεδόν, οι ιδιότητες του σκληρυμένου σκυροδέματος (υδατοστεγανότητα, αντοχή σε επιφανειακή φθορά, ανθεκτικότητα, κλπ), βελτιώνονται με τη μείωση της διαπερατότητας του σκυροδέματος η οποία σχετίζεται με το πορώδες του υλικού το οποίο είναι καθοριστικός παράγοντας της θλιπτικής αντοχής του. Η αντοχή του σκυροδέματος σε μονοαξονική θλίψη προσδιορίζεται με επιτόνηση σε κεντρική θλίψη δοκιμίων από σκυρόδεμα, οριζόμενη ως η μέγιστη τάση θραύσεως των δοκιμίων. Τα αποτελέσματα αυτού του προσδιορισμού για

1. Σκυρόδεμα – βασικά συστατικά

ηλικία σκυροδέματος 28 ημερών και για συμβατικές συνθήκες παρασκευής, συντήρησης και δοκιμασίας των δοκιμίων (που προδιαγράφονται στους κανονισμούς τεχνολογίας σκυροδέματος) χρησιμοποιούνται για να χαρακτηρίσουν την ποιότητα του υλικού.

Μονοαξονική εφελκυστική αντοχή

Η αντοχή του σκυροδέματος σε εφελκυσμό είναι περίπου το 10% της αντοχής του σε θλίψη. Γι' αυτό, στις κατασκευές το σκυρόδεμα είναι ρηγματωμένο στις περιοχές ανάπτυξης εφελκυστικών τάσεων (από τα φορτία λειτουργίας ή από έμμεσες δράσεις). Λόγω του μικρού μεγέθους της, η εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος θεωρείται σ' αρκετές περιπτώσεις αμελητέα κατά το σχεδιασμό κατασκευών. Υπάρχουν, όμως, περιπτώσεις στις οποίες λαμβάνεται υπόψη (π.χ. περιορισμένη προένταση, έλεγχος ανοίγματος ρωγμών) και γι' αυτό απαιτείται ο προσδιορισμός της. Λόγω των δυσχερειών των πειραμάτων για τον άμεσο προσδιορισμό της έχουν διατυπωθεί εμπειρικές σχέσεις έκφρασης της εφελκυστικής αντοχής συναρτήσει της αντοχής του σκυροδέματος σε θλίψη και έχουν αναπτυχθεί έμμεσες δοκιμές για τον προσδιορισμό της, όπως οι δοκιμές εφελκυσμού σε διάρρηξη ή σε κάμψη. Στη δοκιμή διάρρηξης (γνωστή και ως "Brazilian test") κυλινδρικό δοκίμιο διαμέτρου 150 mm και μήκους περίπου 300 mm υποβάλλεται σε προοδευτικά αυξανόμενο θλιπτικό φορτίο Ρομοιόμορφα κατανεμημένο κατά μήκος δύο αντιδιαμετρικών γενετειρών της παράπλευρης επιφάνειας. Τα αντιδιαμετρικά αυτά φορτία προκαλούν οριζόντιες εφελκυστικές τάσεις σ_h , ομοιόμορφα κατανεμημένες στο μεγαλύτερο τμήμα του κατακόρυφου επιπέδου του οριζόμενου από τις αντιδιαμετρικές γενέτειρες, με μέγεθος ίσο με $\sigma_h = 2P/\pi dl$. Με την αύξηση του θλιπτικού φορτίου οι τάσεις σ_h φθάνουν τη μέγιστη τιμή τους και το δοκίμιο διαχωρίζεται («διαρρηγνύεται») κατά μήκος του επιπέδου αυτού. Η μέγιστη τιμή $f_{ct,sp}$ της εφελκυστικής αυτής τάσης, οριζόμενη ως εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη, δίνεται συναρτήσει του μέγιστου θλιπτικού φορτίου διάρρηξης PSP από τη σχέση:

$$f_{ct,sp} = 2 PSP/\pi dl$$

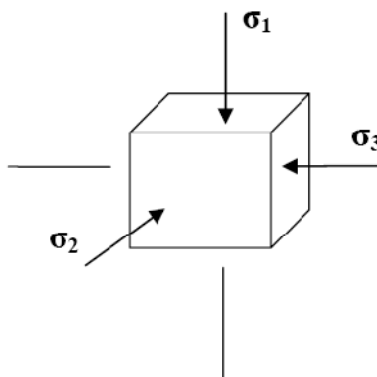
Αξιοποίηση του βιομηχανικού παραπροϊόντος (CBPD) στην παραγωγική διαδικασία δομικών στοιχείων – σύνθεση, μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα.

Από πειραματικά αποτελέσματα έχει βρεθεί ότι η εφελκυστική αντοχή f_{ct} συνδέεται με την εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη με τη σχέση:

$$f_{ct} \approx 0.9 f_{ct,sp.}$$

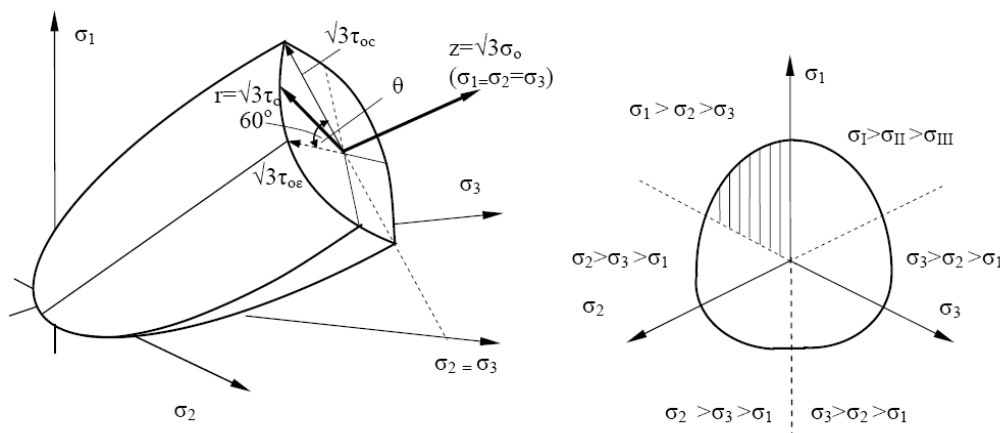
Αντοχή σε τριαξονική επιπόνηση

Η εντατική κατάσταση που αναπτύσσεται στο εσωτερικό ενός δομικού στοιχείου από οπλισμένο σκυρόδεμα υπό φορτίο είναι πολύπλοκη. Εάν απομονωθεί από την κατασκευή ένας στοιχειώδης κύβος από σκυρόδεμα με έδρες κάθετες στη διεύθυνση των τροχιών των κυρίων τάσεων, τότε η εντατική κατάστασή του περιγράφεται από τις τρεις κύριες τάσεις, έστω θλιπτικές (Σχήμα 1.1). Ο συνδυασμός των τιμών των κυρίων τάσεων που προκαλούν αστοχία του κύβου ορίζει μια επιφάνεια στο χώρο των τάσεων (Σχήμα 1.2). Οι τομές της επιφάνειας αυτής με οποιοδήποτε από τα επίπεδα που περιέχουν τους άξονες σ_1 , σ_2 , ή σ_2 , σ_3 , ή σ_3 , σ_1 περιγράφουν την αντοχή του σκυροδέματος σε διαξονική ένταση, ενώ οι τομές της με τα επίπεδα που σχηματίζουν ένας από τους άξονες σ_1 , ή σ_2 , ή σ_3 και η διαγώνιος $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ περιγράφει την αντοχή του σκυροδέματος σε αξονοσυμμετρική ένταση. Η μονοαξονική αντοχή αντιστοιχεί στα σημεία τομής της επιφάνειας με τους άξονες σ_1 , σ_2 και σ_3 .



Σχήμα 1.1. Στοιχειώδης κύβος υπό τριαξονική ένταση.

1. Σκυρόδεμα – βασικά συστατικά



Σχήμα 1.2. Επιφάνεια αστοχίας. (α) Σχηματική απεικόνιση στο χώρο των τάσεων. (β) Τυπική τομή με το αποκλίνον επίπεδο. ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ οι κύριες τάσεις)

1.3.2.2. ΜΕΤΑΒΟΛΗ ΟΓΚΟΥ

Η ιδιότητα αυτή αναφέρεται στις μεταβολές του όγκου του σκυροδέματος που οφείλονται στη μετακίνηση του περιεχόμενου νερού προς το περιβάλλον ή στο εσωτερικό του σκυροδέματος, στις θερμοκρασιακές μεταβολές, στην ανεπιθύμητη δράση διαφόρων συστατικών που άγονται στο σκυρόδεμα με τον αέρα ή με το νερό.

1.3.2.3. ΕΡΠΥΣΜΟΣ ΚΑΙ ΣΥΡΡΙΚΝΩΣΗ

Τόσο ο ερπυσμός (creep) όσο και η συρρίκνωση (shrinkage) αποτελούν δύο αιτίες δημιουργίας παραμορφώσεων στο σκυρόδεμα και φαίνεται να προκαλούνται εξαιτίας της κίνησης του νερού στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Στην περίπτωση της συρρίκνωσης η αιτία κίνησης του νερού είναι οι περιβαλλοντικές συνθήκες (διαφορά πίεσης και θερμοκρασίας) που προκαλούν τη διάχυση του νερού προς το εξωτερικό περιβάλλον με τη διαδικασία της εξάτμιση. Αντίθετα, στο φαινόμενο του ερπυσμού, η εφαρμογή θλιπτικής τάσης είναι αυτή που προκαλεί την κίνηση του νερού μέσα στη μάζα του σκυροδέματος. Για το λόγο αυτό ερπυσμός συμβαίνει και

Αξιοποίηση του βιομηχανικού παραπροϊόντος (CBPD) στην παραγωγική διαδικασία δομικών στοιχείων – σύνθεση, μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα.

στο κορεσμένο σε υγρασία σκυρόδεμα και είναι γνωστός σαν «βασικός ερπυσμός».

Οι ερπυστικές παραμορφώσεις αντιτίθενται στις τάσεις που εφαρμόζονται, με αποτέλεσμα όταν κορεσμένο σε υγρασία σκυρόδεμα υπόκειται σε θλιπτικό φορτίο, συστέλλεται κατά τη διεύθυνση του φορτίου και οι παραμορφώσεις αυτές συμβαίνουν αθροιστικά προς τις ελαστικές παραμορφώσεις. Ο λόγος Poisson είναι σχεδόν ίδιος με αυτόν των ελαστικών παραμορφώσεων και συνεπώς η εγκάρσια παραμόρφωση αυξάνεται. Σε αντίθεση, κατά τη συρρίκνωση λόγω ξήρανσης ήπιες συνθήκες (ελεύθερη ξήρανση), συμβαίνει ισόποση μείωση του όγκου προς όλες τις διευθύνσεις. Στην πράξη ο ερπυσμός και η συρρίκνωση συμβαίνουν ταυτόχρονα όταν το σκυρόδεμα ξηραίνεται, υπό την επίδραση ήπιων περιβαλλοντικών συνθηκών. Η συνολική παραμόρφωση που συμβαίνει εξαιτίας θλιπτικού φορτίου και σε συνάρτηση με το χρόνο, αναμένεται ελαφρώς μεγαλύτερη εξαιτίας του αθροίσματος των παραμορφώσεων λόγω ελεύθερης ξήρανσης και βασικού ερπυσμού. Στην εγκάρσια διεύθυνση, οι τάσεις λόγω ερπυσμού και συρρίκνωσης σχεδόν αλληλοαναιρούνται.

Στις κατασκευές, ο ερπυσμός και η συρρίκνωση εκδηλώνονται ως μια αύξηση στο χρόνο της παραμόρφωσης, στη διεύθυνση του φορτίου (π.χ. κολώνα κάτω από την επίδραση θλιπτικού φορτίου), ως μια αύξηση της μετατόπισης διαφόρων στοιχείων (π.χ. δοκός σε κάμψη) ή ως εκτόνωση της προέντασης σε στοιχεία υπό προένταση. Επιπλέον, η συρρίκνωση του σκυροδέματος με την πάροδο του χρόνου μπορεί να οδηγήσει σε ρηγμάτωση, καθώς το δομικό στοιχείο παραμορφώνεται και αντισταθμιστικά αναπτύσσονται εφελκυστικές τάσεις. Έτσι, οι παραμορφώσεις λόγω συρρίκνωσης ή ερπυσμού, πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά το σχεδιασμό της κατασκευής, καθώς δύναται να είναι μεγαλύτερες από τις ελαστικές παραμορφώσεις.

Ο μηχανισμός του ερπυσμού

Ο μηχανισμός του ερπυσμού εξηγείται στην απλούστερη περίπτωση του βασικού ερπυσμού (basic creep), κατά την οποία το σκυρόδεμα φορτίζεται κάτω από κατάσταση κορεσμού σε υγρασία και επομένως δεν συμβαίνει ξήρανση. Καθώς δεν χάνεται καθόλου υγρασία από την τσιμεντόπαστα, το

νερό υπό την επίδραση της φόρτισης αναδιανέμεται στη μικροδομή του δοκιμίου. Η φόρτιση μεταφέρεται μέσω των διαφορετικών συστατικών της τσιμεντόπαστας. Τα προϊόντα της ενυδάτωσης του τσιμέντου αναλαμβάνουν την τάση σε ποσοστό ανάλογο με το κλάσμα του όγκου τους, ενώ οι τριχοειδείς πόροι αναλαμβάνουν τάσεις σε πολύ χαμηλό ποσοστό. Το C-S-H είναι εκείνο το ένυδρο προϊόν που αναλαμβάνει τη μέγιστη τάση, καθώς σε μεγάλη αναλογία του όγκου του απαντώνται μικροπόροι, και το περιεχόμενο σε αυτούς νερό μπορεί να δέχεται μεγάλη πίεση. Το νερό δεν κατανέμεται πλέον ισοστατικά και διαχέεται σε περιοχές με χαμηλότερη πίεση, τους τριχοειδείς πόρους. Καθώς συμβαίνει αυτό η επιφάνειες που διαμορφώνουν οι μικροπόροι C-S-H πλησιάζουν μεταξύ τους, εν μέρει εξαιτίας της εξωτερικής πίεσης που τους ασκείται και εν μέρει εξαιτίας του νερού που περιέχουν, το οποίο διαμορφώνει ομάδες επιφανειών. Έτσι αυτή η διαδικασία μπορεί να θεωρηθεί ως μία διαδικασία βαθμιαίας συμπύκνωσης της δομής του C-S-H, μέσω ιξωδοελαστικής συμπεριφοράς.

