

TurboCast[®] Καινοτόμο σύστημα επιταχυντικών προσθέτων για την προκατασκευή

TurboCast[®] Innovative acceleration system for precast elements

Βιβή Δηλαβέρη¹ Ελευθερία Τσιάβου²

Λέξεις κλειδιά: Προκατασκευή, Επιταχυντικά πρόσθετα, Ενυδάτωση τσιμέντου, Ρυθμός ενυδάτωσης, Πρώιμες Αντοχές, Κύκλος Ωρίμανσης, Precast elements, Set accelerating admixtures, Cement hydration, Early strength, Maturing cycle

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Οι σύγχρονες ανάγκες του κύκλου παραγωγής της προκατασκευής απαιτούν λύσεις τεχνολογίας προσθέτων οι οποίες θα αυξήσουν την απόδοση και την ποιότητα των προκατασκευασμένων στοιχείων λαμβάνοντας υπόψη την βελτιστοποίηση του κόστους παραγωγής και την περιβαλλοντική προστασία. Το TurboCast[®], που αναπτύχθηκε από το Ερευνητικό Τμήμα της CHRYSO SAS, είναι ένα σύστημα από 3 διαφορετικά πρόσθετα που αλληλοεπιδρούν μεταξύ τους επιτυγχάνοντας, σε σύγκριση με την χρήση των παραδοσιακών προσθέτων προκατασκευής τα παρακάτω:

- περαιτέρω αύξηση των πρώιμων μηχανικών αντοχών
- μείωση ή εξάλειψη της ωρίμανσης με ατμό
- ευκολότερη και μειωμένου χρόνου πλήρωση στοιχείων προκατασκευής

άρα κατ' επέκταση την μεγάλη αύξηση της παραγωγικότητας της μονάδας προκατασκευής. Σε ένα κύκλο ωρίμανσης παραγωγής 6 ωρών εκτιμάται η εξοικονόμηση 2 ωρών, δηλαδή βελτιστοποίηση κύκλου κατά 30%.

Το σύστημα χρησιμοποιείται επιτυχώς πάνω 7 χρόνια σε εφαρμογές στην Ευρώπη. Στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται εργαστηριακά αποτελέσματα καθώς και αποτελέσματα εφαρμογών στο Βέλγιο και τη Σουηδία σε σύγκριση με την χρήση παραδοσιακών προσθέτων για την προκατασκευή.

ABSTRACT: Latest needs of precast production require concrete admixture technology solutions that may improve performance and quality, taking into

¹ Πολιτικός Μηχανικός, Υπεύθυνη Κλάδου Προσθέτων Σκυροδέματος, Nordia AE
e-mail: vdilaveri@marmoline.gr

² Μηχ.Μεταλλείων-Μεταλλουργός Μηχανικός, Υπεύθυνη Κλάδου Αδρανών& Περίληψη, Nordia AE, e-mail: etsiavou@marmoline.gr

account cost optimization and environmental protection. CHRYSO's R&D team has developed the Turbocast® system, more than just a simple acceleration solution. Turbocast® is a system with 3 levers which interact to deliver when compared to traditional admixture solutions: further increase in early strengths, reduction or elimination of steam curing and faster placement of moulds. As a result the use of Turbocast® system allows the increase of production rates , in a production cycle of 6 hours , it is estimated to save 2 hours ie optimization of production cycle around 30%. In the present paper laboratory, results as well as field results of applications in Belgium and Norway are presented.

ΘΕΩΡΗΤΙΚΟ ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Ενυδάτωση του τσιμέντου

Η πήξη και η σκλήρυνση του σκυροδέματος οφείλονται αποκλειστικά στη χημική δράση μεταξύ του τσιμέντου και νερού-φαινόμενο ενυδάτωσης τσιμέντου. Αναλυτικά η χημική σύσταση του τσιμέντου φαίνεται στον **Πίνακα 1**. Η ενυδάτωση του τσιμέντου περιλαμβάνει σειρά από περίπλοκους χημικούς μηχανισμούς και εξαρτάται από την:

- Ορυκτολογική σύσταση τσιμέντου
- Ποσότητα τσιμέντου
- Ποσότητα νερού
- Θερμοκρασία σκυροδέματος

