

**Παραγωγή τσιμέντου σταθερής ποιότητας
χρησιμοποιώντας υπαίθριο clinker – Κατασκευή νέου
σιλό clinker στην Τσιμεντοποιία Βασιλικού**
Production of constant cement quality using environmentally
exposed clinker – New clinker silo construction at Vassiliko
Cement Works

Κίμωνας ΕΥΑΓΟΡΟΥ¹, Μαριάννα ΚΟΥΡΟΥΖΙΔΟΥ¹

Λέξεις κλειδιά: Υπαίθριο clinker, τσιμέντο, αντοχές θλίψης
Keywords: Outdoor clinker, cement, compressive strengths

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Σημαντική πρόκληση για τη βιομηχανία τσιμέντου αποτελεί η αποδοτική διαχείριση clinker που δεν έχει αποθηκευτεί σε σιλό υπό τις ιδανικές συνθήκες, αλλά βρίσκεται εκτεθειμένο σε υπαίθριο χώρο. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, το clinker αλληλεπιδρά με το περιβάλλον και ιδιαίτερα με το νερό της βροχής, με συνέπεια τη μερική ενυδάτωση και συσσωμάτωσή του και ως εκ τούτου τη μείωση της δραστηριότητάς του. Η απόρριψη αυτού του μερικώς ενυδατωμένου clinker δεν αποτελεί περιβαλλοντικά και οικονομικά βιώσιμη επιλογή. Εναλλακτική επιλογή, αποτελεί η ανάμειξή του με clinker που βρισκόταν κατάλληλα αποθηκευμένο και στη συνέχεια η άλεση του μίγματος αυτού, για παραγωγή τσιμέντου σύμφωνα με τις ισχύουσες προδιαγραφές. Στην ερευνητική αυτή εργασία εξετάστηκε ο αποτελεσματικότερος τρόπος διαχείρισης του υπαίθριου clinker σε ότι αφορά την ανάμειξη και άλεσή του, ώστε να διασφαλιστεί η ποιότητα του τελικού προϊόντος. Λαμβάνοντας υπόψη τη διαφοροποίηση της σύνθεσης του τσιμέντου λόγω της συμμετοχής του υπαίθριου clinker, διατηρώντας τους ίδιους στόχους ποιότητας για την απώλεια πύρωσης (Loss On Ignition, LOI) και το τριοξειδίο του θείου (SO₃), με αυτούς που ισχύουν για τσιμέντο ίδιου τύπου που προκύπτει όμως από άλεση μόνο από clinker που βρισκόταν υπό κατάλληλες συνθήκες αποθήκευσης, προέκυψε ότι για κάθε 1.0 % μείωση στην αναλογία του ασβεστολίθου (λόγω της αύξησης της LOI από τη συμμετοχή του υπαίθριου clinker), απαιτείται περαιτέρω μείωση της αναλογίας του ασβεστολίθου κατά 1.0 %, ώστε να αντισταθμιστεί η μείωση των αντοχών θλίψης των δοκιμίων ηλικίας 28 ημερών – δηλαδή απαιτείται συνολική μείωση της τροφοδοσίας του ασβεστολίθου κατά 2.0 % και αντίστοιχη αύξηση στην αναλογία τροφοδοσίας του ανάμεικτου clinker. Με τον τρόπο αυτό, μπορεί να διασφαλιστεί έγκαιρα η σταθερή ποιότητα του τσιμέντου που παράγεται χρησιμοποιώντας υπαίθριο clinker σε καθορισμένη χαμηλή αναλογία που εξαρτάται από την ποιότητά του, λαμβάνοντας παράλληλα μέτρα για ελεγχόμενη τροφοδοσία του μέσω κατάλληλης ζυγοταινίας. Μέσα από τα αποτελέσματα της συγκεκριμένης εργασίας υποστηρίχθηκε η απόφαση για την κατασκευή νέου σιλό στην Τσιμεντοποιία Βασιλικού.