Συνοψίζοντας ο ερπυσμός εξαρτάται από την ικανότητα του νερού να διαχέεται μέσα στη τσιμεντόπαστα, η οποία εξαρτάται κυρίως από τη μορφή του πορώδους και την ευκολία ολίσθησης των σωματιδίων του C-S-H, η οποία με τη σειρά της είναι συνάρτηση των δυνάμεων συνοχής μεταξύ των σωματιδίων. Οι δυνάμεις VanderWaals είναι μικρότερες όταν μεσολοβαίνει νερό μεταξύ των σωματιδίων, ενώ οι χημικοί δεσμοί είναι ισχυρότεροι σε αυτή την περίπτωση και αυξάνονται με το χρόνο.

Ο μηχανισμός της συρρίκνωσης

Σε αυτή την περίπτωση η υγρασία χάνεται από τη τσιμεντόπαστα όταν το νερό διαχέεται μέσω των πόρων στο περιβάλλον: μηνίσκοι δημιουργούνται και αναπτύσσεται ισοστατικά κατανεμημένη τάση στους τριχοειδείς πόρους σε όλη τη μάζα της τσιμεντόπαστας. Καθώς η σχετική υγρασία μειώνεται, περισσότεροι μηνίσκοι δημιουργούνται σε ακόμα μικρότερους πόρους και ασκείται όλο και μεγαλύτερη πίεση. Συρρίκνωση λόγω τάσεων καταγράφεται και σε πορώδες γέλης, αλλά είναι μικρής έντασης οπότε συμβαίνει σε μικρό βαθμό. Δύο επιπλέον διαδικασίες συμβαίνουν: εξαιτίας των εσωτερικών τάσεων που αναπτύσσονται στο τριχοειδές πορώδες, τα σωματίδια του C-S-H πλησιάζουν πιο κοντά και

Αξιοποίηση του βιομηχανικού παραπροϊόντος (CBPD) στην παραγωγική διαδικασία δομικών στοιχείων – σύνθεση, μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα.

ολισθαίνουν με μηχανισμό αντίστοιχο με αυτό του ερπυσμού. Επιπλέον, την ίδια στιγμή, η υγρασία διαχέεται εν μέσω των μικροπόρων του C-S-H, προκειμένου να αντισταθμίσει το ποσοστό της υγρασίας που εξατμίστηκε. Η διάχυση της υγρασίας στο περιβάλλον συνεχίζεται έως ότου απομακρυνθεί όλη από το τριχοειδές πορώδες και μηδενισθούν οι τάσεις στο εσωτερικό του, με αποτέλεσμα η συρρίκνωση να οφείλεται πλέον στη μείωση των αποστάσεων μεταξύ των σωματιδίων του C-S-H.

Παράγοντες που επηρεάζουν τον ερπυσμό και τη συρρίκνωση

Επίδραση των αδρανών.

Εκτός από σπάνιες περιπτώσεις, οι διαστάσεις των αδρανών δεν μεταβάλλονται σημαντικά κατά τη ξήρανση. Έτσι, η συρρίκνωση και ο ερπυσμός συμβαίνουν σε μικρότερο βαθμό στα κονιάματα και στο σκυρόδεμα. Ωστόσο, υπάρχουν σχέσεις στη βιβλιογραφία που συνδέουν τη παραμόρφωση του σκυροδέματος με αυτή της τσιμεντόπαστας και τον όγκο των αδρανών. Συγκεκριμένα και σχετικά με τα είδος των αδρανών, η παραμόρφωση του σκυροδέματος συνδέεται με την ελαστική σταθερά των αδρανών και είναι μικρότερη, όσο αυτή αυξάνεται (π.χ., ασβεστολιθικά αδρανή).

Επίδραση της πάστας τσιμέντου.

Λαμβάνοντας υπόψη αυτά που αναφέρθηκαν για τους μηχανισμούς που δρουν κατά τον ερπυσμό και τη συρρίκνωση, δύο είναι οι παράγοντες που καθορίζουν το μέγεθος και την έκτασή τους: (1) η ικανότητα των σωματιδίων C-S-H να ολισθαίνουν, και (2) το ποσοστό του τριχοειδούς πορώδους. Έτσι σε σχέση με το C-S-H, η ξήρανση πριν τη φόρτιση η οποία περιορίζει την ποσότητα του νερού που θα διαχυθεί από το αυτό, η παράταση του χρόνου ενυδάτωσης ή/και η ενυδάτωση σε υψηλές θερμοκρασίες, αλλά και η ενανθράκωση, αποτελούν δράσεις που αυξάνουν τους (χημικούς) δεσμούς μεταξύ των σωματιδίων του C-S-H και βελτιώνουν τη δομή του, με αποτέλεσμα να περιορίζεται η έκταση του ερπυσμού και της συρρίκνωσης. Η μείωση στο πορώδες εξαιτίας της αύξησης του βαθμού ενυδάτωσης και του χαμηλού λόγου N/T, επίσης συντελούν στη μείωση του ερπυσμού. Τέλος η

χρήση πρόσμικτων τα οποία μειώνουν το περιεχόμενο νερό, συντελούν επίσης στον περιορισμό του ερπυσμού και της συρρίκνωσης.

Επίδραση της σχετικής υγρασίας.

Η έκταση στην οποία το σκυρόδεμα θα απωλέσει την περιεχόμενη υγρασία του, εξαρτάται από τη σχετική υγρασία του περιβάλλοντος. Κατά τη ξήρανση, η υγρασία που υπάρχει στο εσωτερικό του σκυροδέματος μετακινείται προς την επιφάνεια του, όπου και εξατμίζεται. Η μεταφορά της υγρασίας πραγματοποιείται με μηχανισμό διάχυσης μέσω του πορώδους και έτσι εξαρτάται από τα χαρακτηριστικά του. Σε ένα υψηλής ποιότητας σκυρόδεμα με χαμηλό ποσοστό πορώδους, το νερό κινείται με σχετική δυσκολία. Επίσης αρχικά το νερό διαχέεται, αλλά μόλις ένας μηνίσκος σχηματιστεί, η κίνηση γίνεται μέσω διάχυσης αερίων (ατμών) και οι συντελεστές διάχυσης ελαχιστοποιούνται. Το μεγαλύτερο ποσοστό νερού κινείται διαμέσου μίας ξηρής ζώνης κοντά στην επιφάνεια και ο μηχανισμός που υπερισχύει είναι αυτός της διάχυσης ατμών. Ωστόσο όσο μεγαλύτερη είναι η έκταση της επιφάνειας σε σχέση με τον όγκο, τόσο μεγαλύτερος είναι ο αρχικός ρυθμός απώλειας υγρασίας και συνεπώς η συρρίκνωση υψηλότερη.

1.4. ΑΝΘΕΚΤΙΚΟΤΗΤΑ

Η ανθεκτικότητα εκφράζει τη δυνατότητα του σκυροδέματος να διατηρεί την αντοχή του και τη λειτουργικότητά του στην κατασκευή, στη μέγιστη δυνατή διάρκεια. Συγκεκριμένα αναφέρεται στην ικανότητα του υλικού να μη φθείρεται από το περιβάλλον (φυσικό ή μη) στο οποίο εκτίθεται. Η φθορά είναι το αποτέλεσμα των φυσικών και χημικών δράσεων που συμβαίνουν μεταξύ των συστατικών του σκυροδέματος και των συστατικών (διαβρωτικών μέσων) που συνιστούν το περιβάλλον όπου εκτίθεται. Εκδηλώνεται με ρωγμές και διογκώσεις στην επιφάνεια του σκυροδέματος αλλά και με μείωση της μηχανικής αντοχής του και απώλεια μάζας.

Οι βασικότερες αιτίες φθοράς που καταγράφονται στην πράξη είναι: η διάβρωση του σιδηροπλισμού, η ψύξη-απόψυξη στα ψυχρά κλίματα, οι χημικές αντιδράσεις μεταξύ του ενυδατωμένου τσιμέντου και των διαφόρων διαβρωτικών μέσων και οι φυσικοχημικές δράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό του σκυροδέματος μεταξύ των συστατικών του. Η μελέτη των

Αξιοποίηση του βιομηχανικού παραπροϊόντος (CBPD) στην παραγωγική διαδικασία δομικών στοιχείων – σύνθεση, μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα.

διαφόρων φυσικοχημικών δράσεων της φθοράς είναι σύνθετη και απαιτεί τη συνολική και πολύπλευρη εξέτασή τους. Η κατανόηση των φαινομένων που προκαλούν τη φθορά του σκυροδέματος επιτρέπει την αναγωγή τους σε παράγοντες ανθεκτικότητας.

Συνοψίζοντας τις απόψεις πολλών ερευνητών για τους μηχανισμούς φθοράς του σκυροδέματος, μπορούν να προκύψουν τρεις βασικοί παράγοντες που ρυθμίζουν την ανθεκτικότητα του σκυροδέματος:

- ❖ Η παρουσία συνδεδεμένων πόρων
- ❖ Η έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον
- ❖ Η παρουσία νερού

Πίνακας 1.3.Συνήθεις μηχανισμοί φθοράς του σκυροδέματος

Είδος έκθεσης	Περιγραφή	Αιτία	Συστατικά που συμμετέχουν	Συνέπειες
Χημική	Αλκαλοπυριτική αντίδραση	Αντίδραση πυριτικών αδρανών με αλκαλικά ιόντα	Αδρανή	Ρηγμάτωση στα όρια των αδρανών, συνοδευόμενη από εξάνθιση
	Προσβολή από θειικά	Αντίδραση των συστατικών της πάστας με θειικό άλας	Πάστα	Ρηγματώσεις και αποσύνθεση
	Προσβολή από οξέα	Διάλυση από οξέα	Πάστα	Επιφανειακή φθορά
	Διάβρωση οπλισμού	Οξειδωση χάλυβα οπλισμού	Οπλισμός	Ρηγματώσεις με ίχνη σκουριάς στα όρια την όπλισης
Φυσική	Παγετός	Πάγωμα νερού πορώδους	Πάστα	Θρυμματισμός και απολέπιση της επιφάνειας
	Ρηγμάτωση D-Cracking	Πάγωμα νερού πορώδους	Αδρανή	Ρηγμάτωση στα όρια των αδρανών, παράλληλη στους αρμούς
	Πυρκαγιά	Αποσύνθεση των ενυδατωμένων προϊόντων και ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων	Πάστα	Ρηγμάτωση και θρυμματισμός
	(Θερμική) συστολή/διαστολή	Ανάπτυξη εσωτερικών τάσεων	Πάστα	Ρηγμάτωση

1.4.1. Η ΕΝΝΟΙΑ ΤΟΥ ΠΟΡΩΔΟΥΣ

Το πορώδες της σκληρυμένης τσιμεντόπαστας αποτελεί την πλέον σημαντική ιδιότητα μετά τη θλιπτική αντοχή. Τα χαρακτηριστικά του πορώδους είναι αυτά που καθορίζουν τη συμπεριφορά της τσιμεντόπαστας έναντι χημικής διάβρωσης.

Το σκυρόδεμα, όπως και οι φυσικοί λίθοι, δεν είναι υλικό απόλυτα συμπαγές και πλήρες, αλλά περιέχει πλήθος από εσωτερικές κοιλότητες. Οι κοιλότητες αυτές είναι κενές από στερεό υλικό, γι' αυτό και ονομάζονται πόροι ή κενά. Το σύνολο αυτών των κοιλοτήτων ονομάζεται πορώδες του σκυροδέματος. Ανάλογα με την προέλευση τους οι πόροι διακρίνονται σε κατηγορίες. Έτσι υπάρχουν:

- a. Πόροι των αδρανών υλικών, δηλαδή πόροι των κόκκων της άμμου και των σκύρων
- b. Πόροι που δημιουργούνται από εγκλεισμό φυσαλίδων αέρα μέσα στο τσιμεντοκονίαμα
- c. Τριχοειδή κενά που δημιουργούνται μέσα στην τσιμεντοκονία μετά την εξάτμιση του νερού που περισσεύει
- d. Κοιλότητες μεταξύ τσιμεντοκονιάματος και αδρανών, είτε από κακή πρόσφυση μεταξύ τους, είτε λόγω συστολής του τσιμεντοκονιάματος, είτε από το νερό που συγκεντρώνεται κυρίως στην πλευρά των κόκκων, λόγω της εξίδρωσης του μείγματος
- e. Μακροσκοπικές κοιλότητες που προέρχονται από κακή συμπίκνωση
- f. Τριχοειδή κενά σχηματιζόμενα κατόπιν μικρορηγματώσεων που οφείλονται στις συστολές του τσιμεντοκονιάματος ή και στις εξωτερικές καταπονήσεις

Κατά την παρασκευή του τσιμεντοπολτού, δηλαδή την ανάμειξη του τσιμέντου με το νερό, τα κενά μεταξύ των κόκκων του τσιμέντου που πληρώνονται από το νερό και οι πόροι του αέρα, οι οποίοι δεν απομακρύνθηκαν κατά τη συμπίκνωση του, αποτελούν το πορώδες του τσιμεντοπολτού στο αρχικό στάδιο. Αμέσως μετά την ανάμειξη αρχίζει ο χημικός μετασχηματισμός των άνυδρων φάσεων του τσιμέντου σε καινούργιες ένυδρες χημικές ενώσεις. Αρχίζει δηλαδή η ενυδάτωση του

Αξιοποίηση του βιομηχανικού παραπροϊόντος (CBPD) στην παραγωγική διαδικασία δομικών στοιχείων – σύνθεση, μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα.