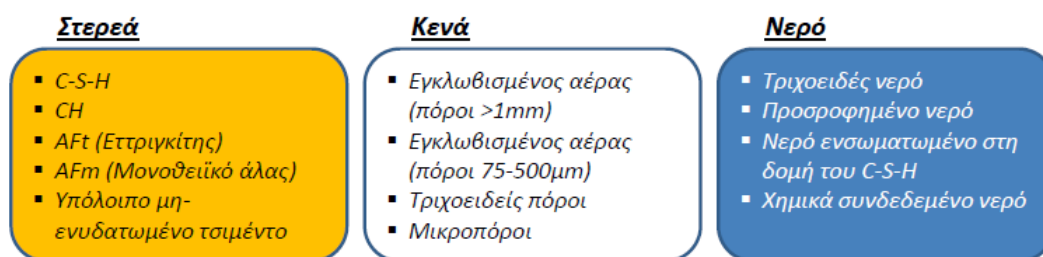
Πίνακας 1. Χημική Σύσταση Τσιμέντου

Χημική φόρμουλα	Συμβολισμός	Ονομασία
$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S	Πυριτικό τριασβέστιο
$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S	Πυριτικό διασβέστιο
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	Αργλικό τριασβέστιο
$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	Αργιλοσιδηρικό τετρασβέστιο

Η ενυδάτωση του τσιμέντου είναι χημική αντίδραση με ταυτόχρονη έκλυση θερμότητας. Το γεγονός ότι είναι εξώθερμη αντίδραση μας δίνει τη δυνατότητα να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος της μικροθερμιδομετρίας και να είναι δυνατή η παρατήρηση και η μέτρηση των επιδόσεων της επιτάχυνσης σκλήρυνσης σκυροδέματος.

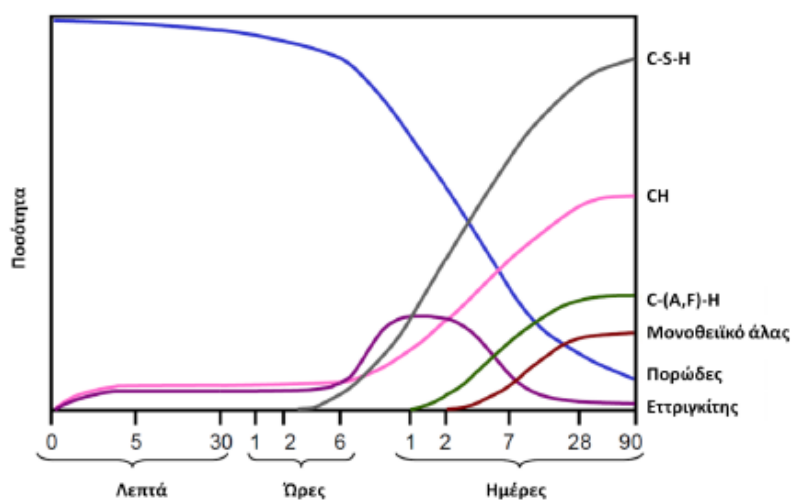
Οι ταχύτητες ενυδάτωσης των ενώσεων του τσιμέντου έχουν την ακόλουθη κατάταξη: $\text{C}_3\text{A} > \text{C}_3\text{S} > \text{C}_4\text{AF} > \text{C}_2\text{S}$ και αντίστοιχη είναι η κατάταξη για το ποσό θερμότητας που εκλύεται από το καθένα από τα τέσσερα συστατικά.

Η ενυδατωμένη τσιμεντόπαστα αποτελείται από στερεά (C-S-H, CH, Εττριγκίτη, κλπ) νερό (προσοφημένο, χημικά συνδεδεμένο, τριχοειδές, κλπ) και κενά (εγκλωβισμένος αέρας, τριχοειδής πόροι κλπ). Αναλυτικά η σύσταση της φαίνεται στο **Σχήμα 1**.