¹ Διευθυντής Διασφάλισης Ποιότητας και Έρευνας&Ανάπτυξης, Τσιμεντοποιία Βασιλικού Λτδ, Κύπρος, email: k.evagorou@vassiliko.com

² Αναπληρώτρια Διευθύντρια Διασφάλισης Ποιότητας και Έρευνας&Ανάπτυξης, Τσιμεντοποιία Βασιλικού Λτδ, Κύπρος, email: m.kourouzidou@vassiliko.com

ABSTRACT: A significant challenge to the cement industry is dealing with cement clinker that has not been properly stored in a silo (outdoor clinker), but stored under conditions where it interacts with the environment and particularly rain water. This can cause partial hydration and agglomeration of the cement clinker particles, leading to reduced reactivity. Disposing of partially hydrated cement clinker is not an environmentally and economically viable option. Alternatively, it can be blended with properly stored clinker and then grounded to form cement according to specific quality targets. This research has examined how this blending and grinding can best be performed to ensure the performance of the final product. The results show that, considering the differentiation of the composition of cement due to the participation of the outdoor clinker, in order to achieve the same quality targets as when the same cement type is produced by using only ideally stored clinker and to compensate the expected 28 days' compressive strength reduction, it is necessary to double the initial reduction of limestone percentage after the feeding of outdoor clinker, in order to preserve the initial LOI value. In this way, the stable quality of the cement produced using outdoor clinker can be ensured in a timely manner. Also, the results of this work have justified the need for the construction of a new silo in Vassiliko Cement Works.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Δεν είναι ασυνήθιστο για τα εργοστάσια παραγωγής τσιμέντου να έχουν αποθέματα clinker μεγαλύτερα από τη χωρητικότητα των σιλό clinker ή άλλων αποθηκευτικών χώρων. Αυτό μπορεί να συμβεί για διάφορους λόγους. Για παράδειγμα, ενδέχεται να υπήρξαν πωλήσεις χαμηλότερες από τις αναμενόμενες ή μπορεί να έχει ληφθεί απόφαση για αύξηση του διαθέσιμου αποθέματος clinker πριν από την επικείμενη διακοπή λειτουργίας του κλιβάνου του εργοστασίου για συντήρηση. Στις περιπτώσεις αυτές, οποιαδήποτε επιπλέον ποσότητα clinker είναι πιθανό να αποθηκευτεί σε υπαίθριο χώρο. Το γεγονός αυτό, μπορεί να επηρεάσει την ποιότητα του clinker λόγω της επίδρασης του νερού της βροχής στο clinker, που προκαλεί αντιδράσεις ενυδάτωσης, με αποτέλεσμα το σχηματισμό συσσωματωμάτων σκληρού clinker, όπως φαίνεται στο Σχήμα 1. Η απώλεια μάζας του clinker που προσδιορίζεται από την πύρωση δειγμάτων στους 950 °C (απώλεια πύρωσης (Loss On Ignition, LOI)), χρησιμοποιείται στη βιομηχανία ως ένδειξη της έκτασης της ενυδάτωσης του clinker, παράμετρος η οποία μπορεί να συσχετιστεί με τη μείωση των αντοχών θλίψης όταν το συγκεκριμένο clinker χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή τσιμέντου.

Η πρακτική που εφαρμόζεται συνήθως στη τσιμεντοβιομηχανία για την αξιοποίηση υπαίθριου και μερικώς ενυδατωμένου clinker, είναι η ανάμειξη και άλεσή του σε κατάλληλες αναλογίες, με clinker που βρίσκεται αποθηκευμένο σε σιλό, ώστε να διασφαλιστεί η ποιότητα του παραγόμενου τσιμέντου. Για την αποφυγή ποιοτικών προβλημάτων τα οποία μπορούν να οδηγήσουν σε παραγωγή τσιμέντου με μειωμένη αντοχή σε θλίψη, είναι απαραίτητη η αύξηση του συνολικού ποσοστού clinker που συμμετέχει στο τελικό προϊόν. Το αποτέλεσμα αυτής της ενέργειας, είναι συνήθως η εμφάνιση υψηλότερων τιμών αντοχών θλίψης από τις

προβλεπόμενες σύμφωνα με τους στόχους ποιότητας, που οφείλονται κυρίως σε υπερβολικά προληπτικά μέτρα – σε χρησιμοποίηση δηλαδή υψηλότερου ποσοστού clinker από ότι είναι αναγκαίο. Σκοπός αυτής της έρευνας αποτελεί η ανάπτυξη ενός τρόπου τροφοδοσίας του μερικώς ενυδατωμένου clinker σε ένα καθορισμένο ποσοστό και ταυτόχρονα η βέλτιστη αύξηση του συνολικού ποσοστού clinker ώστε να επιτευχθούν οι στόχοι ποιότητας για το τσιμέντο και να αποφευχθεί η παραγωγή τσιμέντου με αντοχή σε θλίψη μειωμένη ή σημαντικά υψηλότερη από το στόχο ποιότητας.