τσιμέντου διαδικασία, η οποία έχει σαν αποτέλεσμα το σχηματισμό των προϊόντων ενυδατώσεως. Με την πάροδο του χρόνου, τα κενά μεταξύ των κόκκων του τσιμέντου πληρώνονται σταδιακά από τα νεοσχηματιζόμενα ένυδρα του τσιμέντου, με αποτέλεσμα η αρχική διάμετρος και ο αρχικός όγκος τους να μειώνεται σταδιακά για όσο καιρό διαρκεί η ενυδάτωση. Η διάμετρος των πόρων αποτελεί σημαντικό παράγοντα για την αντίσταση του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού έναντι της χημικής και της φυσικής διάβρωσης και ο μηχανικός συνίσταται να μελετά τη μείωση της διαμέτρου των πόρων σε συνάρτηση με την ηλικία ενυδατώσεως του τσιμέντου ώστε με κατάλληλα μέτρα να εξασφαλίζεται η προστασία του σκυροδέματος από την διείσδυση βλαβερών υγρών και αερίων στη μάζα του. Στημείωση του πορώδους συντείνουν:

1. Η ελάττωση του νερού και επομένως η ελάττωση των πόρων που δημιουργούνται από την εξάτμιση του νερού που περισεύει.
2. Η κοκκομετρική διαβάθμιση των αδρανών.
3. Η καλή ποιότητα καθαρότητα των αδρανών για καλύτερη προσκόλληση της τσιμεντοκονίας (τα ασβεστολιθικά πετρώματα έχουν καλύτερη πρόσφυση από τα πυριτικά).
4. Η αποτελεσματική συμπύκνωση του νωπού σκυροδέματος.
5. Η καλή συντήρηση για την αποφυγή ρηγματώσεων κατά τη διάρκεια της πήξης.

Για το σκυρόδεμα το ολικό πορώδες κυμαίνεται μεταξύ 8 και 25%.

1.4.2. ΣΥΝΗΘΕΙΣ ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΙ ΦΘΟΡΑΣ ΤΟΥ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑΤΟΣ

Η συμπεριφορά του σκυροδέματος εξαρτάται άμεσα από τις περιβαλλοντικές συνθήκες και πιο συγκεκριμένα από τις φυσικές και χημικές δράσεις στις οποίες εκτίθεται. Η φθορά του σκυροδέματος από χημικές αιτίες είναι: οι αντιδράσεις εναλλαγής μεταξύ του διαβρωτικού υγρού και των συστατικών του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού, οι αντιδράσεις που περιέχουν υδρόλυση και απόπλυση των συστατικών του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού και αντιδράσεις που οδηγούν σε σχηματισμό διογκούμενων προϊόντων.

1.4.2.1. ΑΛΚΑΛΟΠΥΡΙΤΙΚΗ ΑΝΤΙΔΡΑΣΗ

Αποτέλεσμα της αντίδρασης των αλκαλικών ιόντων του τσιμέντου Portland με τα πυριτικά συστατικά των αδρανών είναι η διόγκωση και η ρηγμάτωση που οδηγούν σε απώλεια της αντοχής, της ελαστικότητας και της ανθεκτικότητας του σκυροδέματος.

Οι πρώτες ύλες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή του τσιμέντου Portland εξηγούν την παρουσία αλκαλίων στο τσιμέντο, που τυπικά κυμαίνονται από 0.2-1.5 % εκφρασμένα σε ισοδύναμο Na_2O . Ανάλογα με την περιεκτικότητα σε αλκάλια του τσιμέντου, το pH του νερού των πόρων στα κανονικά σκυροδέματα είναι 12.5-13.5. Σε αυτό το pH κάποιοι όξινοι λίθοι που συνίσταται από υδροξείδιο του πυριτίου ή πυριτικά ορυκτά δεν παραμένουν σταθεροί. Πολλές μελέτες, έδειξαν ότι τσιμέντα Portland που περιέχουν περισσότερο από 0.6 % ισοδύναμο Na_2O , όταν χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με αδρανή σκυροδέματος δραστικά σε αλκάλια δημιουργούν μεγάλες διογκώσεις που οφείλονται στην αντίδραση αλκαλίων-αδρανών. Όμως τα σκυροδέματα που περιέχουν πολύ υψηλό ποσοστό τσιμέντου, ακόμη και αν η περιεκτικότητα του τσιμέντου σε αλκάλια είναι μικρότερη του 0.6 % μπορούν να αποδειχθούν επιβλαβή. Πάντως έχει αποδειχθεί ότι αν η ολική περιεκτικότητα σε αλκάλια του σκυροδέματος από όλες τις πηγές είναι μικρότερη από 3 kg/m^3 , τότε η πιθανότητα δημιουργίας ζημιάς είναι μικρή.

Στα δραστικά με αλκάλια αδρανή, ανάλογα με το χρόνο, τη θερμοκρασία και το μέγεθος του κόκκου, όλα τα πυριτικά τους άλατα ή τα ορυκτά πυριτίου καθώς και το οξείδιο του πυριτίου σε ένυδρη μορφή ή άμορφο μπορούν να αντιδράσουν με αλκαλικά διαλύματα, παρ' όλο που ένας μεγάλος αριθμός των ορυκτών αντιδρά μόνο σε έναν ασήμαντο βαθμό. Ανάλογα με το βαθμό αταξίας στη δομή του αδρανούς, το πορώδες του και το μέγεθος του κόκκου του, παρουσία ιόντων υδροξυλίου και αλκαλομετάλλων, σχηματίζονται αλκαλοπυριτικά gels με διαφορετικές χημικές συστάσεις. Όταν τα αλκαλοπυριτικά gels έρχονται σε επαφή με το νερό, διογκώνονται προσροφώντας μεγάλες ποσότητες νερού μέσω όσμωσης. Η υδραυλική πίεση που αναπτύσσεται μπορεί να οδηγήσει σε διόγκωση και ρηγμάτωση των προσβεβλημένων τεμαχιδίων αδρανούς, της μήτρας του τσιμεντοπολτού που περιβάλλει τα αδρανή και του σκυροδέματος.

1.4.2.2. ΠΡΟΣΒΟΛΗ ΑΠΟ ΘΕΙΪΚΑ

Τα στερεά άλατα όταν είναι σε διάλυμα μπορούν να αντιδράσουν με το σκληρυμένο τσιμεντοπολτό. Συγκεκριμένα μπορεί να λάβει χώρα η αντίδραση τωνθειϊκώνμε το $\text{Ca}(\text{OH})_2$ και με το ενυδατωμένο αργιλικό ασβέστιο. Τα προϊόντα των αντιδράσεων, γύψος και θειαργιλικό ασβέστιο, οδηγούν σε διόγκωση και αποδιοργάνωση του σκυροδέματος. Η φθορά του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού Portland με το σχηματισμό γύψου είναι μια διαδικασία που οδηγεί σε μείωση της σκληρότητας και της αντοχής του σκυροδέματος, ενώ ακολουθεί διόγκωση, ρηγμάτωση και μετατροπή του υλικού σε πολτώδη και μη συνεκτική μάζα.

Ο ρυθμός της προσβολής από θειϊκά αυξάνει με την αύξηση της πυκνότητας του διαλύματος, όμως κάτω από μια συγκέντρωσή περίπου 0.5 % για το MgSO_4 ή 1 % για το NaSO_4 ο ρυθμός της αύξησης της έντασης της προσβολής γίνεται μικρότερος. Κορεσμένα διαλύματα MgSO_4 οδηγούν σε σοβαρές φθορές, παρ' όλο που με ένα μικρό λόγο νερού/τσιμέντο η φθορά θα λάβει χώρα μετά από 2-3 χρόνια. Συγκέντρωση 1000 ppm (ως προς SO_3) θεωρείται μετρίως επικίνδυνη, ενώ συγκέντρωση 2000 ppm θεωρείται πολύ επικίνδυνη, ειδικά αν το MgSO_4 είναι το επικρατέστερο συστατικό. Οι αντίστοιχες τιμές για τα διαλυτά θειϊκά στο έδαφος είναι 0.2-0.5 %. Η ταχύτητα προσβολής του σκυροδέματος δεν εξαρτάται μόνο από τη συγκέντρωση των θειϊκών, αλλά και από το ρυθμό αναπλήρωσης των θειϊκών που αντιδρούν με το τσιμέντο. Έτσι για να εκτιμηθεί ο κίνδυνος από τα θειϊκά πρέπει να είναι γνωστή η κίνηση των υπόγειων υδάτων. Όταν το σκυρόδεμα εκτίθεται από τη μια πλευρά σε πίεση νερού που φέρει θειϊκά, ο ρυθμός προσβολής είναι μεγαλύτερος. Ομοίως, εναλλαγή κορεσμού και ύγρανσης οδηγεί σε ταχεία φθορά. Αντιθέτως όταν το σκυρόδεμα δεν έχει κανένα πέρασμα για υπόγειο νερό, οι συνθήκες θα είναι πολύ λιγότερο επικίνδυνες. Σκυρόδεμα που έχει προσβληθεί από θειϊκά έχει χαρακτηριστική υπόλευκη εμφάνιση, ενώ η φθορά συνήθως ξεκινά από τις άκρες και τις γωνίες και ακολουθεί βαθμιαία ρηγμάτωση και θρυμματισμός.

Το ευπρόσβλητο του σκυροδέματος από τα θειϊκά μπορεί να μειωθεί με τη χρήση τσιμέντου με χαμηλό C_3A . Βελτίωση της αντοχής στα θειϊκά επιτυγχάνεται με την προσθήκη ή την μερική αντικατάσταση του τσιμέντου με

ποζολάνες. Η αντοχή του σκυροδέματος στα θειϊκά εξαρτάται επίσης από την ποιότητα του και ειδικά από την αδιαπερατότητά του.

1.4.2.3. ΠΡΟΣΒΟΛΗ ΑΠΟ ΟΞΕΑ

Σε υγρές συνθήκες το SO_2 , το CO_2 και άλλα όξινα καυσαέρια που βρίσκονται στην ατμόσφαιρα προσβάλλουν το σκυρόδεμα διαλύοντας και απομακρύνοντας μέρος του σκληρυμένου τσιμεντοπολτού. Αυτός ο τύπος προσβολής λαμβάνει χώρα σε καπνοδόχους, σήραγγες σιδηροδρόμων ατμού και σε βιομηχανικές συνθήκες.

Πρακτικά η προσβολή λαμβάνει χώρα για τιμές pH κάτω από 6.5. Για τιμές pH μεταξύ 3 και 6 οι διαδικασίες προσβολής έχουν ρυθμό περίπου ανάλογο της τετραγωνικής ρίζας του χρόνου. Αυτό δείχνει ότι ο καθοριστικός παράγοντας είναι η διάχυση, διαμέσου των στρώσεων, των χαμηλής διαλυτότητας προϊόντων της αντίδρασης που σχηματίζονται μετά τη διάλυση του $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Έτσι, δεν είναι μόνο η τιμή του pH που επιδρά στη διαδικασία προσβολής, αλλά και η δυνατότητα των ιόντων να μεταφερθούν. Το σκυρόδεμα επίσης προσβάλλεται από νερό που έχει ελεύθερο CO_2 , όπως το νερό των βάλτων. Το καθαρό νερό περιέχει λίγο CO_2 , που διαλύει το $\text{Ca}(\text{OH})_2$ και δημιουργεί επιφανειακή διάβρωση.

Ο βαθμός διάβρωσης χαρακτηρίζεται ως ασθενής, μέτριος, ή ισχυρός ανάλογα με το επίπεδο διαφόρων χημικών παραγόντων, όπως το pH και η περιεκτικότητα σε CO_2 του νερού και η οξύτητα των εδαφών. Η ταξινόμηση του βαθμού διάβρωσης εδαφών και νερών γίνεται σύμφωνα με τον Κ.Τ.Σ.-97 κατά EN 206-1.

1.4.2.4. ΔΙΑΒΡΩΣΗ ΟΠΛΙΣΜΟΥ

Η φθορά στο σκυρόδεμα από τη διάβρωση του σιδηροπλισμού εκδηλώνεται με τη μορφή διόγκωσης, ρηγματώσης και θρυμματισμού της επικάλυψης του οπλισμού. Επιπρόσθετα, λόγω της απώλειας της επικάλυψης, το στοιχείο από οπλισμένο σκυρόδεμα μπορεί να υποστεί δομικές φθορές, λόγω της απώλειας

Αξιοποίηση του βιομηχανικού παραπροϊόντος (CBPD) στην παραγωγική διαδικασία δομικών στοιχείων – σύνθεση, μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα.

της συνάφειας μεταξύ οπλισμού και σκυροδέματος και της μείωσης της διατομής του οπλισμού.

Ο χάλυβας καλύπτεται από ένα λεπτό στρώμα οξειδίου του σιδήρου, που είναι αδιαπέραστο και προσκολλημένο στην επιφάνεια του μετάλλου σε αλκαλικά περιβάλλοντα, και είναι αυτό που δημιουργεί την παθητικοποίηση του χάλυβα σε διάβρωση.

Όταν το σκυρόδεμα είναι σε επαφή με ένα όξινο διάλυμα, το pH του σκυροδέματος στην περιοχή του χάλυβα μπορεί να μειωθεί σε τιμές μικρότερες από 12.5, με αποτέλεσμα την καταστροφή παθητικοποίησης του χάλυβα και την έναρξη της διαδικασίας της διάβρωσης. Στην περίπτωση παρουσίας χλωριόντων και ανάλογα του λόγου Cl^-/OH^- , το προστατευτικό στρώμα μπορεί να καταστραφεί ακόμη και αν οι τιμές pH είναι σημαντικά μεγαλύτερες του 12.5. Όταν οι λόγοι Cl^-/OH^- είναι μεγαλύτεροι από 0.6, ο χάλυβας δεν προστατεύεται επί μακρόν έναντι διάβρωσης, πιθανώς γιατί το στρώμα οξειδίου του σιδήρου είτε γίνεται διαπερατό είτε ασταθές κάτω από αυτές τις συνθήκες.

Όταν καταστραφεί το προστατευτικό στρώμα του χάλυβα, ο ρυθμός διάβρωσης καθορίζεται από την ειδική αντίσταση και τη διαθεσιμότητα του οξυγόνου.

1.4.2.5. ΕΝΑΝΘΡΑΚΩΣΗ

Η ενανθράκωση του σκυροδέματος προκαλείται από τη χημική αντίδραση του CO_2 , που υπάρχει στην ατμόσφαιρα με το $Ca(OH)_2$ του σκυροδέματος. Προϊόντα της αντίδρασης είναι το ανθρακικό ασβέστιο και το νερό.