Σχήμα 1. Σωρός υπαίθριου clinker με σχηματισμό συσσωματωμάτων σκληρού clinker.

ΥΛΙΚΑ ΚΑΙ ΜΕΘΟΔΟΙ

Τα δείγματα clinker λήφθηκαν από το εργοστάσιο παραγωγής τσιμέντου «Τσιμεντοποιία Βασιλικού Λτδ», στην Κύπρο. Εξετάστηκαν τρεις διαφορετικές ποιότητες clinker: Α. Clinker αποθηκευμένο στο σιλό υπό κανονικές συνθήκες με LOI = 0.80 %, Β. Υπαίθριο clinker με LOI = 2.80 % και Γ. Υπαίθριο clinker με LOI = 3.83 %. Το clinker Β προέκυψε από κοσκίνισμα ψηλών σωρών απόθεσης υπαίθριου clinker ενώ το Γ από κοσκίνισμα χαμηλών σωρών απόθεσης υπαίθριου clinker.

Πραγματοποιήθηκαν τρεις αλέσεις τσιμέντου, που κάθε μία αντιστοιχούσε στο κάθε είδος clinker μαζί με γύψο σταθερής ποιότητας (σε αναλογία 7.0 %) για την παραγωγή τσιμέντου CEM I 42,5 R. Χρησιμοποιήθηκε ο κάθετος μύλος LM 35.2 + 2 της εταιρείας Loeshe, με παραγωγικότητα περίπου 70 tons/h.

Κατά τη διάρκεια της δοκιμής, λήφθηκαν δείγματα clinker και τσιμέντου στα οποία πραγματοποιήθηκαν διάφορες ανάλυσεις και ελέγχοι:

- Προσδιορισμός LOI στους 950 °C.
- Μετρήσεις XRF χρησιμοποιώντας τον αναλυτή ολικής ανάλυσης τσιμέντου (Αναλυτής φθορισμού και περίθλασης ακτίνων X, Μοντέλο: ARL 9800) της εταιρείας Thermo Fischer Scientific.

- Προσδιορισμοί κανονικής συνεκτικότητας και χρόνου πήξης, σύμφωνα με τη διαδικασία που περιγράφεται στο Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 196-3. Η συσκευή κανονικής συνεκτικότητας και η συσκευή Vicat που χρησιμοποιήθηκαν ήταν της εταιρείας ELE International.
- Προσδιορισμός κοκκομετρίας χρησιμοποιώντας τον Αυτόματο Αναλυτή Μεγέθους Σωματιδίων (Automatic Particle Size Analyzer, APSA) της εταιρείας Sympatec (MYTOS – Module System no. MT039).
- Κατασκευή δοκιμίων αμμοκονιάματος για τον προσδιορισμό της αντοχής θλίψης στις ηλικίες των 1, 2, 3, 7, 14, 21, 28 και 56 ημερών, σύμφωνα με τις διαδικασίες και τις συνθήκες συντήρησης που περιγράφονται στο πρότυπο EN 196 – 1. Το πιεστήριο αντοχών θλίψης ήταν της εταιρείας Toni Technik/ToniNORM (Model: 2010.010).
- Επιπρόσθετα, κατασκευάστηκαν κύβοι σκυροδέματος, 150 x 150 x 150 mm, κατηγορίας C20/25 για τον προσδιορισμό της αντοχής θλίψης στις ηλικίες των 2, 7, 28 και 56 ημερών, σύμφωνα με τις διαδικασίες που περιγράφονται στο πρότυπο EN 12390. Το πιεστήριο αντοχών θλίψης σε αυτή την περίπτωση ήταν της εταιρείας Impact.