Για να πραγματοποιηθεί αυτή η αντίδραση απαιτείται μικρή ποσότητα νερού. Το μεγαλύτερο ποσοστό ενανθράκωσης παρατηρείται σε αέρα με σχετική υγρασία 50-70 %. Σε ξηρό σκυρόδεμα δεν πραγματοποιείται ενανθράκωση, γιατί δεν μπορεί να συμβεί διάχυση, ενώ σε κορεσμένο με νερό σκυρόδεμα εμποδίζεται η διάχυση του στους πόρους του. Το νερό που παράγεται από την ενανθράκωση διαχέεται στο εσωτερικό του σκυροδέματος και η ενανθράκωση συνεχίζεται σε μεγαλύτερα βάθη.

1. Σκυροδέμα – βασικά συστατικά

Η ενανθράκωση του σκυροδέματος αποτελεί εμμέσως αιτία φθοράς, καθώς μειώνει την αλκαλικότητα της πάστας και συνεπώς αυξάνει τον κίνδυνο διάβρωσης του σιδηροπλισμού. Όμως η περιορισμένη ενανθράκωση χαρακτηρίζεται ευεργετική, ειδικά όταν το CO₂ προέρχεται από την ατμόσφαιρα και από «σκληρό» νερό. Επιπλέον, η περιορισμένη ενανθράκωση θεωρείται ότι μειώνει τη διαπερατότητα του σκυροδέματος, καθώς το ανθρακικό ασβέστιο που σχηματίζεται και είναι αδιάλυτο πληρώνει τους πόρους και τις μικρορωγμές της δομής του σκυροδέματος. Αντίθετα η υπερβολική ενανθράκωση παρουσία δραστικού CO₂ αυξάνει τη διαπερατότητα, γιατί το όξινο ανθρακικό ασβέστιο που σχηματίζεται διευρύνει τους πόρους και τις μικρορωγμές.

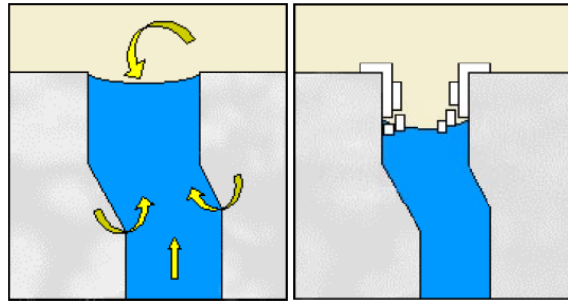
Σε κάθε περίπτωση η ενανθράκωση περιορίζεται με τη μείωση της διαπερατότητας του σκυροδέματος και την αποτελεσματική συμπύκνωση του σκυροδέματος.

1.4.2.6. ΕΞΑΝΘΙΣΗ

Εξάνθιση είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ένα άσπρο ίζημα από CaCO₃ ή MgCO₃ σχηματίζεται στην επιφάνεια τσιμεντοειδών υλικών. Το άσπρο ίζημα από CaCO₃ ή MgCO₃ που σχηματίζεται στην επιφάνεια έγχρωμων κατασκευών μπορεί να αποτελέσει αιτία απόρριψης του προϊόντος από τους πελάτες για αισθητικούς κυρίως λόγους.

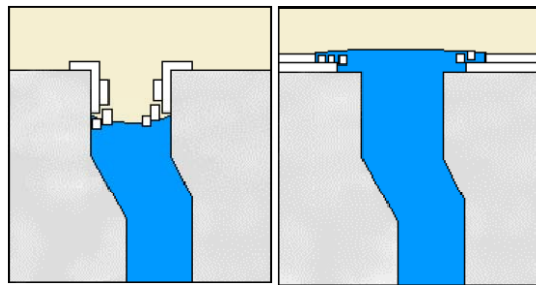
Η πρωταρχική εξάνθιση συμβαίνει κατά τη διαδικασία της ωρίμανσης. Το πλεονάζων νερό που δεν έχει δεσμευτεί από το τσιμέντο, λόγω διαφοράς πίεσης διαχέεται από το εσωτερικό του δοκιμίου προς την επιφάνεια, όπου έρχεται σε επαφή με τα ιόντα CO₃⁻² από το CO₂ της ατμόσφαιρας. Μαζί με το νερό μεταφέρονται ιόντα ασβεστίου προερχόμενα από τις φάσεις του τσιμέντου ή από τα αδρανή. Έτσι το Ca και το CO₃⁻² διαλύονται και με την εξάτμιση του νερού οι συγκεντρώσεις τους αυξάνονται σχηματίζοντας το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO₃). Ο μηχανισμός σχηματισμού προϊόντων εξάνθισης απεικονίζεται στο Σχήμα 1.3.

Αξιοποίηση του βιομηχανικού παραπροϊόντος (CBPD) στην παραγωγική διαδικασία δομικών στοιχείων – σύνθεση, μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα.



Σχήμα 1.3: Μηχανισμός σχηματισμού προϊόντων εξάνθισης.

Σε συνάρτηση με τις κλιματολογικές συνθήκες, όταν συμβαίνει ταχεία ξήρανση του δοκιμίου, το ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) σχηματίζεται στους πόρους, ενώ όταν η ξήρανση του δοκιμίου είναι αργή το άσπρο ίζημα εμφανίζεται στην επιφάνεια του δοκιμίου (Σχήμα 1.4).



Σχήμα 1.4: Εξάνθιση σε συνάρτηση με τις κλιματολογικές συνθήκες

Σημαντική επίδραση στην πρωταρχική εξάνθιση έχουν:

- Το πορώδες και η διαπερατότητα
- Η συγκέντρωση ιόντων στους πόρους
- Οι κλιματολογικές συνθήκες (θερμοκρασία περιβάλλοντος και σχετική υγρασία)

Υπάρχουν τρεις δοκιμές με τις οποίες προσδιορίζεται η εξάνθιση:

- ❖ Δοκιμή ύγρανσης
- ❖ Δοκιμή διήθησης
- ❖ Κύκλου ύγρανσης και ξήρανσης

1.4.2.7. ΠΑΓΕΤΟΣ

Εξαιτίας των χαμηλών θερμοκρασιών ένα τμήμα του νερού των πόρων της τσιμεντόπαστας έχει την τάση να παγώνει. Το παγωμένο νερό «σπρώχνει» το νερό των πόρων που βρίσκεται ακόμα σε υγρή μορφή προκειμένου να βρει χώρο να τοποθετηθεί. Εφόσον υπάρχει αρκετός χώρος (εσωτερικό πορώδες) για να χωρέσει τον επιπλέον όγκο καθώς και το νερό που μετακινείται, τουλάχιστον μέχρι να λιώσουν οι πάγοι (διαδικασία απόψυξης) το σκυρόδεμα θεωρείται ανθεκτικό έναντι του παγετού. Σε διαφορετική περίπτωση ασκούνται έντονες κρυσταλλικές πιέσεις στα τοιχώματα των πόρων, οι εφελκυστικές τάσεις. Όταν οι εφελκυστικές τάσεις που ασκούνται λόγω του σχηματισμού του πάγου ξεπεράσουν την εφελκυστική αντοχή του σκυροδέματος, το υλικό διαρρηγνύεται. Αρχικά προκαλούνται έντονες ρηγματώσεις, οι οποίες όμως επιτρέπουν την είσοδο επιπλέον νερού, όταν οι θερμοκρασίες αυξηθούν (φάση απόψυξης). Το επιπλέον αυτό νερό θα παγώσει με τη σειρά του όταν οι θερμοκρασίες μειωθούν (φάση ψύξης). Δημιουργούνται κατ' αυτόν τον τρόπο επιπλέον κρύσταλλοι πάγου, οι οποίοι αυξάνουν περαιτέρω την εφαρμοζόμενη κρυσταλλική πίεση στο εσωτερικό του σκυροδέματος. Έτσι δημιουργείται ένας επαναλαμβανόμενος κύκλος. Δομικά στοιχεία σκυροδέματος που υπόκεινται σε επαναλαμβανόμενους κύκλους ψύξης και απόψυξης, επιτρέπουν τη διείσδυση αυξημένων ποσοτήτων νερού σε υγρή μορφή οι οποίες παγώνουν και αυξάνουν τις εφαρμοζόμενες εφελκυστικές τάσεις στο εσωτερικό τους. Ο συνολικός αριθμός κύκλων ψύξης-απόψυξης κατά τη διάρκεια ζωής μίας κατασκευής οπλισμένου σκυροδέματος, είναι πολύ πιο σημαντικός από τη χαμηλότερη θερμοκρασία έκθεσης σε απόλυτες τιμές.

1.4.2.8. ΠΥΡΚΑΓΙΑ

Τα προϊόντα της ενυδάτωσης του τσιμέντου Portland θεωρούνται γενικώς χημικά σταθερά σε θερμοκρασίες μεταξύ 20 και 80 °C. Το τσιμεντολίθωμα χάνει το προσροφημένο νερό μεταξύ 60-85 °C και το ελεύθερο νερό του μεσοστρώματος ενύδρων μεταξύ 80-100°C. Η ανάπτυξη της θερμοκρασίας λοιπόν μέχρι τους 100°C έχει ως αποτέλεσμα την εκ νέου διάθεση στο τσιμεντολίθωμα ποσότητας νερού, το οποίο μάλιστα έχει μετατραπεί σε

Αξιοποίηση του βιομηχανικού παραπροϊόντος (CBPD) στην παραγωγική διαδικασία δομικών στοιχείων – σύνθεση, μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα.

υδρατμούς. Στη θερμοκρασιακή περιοχή μεταξύ 100-200 °C, το τσιμεντολίθωμα αρχίζει να χάνει τη σταθερότητα του. Σε αυτό το θερμοκρασιακό εύρος η εξατμιζόμενη υγρασία συμβάλλει στη μείωση των δυνάμεων συνοχής μεταξύ των ενύδρων που δημιουργούν την μηχανική αντοχή του υλικού (ασβεστοπυριτικά ένυδρα, CSH), τη συρρίκνωση τους και τελικά την ελάττωση της αντοχής. Παράλληλα επηρεάζονται οι χημικοί δεσμοί μεταξύ των ενύδρων, το μέγεθος και η κατανομή των πόρων. Σε θερμοκρασία άνω των 350 °C ξεκινά η διάσπαση του Ca(OH)₂ σε CaO και H₂O. Η διάσπαση αυτή δεν είναι κρίσιμη, μπορεί όμως να οδηγήσει σε σοβαρές ζημιές εξαιτίας της διαστολής της ασβέστου μετά την επαναφορά της θερμοκρασίας σε κανονικά επίπεδα.

Στη θερμοκρασιακή περιοχή 400-600 °C ολοκληρώνεται η εξάτμιση του φυσικά δεσμευμένου νερού στους πόρους των ενύδρων και αρχίζει σταδιακά η αποσύνθεση των CSH και η καταστροφή της γέλης του τσιμεντολιθώματος. Η αποσύνθεση των ενύδρων συνεχίζεται με εντονότερους ρυθμούς στο θερμοκρασιακό εύρος 600-700 °C και ολοκληρώνεται στους 800 °C. Η τήξη του τσιμεντολιθώματος επέρχεται σε θερμοκρασίες άνω των 900 °C.

Τα ασβεστολιθικά αδρανή διασπώνται σε θερμοκρασίες άνω των 800 °C. Το φαινόμενο είναι γνωστό και ως ασβεστοποίηση των αδρανών. Αυτή προκαλεί με τη σειρά της διαστολή, ρωγμές και θραύση των ασβεστολιθικών αδρανών. Η ασβεστοποίηση των αδρανών ξεκινάει από τους 680 °C. Τα πυριτικά αδρανή είναι περισσότερο ευάλωτα σε χαμηλότερες θερμοκρασίες.

Το σκυρόδεμα χάνει το μεγαλύτερο μέρος της αντοχής του στις υψηλές (άνω των 600 °C) θερμοκρασίες, όμως δεν καταρρέει, ενώ παραμένει ασφαλές σε θερμοκρασίες μέχρι 250-300 °C. Επιπλέον, το σκυρόδεμα δεν μπορεί να παραλάβει σταθερό φορτίο όταν θερμανθεί πάνω από 600 °C.

1.5. ΠΡΟΣΘΕΤΑ

1.5.1. ΦΥΣΙΚΕΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΗΤΕΣ ΠΟΖΟΛΑΝΕΣ

Τα πρόσθετα συστατικά (addition) είναι τα λεπτομερώς διαμερισμένα ανόργανα υλικά που χρησιμοποιούνται στο σκυρόδεμα με στόχο τη βελτίωση ή τη ρύθμιση κάποιων ιδιοτήτων. Το EN 206-1 αναφέρεται σε δύο κατηγορίες

1. Σκυρόδεμα – βασικά συστατικά

προσθέτων: τα σχεδόν αδρανή πρόσθετα (τύπου 1 - fillerαδρανών με προδιαγραφές και χρώματα σύμφωνα με το prEN 12620) και τα πρόσθετα που έχουν ποζολανικές ή λανθάνουσες υδραυλικές ιδιότητες (τύπου 2). Τα πυριτικά παραπροϊόντα (τύπου 2) που χρησιμοποιούνται στο τσιμέντο και στο σκυρόδεμα, συμπεριλαμβάνουν τις Ιπτάμενες Τέφρες, σύμφωνα με το EN450, και την πυριτική παιπάλη κατά prEN13263, και ταξινομούνται στις εξής 5 κατηγορίες:

Υλικά με υδραυλικές ιδιότητες. Περιλαμβάνονται λεπτόκοκκα υλικά με υαλώδη πυριτική φάση, η οποία έχει τροποποιηθεί σημαντικά από την παρουσία σε αξιοσημείωτες ποσότητες ιόντων ασβεστίου, μαγνησίου και αργιλίου. Τα υλικά της κατηγορίας αυτής απαιτούν μικρές ποσότητες τσιμέντου Πόρτλαντ ή άλλων διεγερτών για να επιταχύνουν την ενυδάτωση τους. Η ταχέως ψυχθείσα σκωρία υψικαμίνων και μερικές υψηλού ασβεστίου ιπτάμενες τέφρες ανήκουν στην κατηγορία αυτή.