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

Όπως προαναφέρθηκε, σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η εύρεση του αποτελεσματικότερου τρόπου διαχείρισης υπαίθριου clinker σε ότι αφορά την ανάμειξη και άλεσή του, ώστε να διασφαλιστεί η ποιότητα του τελικού προϊόντος. Για το σκοπό αυτό, εξετάστηκαν τρεις ποιότητες clinker: Α. Clinker αποθηκευμένο στο σιλό υπό κανονικές συνθήκες με LOI = 0.80 %, Β. Υπαίθριο clinker με LOI = 2.80 % και Γ. Υπαίθριο clinker με LOI = 3.83 %, τα οποία αλέστηκαν με γύψο για παραγωγή τσιμέντου CEM I 42,5 R, σύμφωνα με τις προδιαγραφές του προτύπου EN 197-1. Η διάθεση του τσιμέντου στην αγορά έγινε αφού προηγήθηκε έλεγχος της ποιότητάς του και επιβεβαίωση ότι δεν υπήρχε αρνητική απόκλιση από τη συνήθη ποιότητα.

Στον Πίνακα 1 φαίνονται οι μέσοι όροι της χημικής ανάλυσης των συγκεκριμένων clinker, που προέκυψαν από την ανάλυση δειγμάτων που λαμβάνονταν κατά την άλεση του τσιμέντου. Στον Πίνακα 2 δίνεται η ειδική επιφάνεια και η χημική ανάλυση του τσιμέντου κατά την τροφοδοσία του κάθε είδους clinker Α, Β και Γ. Η ειδική επιφάνεια όπως είναι αναμενόμενο, αυξάνεται με τη συμμετοχή του υπαίθριου clinker. Σε ότι αφορά τη χημική ανάλυση, εκτός από τις διαφορές που παρατηρούνται στην απώλεια πύρωσης και οι οποίες οφείλονται στη διαφορετική ποιότητα του clinker, δεν υπάρχουν άλλες αξιοσημείωτες διαφορές οι οποίες να αποτρέπουν την εξαγωγή συμπερασμάτων όσον αφορά τη συσχέτιση της απώλειας πύρωσης με τη μείωση των αντοχών του τσιμέντου. Οι διαφορές που παρουσιάζονται στο LSF, στα αλκάλια και στα χλωριόντα, θεωρούνται αμελητέες.

Πίνακας 1. Ποιότητα clinker – Χημική ανάλυση των τριών ποιοτήτων clinker που χρησιμοποιήθηκαν για την άλεση τσιμέντου Portland CEM I 42,5 R

Χημική Ανάλυση, %	Clinker A	Clinker B	Clinker Γ
Free Lime	1.22	1.14	1.07
Loss On Ignition	0.80	2.80	3.83
SiO₂	20.98	20.39	20.22
Al₂O₃	4.56	4.53	4.35
TiO₂	0.23	0.22	0.22
Fe₂O₃	2.85	3.00	2.96
CaO	65.70	63.96	63.59
MgO	1.80	1.83	1.71
SO₃	1.15	1.29	1.22
P₂O₅	0.17	0.18	0.16
Na₂O	0.45	0.43	0.39
K₂O	0.60	0.64	0.63
Alkalies (Na₂O + 0.658* K₂O)	0.84	0.85	0.80
Cr₂O₃	0.015	0.014	0.015
Mn₂O₃	0.18	0.20	0.20
SrO	0.15	0.18	0.18
ZnO	0.023	0.024	0.024
F⁻	0.08	0.08	0.07
Chlorides	0.046	0.032	0.031
Lime Saturation Factor (LSF)	99.61	99.34	99.86
Silica Modulus (SM)	2.83	2.71	2.76
Alumina Modulus (AM)	1.60	1.51	1.47

Πίνακας 2. Ποιότητα τσιμέντου – Χημική ανάλυση και ειδική επιφάνεια των δειγμάτων τσιμέντου που λήφθηκαν κατά την τροφοδοσία των ποιοτικά διαφορετικών clinker A, B και Γ.

	Τσιμέντο A	Τσιμέντο B	Τσιμέντο Γ
Χημική Ανάλυση, %			
Loss On Ignition	2.47	3.89	5.71
SiO₂	19.70	19.39	18.90
Al₂O₃	4.29	4.35	4.12
TiO₂	0.21	0.21	0.20
Fe₂O₃	2.73	2.83	2.69
CaO	62.52	61.22	60.59
MgO	1.71	1.76	1.59
SO₃	3.57	3.49	3.56
P₂O₅	0.17	0.17	0.14
Alkalies (Na₂O + 0.658* K₂O)	0.82	0.84	0.76
Cr₂O₃	0.014	0.013	0.013
Mn₂O₃	0.18	0.19	0.18
SrO	0.16	0.17	0.16
ZnO	0.018	0.024	0.024
F⁻	0.08	0.08	0.08
Chlorides	0.041	0.021	0.026
Ειδική Επιφάνεια, cm²/g	3827	3951	4209

Ο προσδιορισμός των φυσικών και μηχανικών ιδιοτήτων σε δοκίμια αμμοκονιάματος και σκυροδέματος που κατασκευάστηκαν από τα δείγματα των συγκεκριμένων τσιμέντων, έδωσαν τα αποτελέσματα που αναγράφονται στους Πίνακες 3 και 4, αντίστοιχα.

Πίνακας 3. Ποιότητα τσιμέντου – Αμμοκονίαμα - Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των δειγμάτων τσιμέντου που λήφθησαν κατά την άλεση των ποιοτικά διαφορετικών clinker Α, Β και Γ.

	Τσιμέντο Α	Τσιμέντο Β	Τσιμέντο Γ
ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ			
Κανονική συνεκτικότητα, % H ₂ O	28.00	28.50	29.25
Αρχικός χρόνος πήξης – Vicat, min	150	155	163
Τελικός χρόνος πήξης – Vicat, min	225	233	238
Σταθερότητα όγκου, mm	0.2	0.2	0.5
Ροή (ASTM C-185), cm	71	64	64
ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ			
Αντοχή θλίψης – 1 ημέρα, MPa	23.33	18.40	16.20
Αντοχή θλίψης – 2 ημέρες, MPa	35.77	28.36	25.77
Αντοχή θλίψης – 3 ημέρες, MPa	40.12	34.74	30.05
Αντοχή θλίψης – 7 ημέρες, MPa	48.78	42.77	39.05
Αντοχή θλίψης – 14 ημέρες, MPa	52.97	47.55	43.69
Αντοχή θλίψης – 21 ημέρα, MPa	55.03	49.17	44.09
Αντοχή θλίψης – 28 ημέρες, MPa	56.81	50.64	45.69
Αντοχή θλίψης – 56 ημέρες, MPa	60.72	54.34	48.75

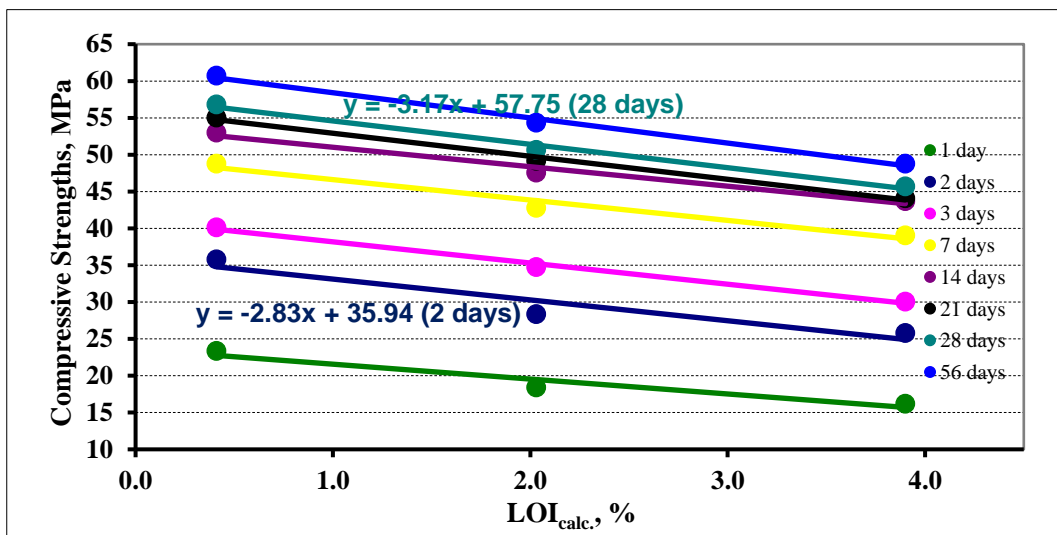
Πίνακας 4. Ποιότητα τσιμέντου – Σκυρόδεμα - Φυσικές και μηχανικές ιδιότητες των δειγμάτων τσιμέντου που λήφθησαν κατά την άλεση των ποιοτικά διαφορετικών clinker Α, Β και Γ.