Υλικά με ποζολανικές και υδραυλικές ιδιότητες. Περιλαμβάνονται υλικά με μείγμα αργιλοπυριτικής και πυριτικής υαλώδους φάσης που περιέχουν μεγάλες ποσότητες ασβεστίου και μαγνησίου. Στην κατηγορία αυτή, όπου τα υλικά εμφανίζουν τόσο υδραυλική όσο και ποζολανική δράση ανήκουν οι υψηλού ασβεστίου ιπτάμενες τέφρες με περιεκτικότητα σε CaO 10-20%.

Κανονικές ποζολάνες. Στην κατηγορία αυτή περιλαμβάνονται υλικά που συνίστανται από πυριτική υαλώδη φάση τροποποιημένη με άργιλο ή σίδηρο. Στην κατηγορία αυτή ανήκουν οι χαμηλού ασβεστίου ιπτάμενες τέφρες.

Υλικά με ισχυρώς ποζολανικές ιδιότητες. Σε αυτή περιλαμβάνονται υλικά με πολύ μεγάλη λεπτότητα, που συνίσταται από SiO₂ σε μη κρυσταλλική φάση. Τα υλικά αυτά, στα οποία ανήκει η πυριτική παιπάλη, έχουν μεγάλη ποζολανική δραστηριότητα.

Υλικά μικρής δραστηριότητας. Τέτοια υλικά είναι η σκωρία υψικαμίνων που ψύχθηκε με αργό ρυθμό ή οι τέφρες βάσης. Τα υλικά αυτά πρέπει να αλεσθούν σε πολύ μεγάλη λεπτότητα για να αποκτήσουν αποδεκτές ιδιότητες (κυρίως αντοχές) όταν συνεργάζονται με το τσιμέντο.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι ιδιότητες των παραπάνω προσθέτων ενισχύονται σημαντικά εάν τα υλικά αυτά αλεσθούν σε μεγάλες λεπτότητες. Τα περισσότερα από τα παραπροϊόντα, των οποίων προβλέπεται η προσθήκη

Αξιοποίηση του βιομηχανικού παραπροϊόντος (CBPD) στην παραγωγική διαδικασία δομικών στοιχείων – σύνθεση, μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα.

στο EN 197-1 και στο EN 206-1 προέρχονται από παραγωγική διαδικασία που περιλαμβάνει διεργασία μετασχηματισμού σε υψηλές θερμοκρασίες. Μόνο φυσικές ποζολάνες, ο μετακαολίνης και ο ασβεστόλιθος είναι φυσικά υλικά. Ο ασβεστόλιθος είναι το μόνο υλικό που δεν περιέχει πυρίτιο, η δράση του οποίου κατά την ενυδάτωση θεωρείται ιδιαίτερα σημαντική για την εκδήλωση συμπεριφοράς των επιμέρους τσιμέντων. Δικαιολογείται επομένως η μη συμμετοχή του ασβεστόλιθου στα βιομηχανικά παραπροϊόντα.

Πίνακας 1.4. Χαρακτηριστικά βιομηχανικών παραπροϊόντων που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα τσιμέντα (ΤΥΑ: τέφρα υψηλού περιεχομένου σε ασβέστιο)

	Σκωρία	Κανονική ΙΤ	ΤΥΑ	Πυρ. Παιπάλη
SiO ₂ (%)	27-40	34-60	25-40	>80
Al ₂ O ₃	5-33	17-31	8-17	0.1-0.5
Fe ₂ O ₃	1	2-25	5-10	0.1-5
CaO	30-50	0.5-10	10-38	<1
C	-	<10	<10	-
Βασικότητα	1.2-1.8	1.0-1.8	1.0-1.8	0.1
Κρυσταλλική φάση	<30	10-50	10-50	<5
Άμορφη φάση	Si-Al-Ca-O	Si-Al-Ca-O	Si-Al-(Ca)-O	Si-O
ΔιαλυτόCaO(ppm)	150-300			
Διαλυτό(SO ₃)(ppm)	20-150			
Σχήμα σωματιδίων	Με αιχμές	Σφαιρικό	Σφαιρικό	Σφαιρικό
Λεπτότητα(cm ² /gr)	3000-6000	2500-4000	2500-4000	Πολύ μεγάλο
Λεπτότητα(BET)(m ² /g)	0.5-2	0.5-2	0.5-2	20
Πυκνότητα(g/cm ³)	2.9	2.0-2.7	2.0-2.7	2.3

Οι φυσικές ποζολάνες είναι φυσικά αποθέματα ηφαιστειογενών πηγών ή ιζηματογενή πετρώματα με υψηλή περιεκτικότητα σε πυριτικά, τα οποία πιθανόν είναι υπολείμματα ορυκτών που έχουν υποστεί χημική προσβολή και πυριτικά υλικά που προέρχονται από σκελετούς οργανισμών. Υλικά που μπορούν να συμπεριληφθούν στις φυσικές ποζολάνες είναι ο ζεόλιθος, η θηραϊκή γη κ.λπ..

1. Σκυρόδεμα – βασικά συστατικά

Φυσικά ποζολανικά πετρώματα υπήρχαν άφθονα σε ηφαιστειογενείς περιοχές. Κτίρια που σήμερα θεωρούνται μνημεία φτιάχτηκαν με χρήση φυσικών ποζολανικών υλικών. Η αντοχή των κατασκευών αυτών με το πέρασμα του χρόνου αποδεικνύει με τον καλύτερο τρόπο τις ευεργετικές ιδιότητες των υλικών αυτών.

Η χημική σύνθεση των ποζολανών ποικίλλει ανάλογα με την περιοχή εξόρυξης τους, γενικά όμως περιέχουν SiO_2 (50-70%), Al_2O_3 (10-20%) και μικρότερες ποσότητες άλλων οξειδίων. Στον Πίνακα 1.5 παρουσιάζονται οι χημικές συστάσεις ποζολανών από τις περιοχές της Βαυαρίας, της Αυστρίας, της Ιταλίας και της Ελλάδας. Η ορυκτολογική τους σύνθεση αποτελείται κυρίως από υαλώδη φάση καθώς και ποσότητες χαλαζία, καολινίτη, λευκίτη, ιλλίτη και άλλων φάσεων.

Πίνακας 1.5. Αντιπροσωπευτικές χημικές συστάσεις φυσικών ποζολανών

Προέλευση	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	TiO_2	SO_3	LOI
Βαυαρία	62.70	15.20	4.30	5.60	1.85	1.95	2.00	-	-	7.40
Αυστρία	57.13	17.51	3.28	0.22	0.08	0.44	2.74	0.80	1.96	15.29
Ιταλία	48.13	16.25	7.30	9.96	5.70	0.88	4.41	0.73	-	4.32
Θήρα	60.75	15.92	5.05	5.97	2.29	3.87	2.73	0.5-1	-	4.14
Νίσυρος	71.79	12.57	1.00	1.65	0.74	1.85	4.25	0.5-1	-	5.23
Πέλλα	59.57	18.52	4.85	3.82	1.85	2.30	1.93	0.5-1	-	5.75

Όπως όλα τα ποζολανικά υλικά έτσι και οι φυσικές ποζολάνες αντιδρούν με το Ca(OH)_2 που σχηματίζεται κατά την ενυδάτωση του τσιμέντου Πορτλαντ, σύμφωνα με την ποζολανική αντίδραση. Η ποζολανική αντίδραση συνεχίζεται στη διάρκεια του χρόνου με συνέπεια τη μείωση του περιεχόμενου Ca(OH)_2 .

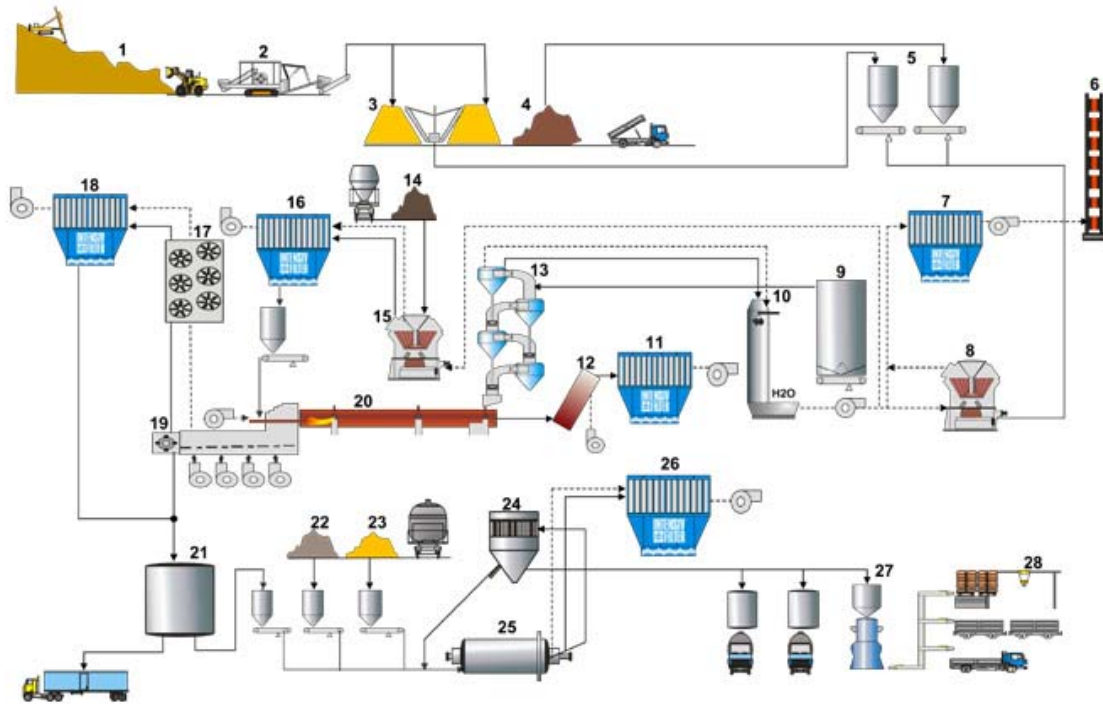
1.5.2.ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΑ ΠΑΡΑΠΡΟΪΟΝΤΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΤΟΥ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ

Όπως είναι αναμενόμενο, και από την παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου παράγονται παραπροϊόντα, των οποίων η διαχείριση αποτελεί κρίσιμο ζήτημα. Προσπάθειες καταβάλλονται προκειμένου τα παραπροϊόντα αυτά να αξιοποιηθούν περαιτέρω από την τσιμεντοβιομηχανία, ως πρόσθετα του τσιμέντου και του σκυροδέματος.

Δύο σημαντικά παραπροϊόντα της παραγωγικής διαδικασίας του τσιμέντου είναι η σκόνη αποκονίωσης περιστροφικών καμίνων (CemenKilnDust - CKD) και η σκόνη αποκονίωσης της βαλβίδας παράκμψηςτης περιστροφικής καμίνου(ByPassFilterDust -CBPD). Η σκόνη CKD είναι η σκόνη που εξέρχεται μαζί με τα αέρια καύσης από το σύστημα έψησης του κλίνκερ. Αντίστοιχα, η σκόνη CBPD προκύπτει από την αποκονίωση των αερίων καύσης που απομακρύνονται από την περιστροφική κάμινο (μέσω της βαλβίδας bypass), προκειμένου να σπάσει ο κύκλος των πτητικών συστατικών της φαρίνας και να μειωθεί η περιεκτικότητα των αλκαλίων στο κλίνκερ. Πάντως μόνο ένα μικρό μέρος (περίπου 20 %) των αερίων καύσης μπορούν να απομακρυνθούν από την περιστροφική κάμινο (πριν τον προθερμαντήρα) μέσω της βαλβίδας παράκαμψης (bypass), αφού υπάρχει αρνητική επίδραση στην κατανάλωση ενέργειας (λόγω της απώλειας του θερμικού περιεχόμενου των αερίων καύσης).

Στο Σχήμα 1.5, απεικονίζεται η παραγωγική διαδικασία τσιμέντου, με τη ξηρή μέθοδο. Από το τμήμα 9, η φαρίνα τροφοδοτείται στον προθερμαντήρα (τμήμα 13). Στη συνέχεια αυτό το ρεύμα οδηγείται στο φίλτρο αλακαλίων(τμήμα 11), από το οποίο και συλλέγεται η σκόνη CBPD. Ενδεικτικά αναφέρεται ότι για μονάδα παραγωγής τσιμέντου με ετήσια δυναμικότητα 10⁶tkλίνκερ, παράγονται ετησίως περίπου 40,000 tCBPD(ποσοστό κατακράτησης CBPD στο φίλτρο αποκονίωσης, περίπου 4%)

1. Σκυρόδεμα – βασικά συστατικά



Σχήμα 1.5. Παραγωγική διαδικασία τσιμέντου, με την ξηρή μέθοδο.

Γενικά το παραπροϊόν CBPD θεωρείται ότι δεν έχει ιδιαίτερη ποζολανική αξία. Αφετέρου περιέχει σε σημαντικό ποσοστό αλκάλια, χλωριόντα και θειικά, των οποίων η περιεκτικότητα στο τσιμέντο και στο σκυρόδεμα, προδιαγράφεται με αυστηρά όρια βάσει διεθνών και εθνικών προδιαγραφών. Ως εκ τούτου, κατά βάση χρησιμοποιείται σε δραστηριότητες που δεν αφορούν στην τεχνολογία τσιμέντου και σκυροδέματος (εμπλουτισμός, σταθεροποίηση εδαφών, κ.α.). Αυτό δημιουργεί μια επιπλέον περιβαλλοντική και οικονομική επιβάρυνση, που αφορά στη διαχείριση του υλικού. Έτσι καταβάλονται προσπάθειες προκειμένου το παραπροϊόν CBPD να μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην τεχνολογία τσιμέντου ή σκυροδέματος, είτε ως ποζολανικό πρόσθετο στο τσιμέντο, είτε ως λεπτόκοκο συστατικό (filler) σε εφαρμογές οδοποιίας από σκυρόδεμα, είτε προς αντικατάσταση του τσιμέντου στο σκυρόδεμα.

2. ΤΣΙΜΕΝΤΟΛΙΘΟΙ

2.1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο τσιμεντόλιθος αποτελεί λιθόσωμα το οποίο παρασκευάζεται με την προσθήκη τσιμέντου Πόρτλαντ, αδρανών και νερού και ενδέχεται να περιέχει πρόσμικτα, πρόσθετα και χρωστικές. Τα αδρανή που συνήθως χρησιμοποιούνται είναι άμμος και γαρμπίλι. Στην περίπτωση των τσιμεντόλιθων χαμηλού ειδικού βάρους, δύναται να χρησιμοποιηθούν βιομηχανικά παραπροϊόντα προς αντικατάσταση των αδρανών, όπως η π.χ. η ιπτάμενη τέφρα.

Οι τσιμεντόλιθοι διαθέτουν σχήμα ορθογώνιου παραλληλεπίπεδου σε διαστάσεις οι οποίες προδιαγράφονται. Συνήθως κοιλότητες τετραγωνικής διατομής απαντώνται στο εσωτερικό τους, με σκοπό τη μείωση του βάρους τους αλλά και τη θερμομόνωση. Χρησιμοποιούνται για την κατασκευή συνήθως άοπλης τοιχοποιίας σε κτίρια (βιομηχανικά, αποθήκες, κ.α.) ή για άλλες κατασκευές (τοιχοποιίες περίφραξης).

2.2.ΣΥΝΘΕΣΗ - ΠΑΡΑΣΚΕΥΗ

Οι τσιμεντόλιθοι παρασκευάζονται με μορφοποίηση νωπού σκυροδέματος με δόνηση και συμπίεση σε σταθερές ή κινητές μήτρες. Ακολουθεί ολιγοήμερη ωρίμανση σε χώρους ελεγχόμενης θερμοκρασίας και σχετικής υγρασίας. Μία συνήθη σύνθεση για την παρασκευή τσιμεντόλιθου με ειδικό βάρος 2100 Kg/m³ αποτελείται από 120 Kg τσιμέντο, 1900 Kg αδρανή και 80 Kg νερό (w/c=0.35-0.50).

2.3.ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ

Παρατηρείται μεγάλο εύρος τιμών στα χαρακτηριστικά και τις ιδιότητες των λιθοσωμάτων. Στον πίνακα 2.1, ενδεικτικά αναφέρονται οι τιμές διαστάσεων και βαρών, για λιθοσώματα από σκυρόδεμα με συνήθη αδρανή (φαινόμενη πυκνότητα σκυροδέματος 2250-2450 kg/m³) και κυμαινόμενες διαστάσεις (Πλάτος 10-17 cm, Μήκος 33-37 cm, Ύψος 16-20 cm)

2. Τσιμεντόλιθοι

Πίνακας 2.1. Ενδεικτικές τιμές διαστάσεων και βαρών

Π (cm)	M (cm)	Υ (cm)	Πλήθος κοιλωμάτων	Βάρος (kg)
10	33	20	2	10
17	35	18	2	11
17	36	16	2	12

Όσον αφορά στις μηχανικές ιδιότητες η Θλιπτική αντοχή ενδεικτικά κυμαίνεται μεταξύ 3 – 12 Μpa.

Με βάση το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 771.03, προδιαγράφονται όλες οι ιδιότητες των τσιμεντόλιθων.

3. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

3.1. ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΠΡΟΕΤΟΙΜΑΣΙΑ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων, χρησιμοποιήθηκαν τσιμέντο Πορτλαντ CEM I 42.5, αδρανή με κοκκομετρική διαβάθμιση 0/4 (άμμος) και 4/8 (ρυζάκι) και πρόσθετο CBPD. Στον πίνακα 3.1 δίνεται η κοκκομετρική ανάλυση των αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν στη σύνθεση του σκυροδέματος. Επίσης στον πίνακα 3.2 δίνεται η χημική ανάλυση του πρόσθετου CBPD. Προκειμένου να πραγματοποιηθεί η σύνθεση του σκυροδέματος συλλέχθηκαν στοιχεία από μονάδες παραγωγής τσιμεντόλιθων. Έτσι, με βάση τη βιομηχανική πρακτική, σε παρτίδα συνολικού βάρους 845 κιλών, το τσιμέντο συμμετέχει με 65 κιλά. Συνεπώς για συνήθη λόγο $w/c = 0.5$ βρέθηκε η ποσότητα νερού στα 35 κιλά. Αφαιρώντας από το συνολικό βάρος το βάρος του νερού και του τσιμέντου βρίσκεται η συνολική ποσότητα των αδρανών, που είναι 745 κιλά και τα οποία με βάση τη συνήθη βιομηχανική πρακτική αναμιγνύονται σε αναλογία 1/3 άμμος και 2/3 γαρμπίλι.

Πινάκας 3.1. Κοκκομετρική διαβάθμιση αδρανών τελικής σύνθεσης.

ΜΕΓΕΘΟΣ ΟΠΗΣ ΚΟΣΚΙΝΟΥ	ΡΥΖΑΚΙ (4/8)	ΑΜΜΟΣ (0/4)
31.5		
16		
8	100	
4	6	100
2	1	98
1		52
0.5		6
0.25		1
N ₀ 200 S.E%	0.20	0.7
ΕΙΔΙΚΑ ΒΑΡΗ		
APAR	2.72	2.64
BULK	2.64	2.62
SSD	2.67	2.63
ABS% V	1.10	0.36

Πίνακας 3.2. Χημική ανάλυση προσθέτου CBPD

	%
SiO ₂	10.456
Al ₂ O ₃	1.477
Fe ₂ O ₃	3.304
CaO	42.816
MgO	2.623
K ₂ O	8.805
Na ₂ O	3.216
SO ₃	2.462
TiO ₂	0.216
P ₂ O ₅	0.045
Cl	10.6
LOI	15.76

Στη συνέχεια μετρήθηκε το ειδικό βάρος τσιμεντόλιθων και βρέθηκε $\gamma=2100 \text{ Kg/m}^3$. Μελετήθηκε πλήθος εργαστηριακών δοκιμών, με σκοπό την επίτευξη του ειδικού βάρους των 2100 Kg/m^3 . Στον πίνακα 3.3 δίνονται ενδεικτικά 3 δοκιμαστικές συνθέσεις, από τις οποίες ακολουθήθηκε η τρίτη.

Όλα τα δοκίμια που παρασκευάστηκαν συμπυκνώθηκαν σε δονητική τράπεζα για 15''.

Πίνακας 3.3. Δοκιμαστικές συνθέσεις σκυροδέματος

	1		2		3	
	Kg/m ³	Kg σε 15 l	Kg/m ³	Kg σε 15 l	Kg/m ³	Kg σε 15 l
Τσιμέντο	162	2,430	162	2,430	162	2,430
Ρυζάκι (4/8)	1236	18,818	1236	18,540	1236	18,540
Άμμος (0/4)	618	9,548	618	9,270	618	9,270
Νερό	87	0,749	87	1,305	87	1,305
Άθροισμα	2103		2103		2103	
Ειδικό βάρος (Kg/m ³)		1910		1786		1985

Αξιοποίηση του βιομηχανικού παραπροϊόντος (CBPD) στην παραγωγική διαδικασία δομικών στοιχείων – σύνθεση, μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα.

Για την πραγματοποίηση των εργαστηριακών δοκιμών πραγματοποιήθηκαν πέντε διαφορετικές συνθέσεις. Παρασκευάστηκε η σύνθεση δείγματος αναφοράς (σύνθεση Α) από την οποία με αντικατάσταση άμμου ή/και τσιμέντου με το πρόσθετο CBPD προέκυψαν τέσσερις ακόμα συνθέσεις (Β, C, D, E). Στον πίνακα 3.4 δίνονται τα ποσοστά αντικατάστασης, καθώς και οι ποσότητες των υλικών που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 3.4. Συνθέσεις εργαστηριακών δοκιμών (Kg/m³)

	A	B (αντικατάσταση άμμου 10 %)	C(αντικατάσταση η άμμου 10 % και τσιμέντου 15 %)	D(αντικατάσταση η άμμου 10 % και τσιμέντου 30 %)	E(αντικατάσταση τσιμέντου 30 %)
I42,5	160	160	136	112	98
Νερό	87	87	87	87	87
Άμμος (0/4)	620	558	558	558	620
Ρυζάκι (4/8)	1235	1235	1235	1235	1235
CBPD	0	62	86	110	62
w/c	0.54	0.54	0.64	0.78	0.89
Άθροισμα	2102	2102	2102	2102	2102

3.2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΟΚΙΜΕΣ

3.2.1. ΝΩΠΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Οι δοκιμές που έγιναν στο νωπό σκυρόδεμα ήταν η δοκιμή της εργασιμότητας η οποία μελετήθηκε με τη μέθοδο δοκιμής κάθισης σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C143, καθώς και η μέτρηση του μοναδιαίου βάρους, σύμφωνα με το πρότυπο ASTM C 138.

3.2.2. ΣΚΛΗΡΥΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Οι δοκιμές που έγιναν στο σκληρυμένο σκυρόδεμα ήταν :

Δοκιμή αντοχής σε θλίψη σε κυβικά δοκίμια διαστάσεων 100x100x100 mm³. Η δοκιμή αυτή έγινε με επιπόνηση των δοκιμίων σε κεντρική θλίψη. Για κάθε σύνθεση μετρήθηκε η αντοχή δύο δοκιμίων σε μονοαξονική θλίψη στις 3, 7, 28 και 90 μέρες και υπολογίστηκε ο μέσος όρος των μετρήσεων.

Δοκιμή μονοαξονικήςεφελκυστικής αντοχής σε διάρρηξη (Braziliantest) έγινε σε κυλινδρικά δοκίμια διαστάσεων Φ100x200 mm. Η εφελκυστική αντοχή σε διάρρηξη μετρήθηκε σε δύο δοκίμια για κάθε σύνθεση στις 28 μέρες και υπολογίστηκε ο μέσος όρος τους ως η εφελκυστική αντοχή του δοκιμίου.

Η δοκιμή υδατοαπορροφητικότητας πραγματοποιήθηκε κατά ASTM C 1403-06 σε δοκίμια Φ100x100 mm. Κατά τη δοκιμή αυτή τα δοκίμια αφού ξηράθηκαν ήπια σε φούρνο στους 96⁰C μέχρι σταθερού βάρους, εμβαπτίστηκαν σε δοχείο με απιονισμένο νερό (Σχήμα 3.1). Ανά τακτά χρονικά διαστήματα (1, 2.5 min, κ.τ.λ.) τα δοκίμια εξέρχονται από το νερό και ζυγίζονται. Υπολογίστηκε ο ρυθμός απορρόφησης i (gr/mm²).

Με την ίδια πειραματική διαδικασία και κατά το ίδιο πρότυπο υπολογίστηκε στη συνέχεια και ο αρχικός ρυθμός απορρόφησης (InitialRateofabsorption).

$$X = 193.55 * W / E \quad (3.1)$$

όπου:

X, το (αυξημένο) βάρος (g) του δοκιμίου εξαιτίας της απορρόφησης νερού, διορθωμένο στη βάση της διατομής των 193.55 cm²,

W, το πραγματικό (αυξημένο) βάρος του δοκιμίου, (g),

E, το εμβαδόν του δοκιμίου (cm²)

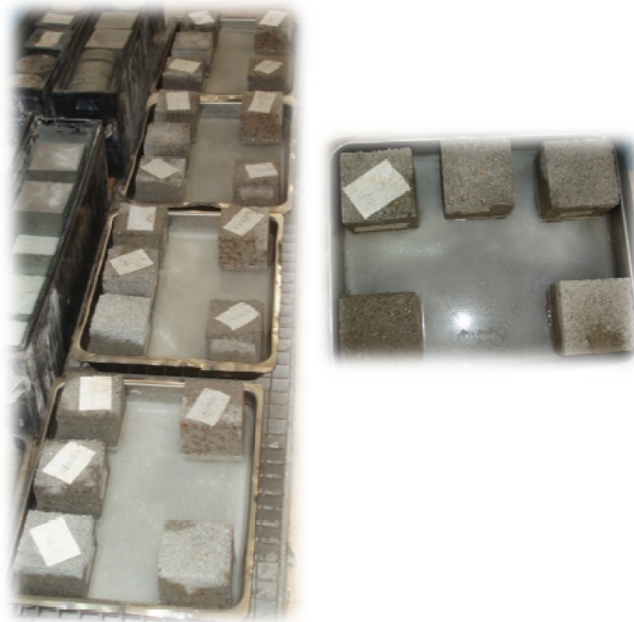
Αξιοποίηση του βιομηχανικού παραπροϊόντος (CBPD) στην παραγωγική διαδικασία δομικών στοιχείων – σύνθεση, μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα.



Σχήμα 3.1: Διάταξη δοκιμής υδατοαπορροφητικότητας

Η δοκιμή συστολής ξήρανσης έγινε κατά ASTM C 596-09 σε πρισματικά δοκίμια $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ με κατάλληλη πειραματική διάταξη.

Η δοκιμή εξάνθισης έγινε κατά ASTM C 67-08 σε δοκίμια $100 \times 100 \times 100 \text{ mm}^3$. Κατά τη δοκιμή αυτή πέντε δοκίμια από κάθε σύνθεση εμβαπτίζονται σε δοχείο με απιονισμένο νερό (Σχήμα 3.2), όπου και παραμένουν για 5 κύκλους εξάνθισης (7, 14, 21, 28 και 35 ημέρες). Αντίστοιχος αριθμός δοκιμίων για κάθε σύνθεση παραμένει εκτεθειμένος σε εργαστηριακές συνθήκες. Στο τέλος του 1^{ου} κύκλου (7 ημέρες) τα δοκίμια εξέρχονται από τα δοχεία και πραγματοποιείται οπτική παρατήρηση σε σύγκριση με τα δοκίμια που βρισκόταν σε συνθήκες εργαστηρίου. Στη συνέχεια όλα τα δοκίμια εκτεθειμένα και μη σε κύκλους εξάνθισης, ξηραίνονται για 24 ώρες στους 106°C και πραγματοποιείται εκ νέου οπτική παρατήρηση και διασύγριση. Η ίδια διαδικασία ακολουθείται στο τέλος κάθε επόμενου κύκλου.



Σχήμα 3.2: Δοκιμή εξάνθισης: δοχεία εμφάπτισης και διάταξη δοκιμίων.