	Τσιμέντο Α	Τσιμέντο Β	Τσιμέντο Γ
ΦΥΣΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ			
Νερό/Τσιμέντο	0.69	0.69	0.69
Κάθιση, mm	85	90	90
ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ			
Αντοχή θλίψης – 2 ημέρες, MPa	18.40	15.35	13.05
Αντοχή θλίψης – 7 ημέρες, MPa	27.10	23.60	21.45
Αντοχή θλίψης – 28 ημέρες, MPa	34.42	29.85	28.32
Αντοχή θλίψης – 56 ημέρες, MPa	35.80	33.55	29.50

Όπως ήταν αναμενόμενο, οι παρατηρούμενες αντοχές θλίψης, ελαττώνονται με την αύξηση της απώλειας πύρωσης του χρησιμοποιούμενου clinker και συνεπώς με την αύξηση της απώλειας πύρωσης του τσιμέντου, το οποίο αλέστηκε χρησιμοποιώντας μόνο clinker και γύψο. Ο ψηλός λόγος νερού/τσιμέντου που εμφανίζεται στον Πίνακα 4, οφείλεται στα χαρακτηριστικά των συγκεκριμένων διαβασικών κυπριακών αδρανών που χρησιμοποιήθηκαν. Η διαφορά αυτή στο λόγο νερού/τσιμέντου σε σκυρόδεμα αποτελούμενο από κυπριακά αδρανή σε σχέση με σκυρόδεμα αποτελούμενο από ασβεστολιθικά αδρανή προερχόμενα από

την Ελλάδα, τεκμηριώθηκε στο εργαστήριο της Τσιμεντοποιίας Βασιλικού, μετά από διενέργεια δοκιμών που αφορούσαν τη σύγκριση των δύο τύπων αδρανών.

Λαμβάνοντας υπόψη τη σύσταση του τσιμέντου και τη χημική ανάλυση του κάθε clinker και του γύψου που συμμετείχε στην κάθε άλεση, μπορεί να υπολογιστεί θεωρητικά το LOI του χρησιμοποιούμενου clinker ($LOI_{calc.}$), το οποίο βρέθηκε να είναι για το clinker A ίσο με 0.41%, για το clinker B ίσο με 2.03 % και για το clinker Γ ίσο με 3.90 %. Στο σχήμα 2, δίνεται η μεταβολή των αντοχών θλίψης του αμμοκονιάματος σε σχέση με το $LOI_{calc.}$. Η επιλογή να χρησιμοποιηθεί η υπολογιζόμενη απώλεια πύρωσης του clinker έγινε επειδή η δειγματοληψία του τσιμέντου είναι πολύ πιο αντιπροσωπευτική από τη δειγματοληψία του clinker. Παρόμοιες γραφικές παραστάσεις ισχύουν και για τις αντοχές θλίψης του σκυροδέματος. Τα χαρακτηριστικά των καμπυλών συσχέτισης που αφορούν τις αντοχές θλίψης αμμοκονιάματος και σκυροδέματος ως προς την υπολογιζόμενη απώλεια πύρωση του clinker, συνοψίζονται στον Πίνακα 5. Η κλίση των καμπυλών δίνει την μείωση των αντοχών αμμοκονιάματος και σκυροδέματος για κάθε μονάδα αύξησης της υπολογιζόμενης απώλειας πύρωσης του clinker, λόγω αύξησης της απώλειας πύρωσης του clinker που χρησιμοποιήθηκε για την άλεσή του.



Σχήμα 2. Επίδραση της ποιότητας του clinker στις αντοχές θλίψης.

Πίνακας 5. Χαρακτηριστικά καμπυλών συσχέτισης των αντοχών θλίψης αμμοκονιάματος και σκυροδέματος με την υπολογιζόμενη απώλεια πύρωσης του clinker.

	Ηλικία αμμοκονιάματος, ημέρες								Ηλικία σκυροδέματος, ημέρες			
	1	2	3	7	14	21	28	56	2	7	28	56
*Κλίση, α	-2.02	-2.83	-2.88	-2.77	-2.64	-3.12	-3.17	-3.42	-1.53	-1.61	-1.72	-1.81
**R, MPa	-0.81	-1.13	-1.15	-1.11	-1.06	-1.25	-1.27	-1.37	-0.61	-0.64	-0.69	-0.72
Τομή, β	23.58	35.94	41.05	49.38	53.65	56.03	57.75	61.83	18.82	27.45	34.51	36.78
Συντ., r²	0.9347	0.9056	0.9934	0.9693	0.9810	0.9931	0.9891	0.9937	0.9852	0.9685	0.9002	0.9852
Γραμμ., r	0.9668	0.9516	0.9967	0.9845	0.9905	0.9965	0.9945	0.9968	0.9926	0.9841	0.9488	0.9926

*Μείωση αντοχών για κάθε μονάδα αύξησης της απώλειας πύρωσης.

**Μείωση αντοχών για κάθε 1.00 % μείωση της αναλογίας του ασβεστολίθου κατά την άλεση, για διατήρηση της αρχικής απώλειας πύρωσης του τσιμέντου.

Η άλεση του τσιμέντου έγινε χρησιμοποιώντας τις διαφορετικές ποιότητες clinker, όπως αυτές έχουν ήδη περιγραφεί (Πίνακας 1) και γύψο σε αναλογία 7.0 %. Δεν χρησιμοποιήθηκε κατά την άλεση του τσιμέντου ασβεστόλιθος. Παρόλα αυτά θεωρήθηκε ότι τα συμπεράσματα μπορούν να αξιοποιηθούν σε τσιμέντα με περιεκτικότητα σε ασβεστόλιθο μέχρι 5.0 %. Σκοπός της εργασίας αυτής όπως έχει ήδη αναφερθεί είναι ο αποτελεσματικός τρόπος διαχείρισης του υπαίθριου clinker, ώστε να διασφαλιστεί η ποιότητα του τελικού προϊόντος και να μην υπάρχει σημαντική διαφοροποίηση από τη συνήθη ποιότητα του τσιμέντου. Για να μπορέσει αυτό να γίνει κατορθωτό, πρέπει οι απαιτούμενες διορθωτικές ενέργειες να γίνονται ταυτόχρονα με την άλεση του τσιμέντου. Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη την τυπική απώλεια πύρωσης του ασβεστολίθου, $LOI_{\text{limestone}}$, η οποία είναι 42.30 % και την απώλεια πύρωσης του clinker, η οποία κυμαίνεται μεταξύ 0.40 και 4.00 %, προκύπτει από τους ακόλουθους υπολογισμούς:

$$LOI_{\text{limestone}} = 42.30 \% , LOI_{\text{silos clinker}} = 0.40 \% , LOI_{\text{outdoor clinker}} = 4.00 \%$$

$$\rightarrow \Delta LOI_{\text{min}} = 38.30 \% \ \& \ \Delta LOI_{\text{max}} = 41.90 \%$$

→ Λόγος της μείωσης του ποσοστού του ασβεστολίθου ως προς την αύξηση του ποσοστού του clinker, F:

$$F_{\text{min}} = (1/\Delta LOI_{\text{max}}) \times 100 = 2.39 \ \& \ F_{\text{max}} = (1/\Delta LOI_{\text{min}}) \times 100 = 2.61$$

$$\rightarrow F_{\text{average}} = 2.50$$

ότι είναι επαρκές να θεωρηθεί ότι κάθε μονάδα αύξησης της υπολογιζόμενης απώλειας πύρωσης του clinker κατά 1.0 %, αντισταθμίζεται με μείωση της τροφοδοσίας του ασβεστολίθου κατά 2.50 %, για να διατηρηθεί η απώλεια πύρωσης του τσιμέντου σταθερή. Συνεπώς μπορεί να υπολογιστεί η μείωση των αντοχών για κάθε 1.0 % μείωση στην αναλογία του ασβεστολίθου που τροφοδοτείται (Πίνακας 5). Η μείωση αυτή καθίσταται άμεσα αντιληπτή από την ένδειξη της ζυγοταινίας με την οποία τροφοδοτείται ο ασβεστόλιθος και την συνολική παραγωγή ανά ώρα του μύλου τσιμέντου.