3.3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

3.3.1. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΚΑΘΙΣΗΣ

Τα αποτελέσματα της δοκιμής κάθισης, για όλες τις συνθέσεις έδειξαν μηδενική κάθιση (Σχήμα 3.3), σύμφωνα με τις απαιτήσεις του προϊόντος (τσιμεντόλιθος).

Αξιοποίηση του βιομηχανικού παραπροϊόντος (CBPD) στην παραγωγική διαδικασία δομικών στοιχείων – σύνθεση, μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα.



Σχήμα 3.3: Δοκιμή κάθισης

3.3.2. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΤΡΗΣΗΣ ΤΟΥ ΜΟΝΑΔΙΑΙΟΥ ΒΑΡΟΥΣ

Στον Πίνακα 3.5 δίνονται τα αποτελέσματα της μέτρησης του μοναδιαίου βάρους των συνθέσεων του σκυροδέματος για κάθε σύνθεση. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα φαίνονται ότι όλες οι συνθέσεις έχουν μοναδιαίο βάρος κοντά στο επιθυμητό (2100 kg/m^3), συνεπώς και την επιθυμητή συμπίκνωση.

Πίνακας 3.5. Αποτελέσματα μοναδιαίου βάρους για κάθε σύνθεση

	A	B	C	D	E
Μον.Βάρος κυβικών δοκιμίων (Kg/m^3)	2063	2018	2041	2046	2087
Μον.Βάροςκυλινδρικών δοκιμίων (Kg/m^3)	2031	2021	2066	2038	2054

3.3.3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΘΛΙΨΗΣ ΚΑΙ ΕΦΕΛΚΥΣΜΟ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΩΝ 5 ΣΥΝΘΕΣΕΩΝ

Στον Πίνακα 3.6 δίνονται τα αποτελέσματα των αντοχών σε θλίψη (3, 7, 28 και 90 ημερών) και σε εφελκυσμό (28 ημερών) των δοκιμίων.

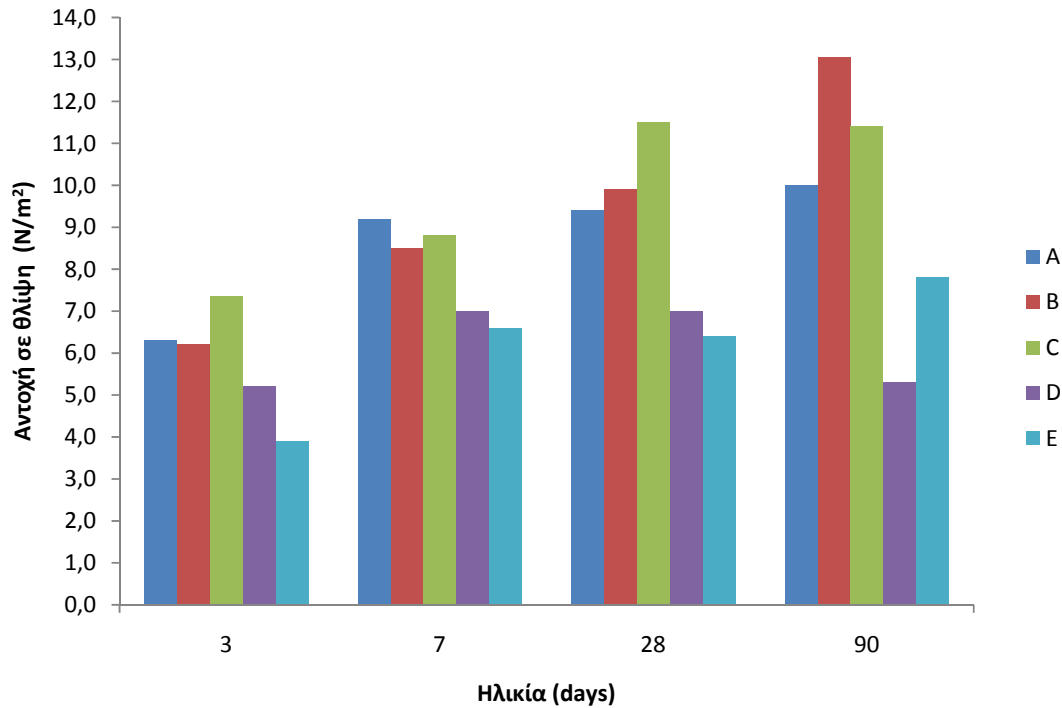
Πίνακας 3.6. Αποτελέσματα αντοχής σε θλίψη και σε εφελκυσμό

	A	B	C	D	E
F3 (Mpa)	6.3	9.2	7.3	5.2	3.9
F7 (Mpa)	9.2	8.5	8.5	7.0	6.6
F28 (Mpa)	9.4	9.9	11.5	7	6.4
F90 (Mpa)	10	13.0	11.4	5.3	7.8
S28 (Mpa) (Brazilian test)	1.3	1.5	1.4	0.8	0.9

Στο διάγραμμα του σχήματος 3.4 δίνεται η ανάπτυξη των αντοχών θλίψης για όλα τα δοκίμια, σε σχέση με την ηλικία ωρίμανσης. Όπως φαίνεται από το διάγραμμα, οι συνθέσεις Β και Σ παρουσιάζουν βελτιωμένες αντοχές θλίψης σε σχέση με το αμιγές (Α) για όλες τις ηλικίες. Αντιθέτως υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων παρατηρείται για τις συνθήκες D, E.

Πρέπει να σημειωθεί ότι ανάλογη συμπεριφορά εμφανίζουν τα δοκίμια αναφορικά με την αντοχή σε εφελκυσμό.

Αξιοποίηση του βιομηχανικού παραπροϊόντος (CBPD) στην παραγωγική διαδικασία δομικών στοιχείων – σύνθεση, μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα.



Σχήμα 3.4: Αντοχή σε θλίψη των δοκιμών σε συνάρτηση με την ηλικία.

3.3.4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗ ΥΔΑΤΟΑΠΟΡΡΟΦΗΤΙΚΟΤΗΤΑΣ

Στον Πίνακα 3.7 δίνονται τα αποτελέσματα της δοκιμής υδατοαπορροφητικότητας και του αρχικού ρυθμού απορρόφησης (initialrate).

Στο Σχήμα 3.5 απεικονίζονται τα αποτελέσματα της δοκιμής υδατοαπορροφητικότητας για τα πρώτα 120'. Παρατηρείται ότι η χρήση του προσθέτου οδηγεί σε σημαντική μείωση του συντελεστή υδατοαπορροφητικότητας για τις συνθέσεις B, C. Για τις συνθέσεις D, Ε παρατηρείται βελτίωση του συντελεστή υδατοαπορροφητικότητας στα επίπεδα του δείγματος αναφοράς (A).

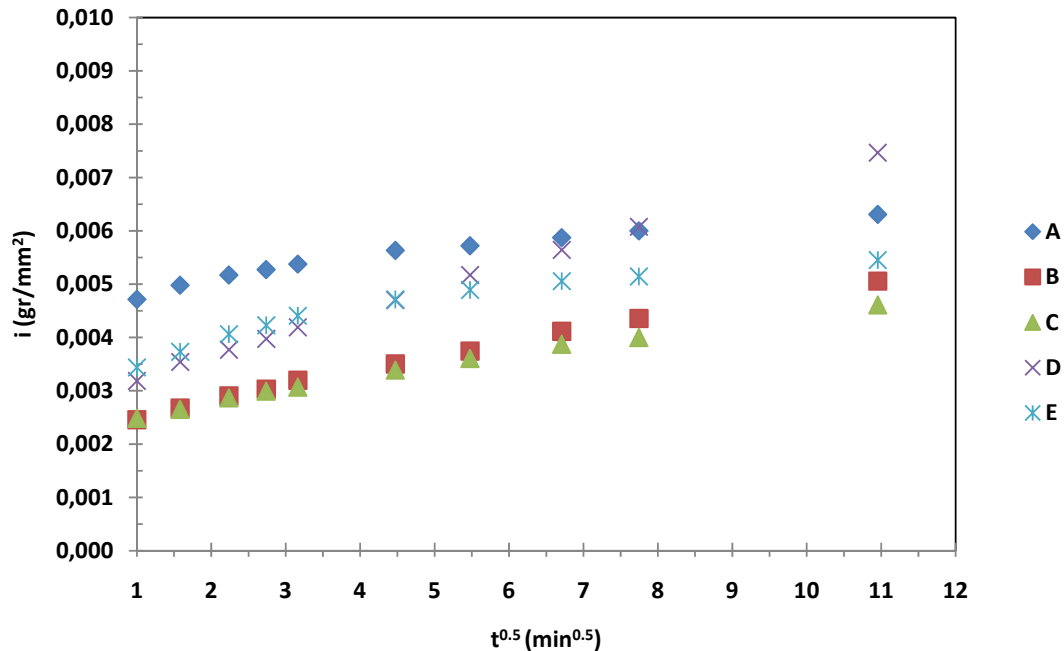
Αντίστοιχα οι τιμές του αρχικού ρυθμού απορρόφησης που μετρήθηκαν εμφανίστηκαν βελτιωμένες σε σχέση με το δείγμα αναφοράς σε ποσοστά από 18 έως 48 %. Τα αποτελέσματα αυτά βρίσκονται σε αντιστοιχία με τα αποτελέσματα της αντοχής σε θλίψης

3. Πειραματικό μέρος

Πίνακας 3.7. Αποτελέσματα δοκιμής υδατοαπορροφητικότητας(gr/mm^2)

t(min)	t^{0.5}(min^{0.5})	A	B	C	D	E
0						
1	1.00	0.0047	0.0025	0.0025	0.0032	0.0034
2.5	1.58	0.0050	0.0027	0.0026	0.0035	0.0037
5	2.24	0.0052	0.0029	0.0029	0.0038	0.0041
7.5	2.74	0.0053	0.0030	0.0030	0.0040	0.0042
10	3.16	0.0054	0.0032	0.0031	0.0042	0.0044
20	4.47	0.0056	0.0035	0.0034	0.0047	0.0047
30	5.48	0.0057	0.0036	0.0036	0.0052	0.0049
45	6.71	0.0059	0.0041	0.0039	0.0056	0.0051
60	7.75	0.0060	0.0044	0.0040	0.0061	0.0051
120	10.95	0.0063	0.0051	0.0046	0.0075	0.0055
420	20.49	0.0068	0.0066	0.0055	0.0098	0.0058
1440	37.95	0.0080	0.0086	0.0079	0.0116	0.0070
1500	38.73		0.0086	0.0089		
1680	40.99					0.0072
2820	53.10					0.0076
2880	53.67		0.00890			
Initial Rate (gr)		89.0	50.80	45.6	57.7	73.7

Αξιοποίηση του βιομηχανικού παραπροϊόντος (CBPD) στην παραγωγική διαδικασία δομικών στοιχείων – σύνθεση, μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα.



Σχήμα 3.5: Αποτελέσματα της δοκιμής υδατοαπορροφητικότητας για τα πρώτα 120'.

3.3.5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΜΕΤΑΒΟΛΗΣ ΟΓΚΟΥ

Στον Πίνακα 3.8, δίνονται τα αποτελέσματα της δοκιμής μεταβολής όγκου για δοκίμια όλων των συνθέσεων. Όπως φαίνεται και από τον πίνακα δεν παρατηρείται αξιόλογη μεταβολή στον όγκο των δοκιμίων σε σχέση με το ποσοστό συμμετοχής του CBPD. Μόνο για τη σύνθεση D (αντικατάσταση άμμου 10 % και τσιμέντου 30 %) καταγράφεται συρρίκνωση σχεδόν διπλάσια με αυτή του αμιγούς. Σε κάθε περίπτωση η συρρίκνωση που καταγράφεται είναι εντός των προδιαγραφών (<2,5%).

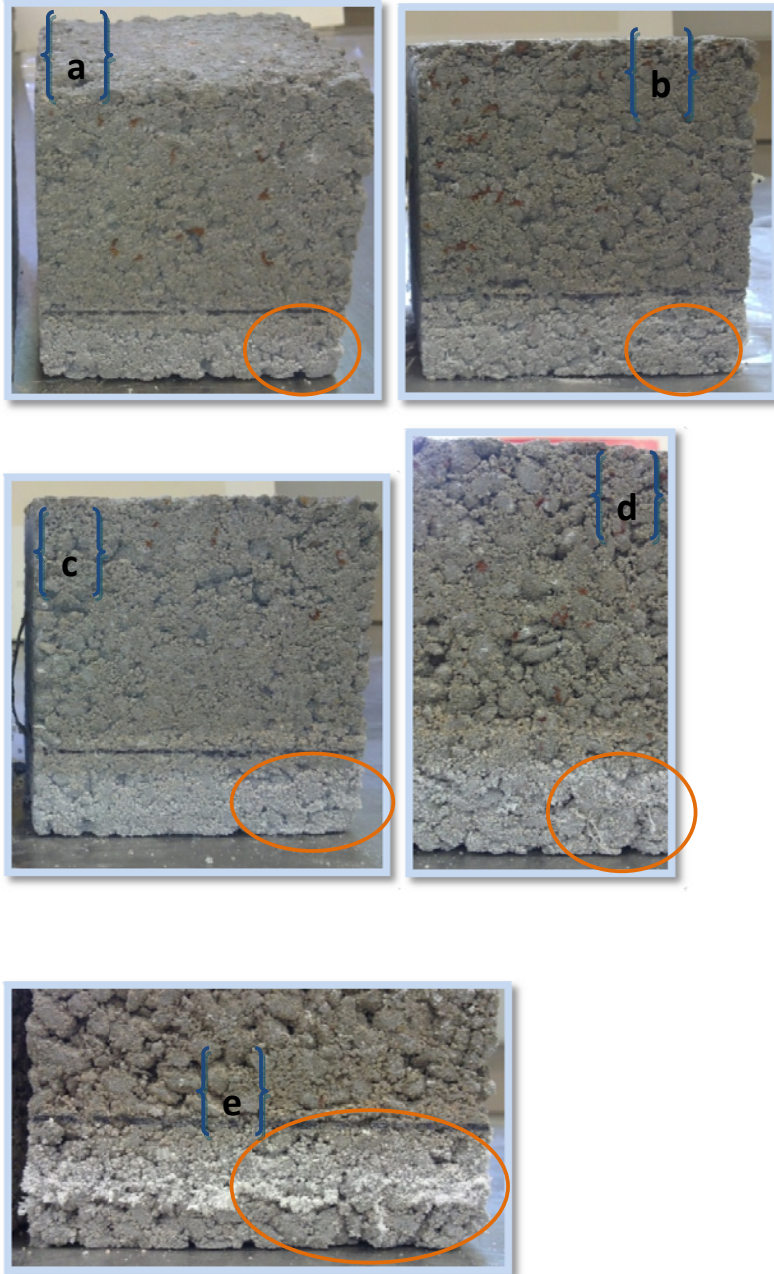
Πίνακας 3.8. Αποτελέσματα δοκιμής μεταβολής όγκου

		11ημέρες	25ημέρες	75 ημέρες	%dl/l ₁₁	%dl/l ₂₅	%dl/l ₇₅
A	1 ^η μέτρηση	-0,763	-0,772	-0,766	-0,48	-0,48	-0,48
	2 ^η μέτρηση	-0,931	-0,936	-0,930	-0,58	-0,59	-0,58
	3 ^η μέτρηση	-0,384	-0,391	-0,385	-0,24	-0,24	-0,24
		<i>Μέση τιμή</i>			-0,43	-0,44	-0,43
B	1 ^η μέτρηση	-0,757	-0,758	-0,712	-0,47	-0,47	-0,45
	2 ^η μέτρηση						
	3 ^η μέτρηση	-0,834	-0,867	-0,861	-0,52	-0,54	-0,54
		<i>Μέση τιμή</i>			-0,50	-0,51	-0,49
C	1 ^η μέτρηση	-1,241	-1,240	-1,232	-0,78	-0,78	-0,77
	2 ^η μέτρηση	-1,028	-1,027	-1,022	-0,64	-0,64	-0,64
	3 ^η μέτρηση	-0,372	-0,370	-0,364	-0,23	-0,23	-0,23
		<i>Μέση τιμή</i>			-0,55	-0,55	-0,55
D	1 ^η μέτρηση						
	2 ^η μέτρηση	-0,642	-0,639	-0,632	-0,40	-0,40	-0,40
	3 ^η μέτρηση	-1,897	-1,892	-1,883	-1,19	-1,18	-1,18
		<i>Μέση τιμή</i>			-0,79	-0,79	-0,79
E	1 ^η μέτρηση	-0,436	-0,434	-0,428	-0,27	-0,27	-0,27
	2 ^η μέτρηση	-1,311	-1,309	-1,303	-0,82	-0,82	-0,81
	3 ^η μέτρηση	-0,923	-0,921	-0,912	-0,58	-0,58	-0,57
		<i>Μέση τιμή</i>			-0,56	-0,56	-0,55

3.3.6. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΗΣ ΕΞΑΝΘΙΣΗ

Στα δοκίμια όλων των συνθέσεων παρατηρήθηκε αύξηση της έντασης του φαινομένου όσο αυξανόταν ο αριθμός των κύκλων έκθεσης. Ενδεικτικά στο Σχήμα 3.6 εμφανίζονται φωτογραφίες των δοκιμίων της σύνθεσης Β, μετά το πέρας κάθε κύκλου και για τους 5 κύκλους εξάνθισης. Καταγράφεται η αύξηση της πυκνοτητάς τους με την πάροδο του χρόνου σε διάφορα σημεία των δοκιμίων (επισημαίνονται με κύκλους).

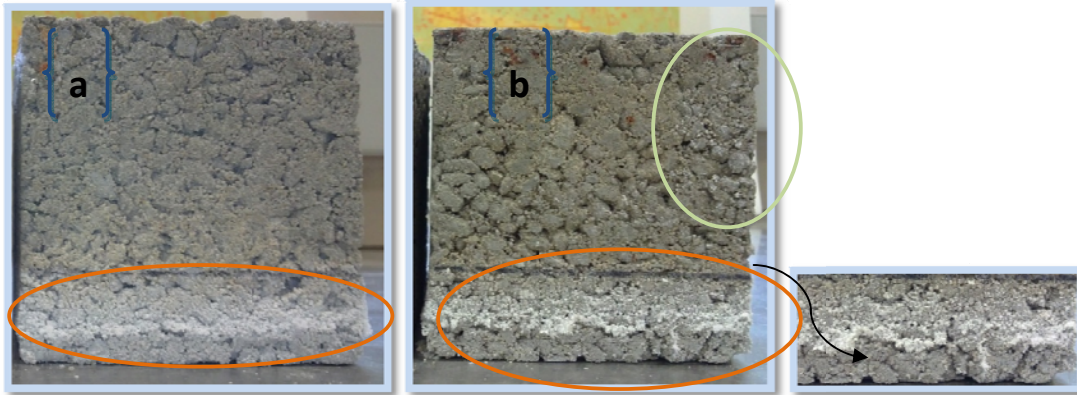
Αξιοποίηση του βιομηχανικού παραπροϊόντος (CBPD) στην παραγωγική διαδικασία δομικών στοιχείων – σύνθεση, μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα.



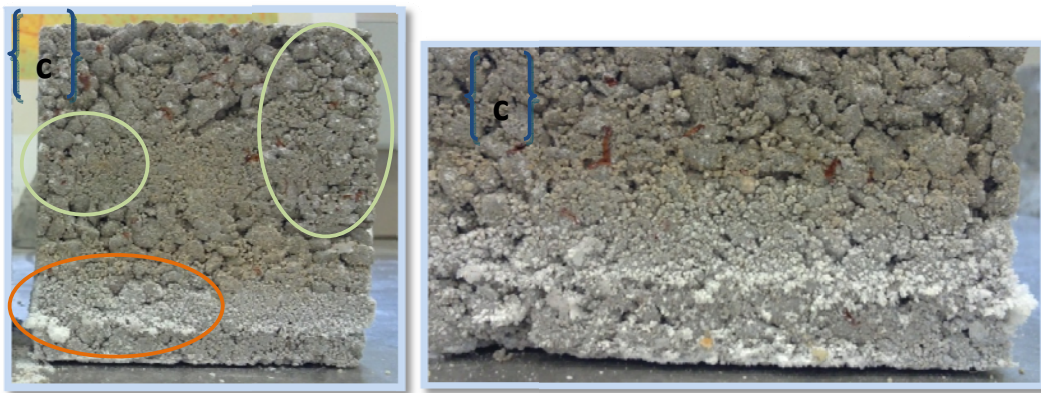
Σχήμα 3.6: Δοκίμια σύνθεσης Β: α) έκθεση σε ένα κύκλο εξάνθισης, β) έκθεση σε δύο κύκλους εξάνθισης, γ) έκθεση σε τρεις κύκλους εξάνθισης δ) έκθεση σε τέσσερις κύκλους εξάνθισης ε) έκθεση σε πέντε κύκλους εξάνθισης

Στα σχήματα 3.7 – 3.10 απεικονίζονται τα δοκίμια του τελευταίου κύκλου έκθεσης για όλες τις συνθέσεις.

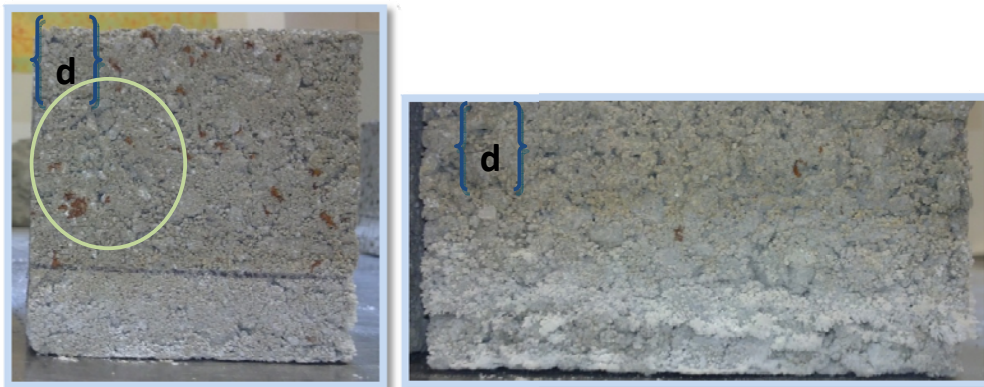
3. Πειραματικό μέρος



Σχήμα 3.7: a) Δοκίμιο σύνθεσης A πέμπτου κύκλου έκθεσης b) Δοκίμιο σύνθεσης B πέμπτου κύκλου έκθεσης

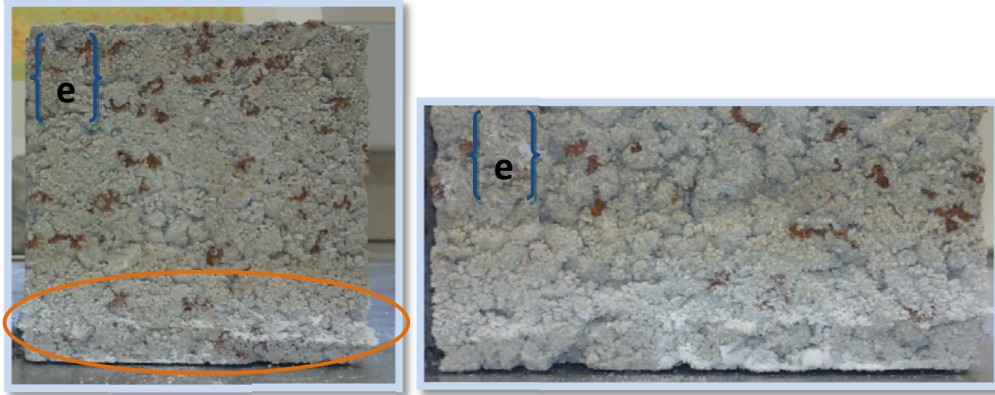


Σχήμα 3.8: c) Δοκίμια σύνθεσης C πέμπτου κύκλου έκθεσης



Σχήμα 3.9: d) Δοκίμια σύνθεσης D πέμπτου κύκλου έκθεσης

Αξιοποίηση του βιομηχανικού παραπροϊόντος (CBPD) στην παραγωγική διαδικασία δομικών στοιχείων – σύνθεση, μηχανικές ιδιότητες και ανθεκτικότητα.



Σχήμα 3.10:e) Δοκίμιο σύνθεσης E πέμπτου κύκλου έκθεσης

Παρατηρήθηκε ότι όλα τα δοκίμια στο τέλος του πέμπτου κύκλου παρουσίασαν έντονη εξάνθιση ιδιαίτερα στην επιφάνεια που ερχόταν σε επαφή με το νερό. Στα δοκίμια των συνθέσεων με τη χρήση προσθέτου παρατηρήθηκε εξάνθιση σε όλη την επιφάνεια του δοκιμίου.

3.4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

- Η χρήση του προσθέτου CBPD για μικρά ποσοστά (μέχρι 10 %) προς αντικατάσταση άμμου ή τσιμέντου, οδηγεί σε αύξηση της μηχανικής αντοχής.
- Η χρήση του προσθέτου CBPD για μικρά ποσοστά (μέχρι 10 %) προς αντικατάσταση άμμου ή τσιμέντου, βελτιώνει την υδατοαπορροφητικότητα των δοκιμίων.
- Δεν καταγράφονται σημαντικές διαφοροποιήσεις σε σχέση με τη μεταβολή του όγκου.
- Ο βαθμός έντασης του φαινομένου της εξάνθισης αυξάνεται με την πάροδο του χρόνου έκθεσης. Το φαινόμενο καταγράφεται σε μεγαλύτερη ένταση, όσο αυξάνεται το ποσοστό συμμετοχής του προσθέτου CBPD στη σύνθεση.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Μ. Κωτσοβός, Οπλισμένο σκυρόδεμα, Εκδόσεις Συμεών, Αθήνα, 2010.
2. Σταμ. Τσίμας - Σωτ. Τσιβιλής, Επιστήμη και Τεχνολογία Τσιμέντου, Παν. Εκδόσεις ΕΜΠ, Αθήνα, 2010, 15-49, 267-302.
3. Κοσμάς Κ. Σίδερης, Ανθεκτικότητα Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος, ΣΕΛΚΑ-4Μ ΕΠΕ, Ξάνθη, 2010, 13-28,49-81, 123-183,199-201
4. J. Francis Young, Sidney Mindess, Robert J. Gray, Arnon Bentur, The science and Technology of Civil Engineering Materials, Prentice-Hall, Inc, New Jersey, 1998, 237-242,252-254.
5. A.M.Neville, Properties of concrete, Longman, 4th Ed., London, 1996, 488-496.
6. M. Heikal, I. Aiad, I. M. Helmy, Portland cement clinker, granulated slag and by-pass cement dust composites, Cement and concrete research, 32, 2002, 1805-1812.
7. ΕΛΟΤ EN 771-3:2003 Προδιαγραφές στοιχείων τοιχοποιίας - Μέρος 3: Στοιχεία τοιχοποιίας από σκυρόδεμα (με συνήθη και ελαφρά αδρανή)
8. ΕΛΟΤ EN 772-1:2000 Μέθοδοι δοκιμής στοιχείων τοιχοποιίας – Μέρος 1: Προσδιορισμός της αντοχής σε θλίψη.
9. ASTM C1403 - 06 Standard Test Method for Rate of Water Absorption of Masonry Mortars,Annual Book of ASTM Standards,04.05, June, 293, 1548, 2011.
10. ASTM C67-09 Standard Test Methods for Sampling and Testing Brick and Structural Clay Tile, Annual Book of ASTM Standards,Chemical-Resistant Nonmetallic Materials; Vitrified Clay Pipe; Concrete Pipe; Fiber-Reinforced Cement Products; Mortars and Grouts; Masonry; Precast Concrete, Section 4, 04.05, July, 0192-2998, 2007.
11. ASTM C138 / C138M - 10b Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete,, Annual Book of ASTM Standards,04.02,Concrete and Aggregates, October,181, 1014, 2011.

12. ASTM C143 / C143M - 10a Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, Annual Book of ASTM Standards, 04.02 Concrete and Aggregates, October, 181, 1014, 2011.
13. ASTM C596 - 09 Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement, Annual Book of ASTM Standards, 04.01, Cement; Lime; Gypsum, September, 133, 760, 2011.