Όπως έχει υπολογιστεί (Πίνακας 5) στις 28 ημέρες η μείωση των αντοχών λόγω της τροφοδοσίας του υπαίθριου clinker είναι $R_{28\text{days}} = 1.27 \text{ MPa}$ και στις 2 ημέρες είναι $R_{2\text{days}} = 1.13 \text{ MPa}$. Σύμφωνα με διαθέσιμες στατιστικές συσχετίσεις, αναμένεται για κάθε 1 % αύξηση του ποσοστού του clinker που τροφοδοτείται κατά την άλεση του τσιμέντου, να παρατηρείται αύξηση 0.38 MPa στις αντοχές θλίψης 2 ημερών και 0.65 MPa στις 28 ημέρες. Συνεπώς, για μείωση κατά 1.0 % της τροφοδοσίας του ασβεστολίθου και ως εκ τούτου αύξηση κατά 1.0 % της τροφοδοσίας του clinker υπό σταθερή τιμή LOI τσιμέντου, η αναμενόμενη τελική ελάττωση στις αντοχές θλίψης των 2 ημερών θα είναι:

$R_{2\text{days,fin}} = -1.13 + 0.38 = -0.75 \text{ MPa}$ και για τις 28 ημέρες:

$R_{28\text{days,fin}} = -1.27 + 0.65 = -0.62 \text{ MPa}$.

Για την αντιστάθμιση τώρα αυτής της αναμενόμενης ελάττωσης των αντοχών θλίψης των 2 και 28 ημερών, θα πρέπει να αυξηθεί επιπλέον η συμμετοχή του ποσοστού του clinker (και συνεπώς να μειωθεί περαιτέρω το ποσοστό του ασβεστολίθου), L, στην άλεση του τσιμέντου αντίστοιχα κατά:

- $L_{2\text{days}} = |R_{2\text{days,fin}}| / 0.38 = 1.97 \%$
- $L_{28\text{days}} = |R_{28\text{days,fin}}| / 0.65 = 0.95 \%$

Άρα για κάθε 1.0 % μείωση στην αναλογία του ασβεστολίθου που χρειάζεται να εφαρμοστεί λόγω του αυξημένου LOI που χαρακτηρίζει το υπαίθριο clinker το οποίο συμμετέχει στην άλεση τσιμέντου CEM I, ώστε να επιτευχθεί ίδια τιμή LOI τσιμέντου όπως στην περίπτωση άλεσής του με clinker μόνο από σιλό, είναι αναγκαία περαιτέρω μείωση της τροφοδοσίας του ασβεστολίθου κατά 2.0 % και κατά 1.0 %, ώστε να παραμείνουν αμετάβλητες οι τιμές αντοχών θλίψης των 2 και 28 ημερών αντίστοιχα.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Κατά την άλεση τσιμέντου τύπου CEM I με συμμετοχή υπαίθριου clinker, για κάθε 1 % μείωση της αναλογίας ασβεστολίθου, η οποία προκύπτει λόγω της αύξησης της απώλειας πύρωσης του χρησιμοποιούμενου clinker για διατήρηση της τιμής απώλειας πύρωσης τσιμέντου, θα πρέπει να μειωθεί περαιτέρω κατά 1.0 % η αναλογία τροφοδοσίας του ασβεστολίθου, ώστε να επιτευχθεί αντιστάθμιση της απώλειας των αντοχών θλίψης 28 ημερών. Η μείωση στις αντοχές θλίψης 2 ημερών η οποία δεν μπορεί να αντισταθμιστεί με την απαιτούμενη μείωση του ασβεστολίθου για διατήρηση σταθερών αντοχών, μπορεί είτε να αγνοηθεί είτε να διορθωθεί εφαρμόζοντας λεπτότερη άλεση ή αυξάνοντας περαιτέρω την αναλογία τροφοδοσίας του clinker κατά 1.0 %.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

BS EN 12390 (2009). Testing hardened concrete. BSI, London, UK

BS EN 196-1 (2016). Methods of testing cement. Determination of strength. BSI, London, UK

BS EN 196-3 (2016). Methods of testing cement. Determination of setting times and soundness. BSI, London, UK

BS EN 197-1 (2011). Cement. Composition, specifications and conformity criteria for common cements. BSI, London, UK