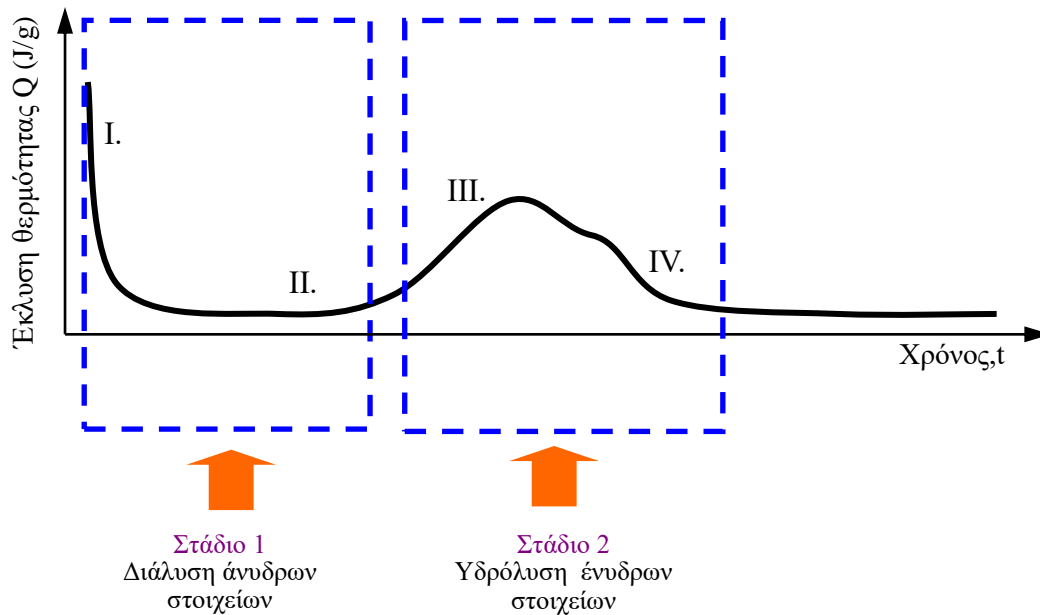
Σχήμα 1. Σύσταση ενυδατωμένης τσιμεντόπαστας

Κατά τη διάρκεια ενυδάτωσης του τσιμέντου παράγονται σειρά προϊόντων όπως φαίνεται χαρακτηριστικά στο **Σχήμα 2**.



Σχήμα 2. Προϊόντα που παράγονται κατά τη διάρκεια ενυδάτωσης του τσιμέντου

Ο ρυθμός ενυδάτωσης του τσιμέντου ή η έκλυση θερμότητας σε συνάρτηση με τον χρόνο μπορεί να θεωρηθεί ως διεργασία δύο σταδίων που συμπεριλαμβάνει 4 περιόδους. **Σχήμα 3**.



Σχήμα 3. Ρυθμός ενυδάτωσης/Έκλυση θερμότητας σε συνάρτηση με το χρόνο.

Στο πρώτο στάδιο πραγματοποιείται η διάλυση των άνυδρων στοιχείων, το C_3A και το C_3S αντιδρούν αμέσως με το νερό και η αντίδραση αυτή διαρκεί λίγα λεπτά (Σχήμα 3 περιοχή I). Το νερό ανάμιξης δεν είναι πλέον καθαρό νερό αλλά ένα πλούσιο σε θειικά, αλκαλικό, διάλυμα. Η γέλη που δημιουργείται στην επιφάνεια των κόκκων παρεμποδίζει την πρόσβαση του διαλύματος στις αργλικές περιοχές των κόκκων με αποτέλεσμα να αποτρέπεται η περαιτέρω ταχεία διάλυση των στοιχείων του τσιμέντου. Στην συνέχεια ακολουθεί η περίοδος της ωρίμανσης (Σχήμα 3 περιοχή II) κατά την διάρκεια της οποίας σχεδόν καμία αντίδραση δεν λαμβάνει χώρα και το διάλυμα φορτίζεται με ιόντα Ca^+ και OH^- μέχρι κορεσμού. Η περίοδος αυτή διαρκεί συνήθως από 2-4 ώρες όπου το σκυρόδεμα έχει πλαστικές ιδιότητες, χαμηλή θερμοκρασία και χαμηλό ιξώδες.

Στο δεύτερο στάδιο ο ρυθμός της αντίδρασης αυξάνει γρήγορα με ταυτόχρονη σημαντική έκλυση θερμότητας (Σχήμα 3 περιοχή III). Πραγματοποιείται η υδρόλυση του C_3S και απελευθερώνονται Ca^+ και OH^- μέχρι το διάλυμα γύρω από τους κόκκους να γίνει κορεσμένο, οπότε και λαμβάνει χώρα ο ταχύς σχηματισμός στερεών προϊόντων με κυριότερα τις ένυδρες ασβεστοπυριτικές ενώσεις C-S-H και κρυστάλλων CH. Επιπλέον παρατηρείται νέα ανάπτυξη κρυστάλλων εττριγκίτη, το ιξώδες του σκυροδέματος αυξάνει, η σκλήρυνση ξεκινάει. Στο τέλος αυτής της περιόδου περίπου το 30% του τσιμέντου έχει ενυδατωθεί και η τσιμεντόπαστα έχει υποβληθεί σε αρχική και τελική πήξη.

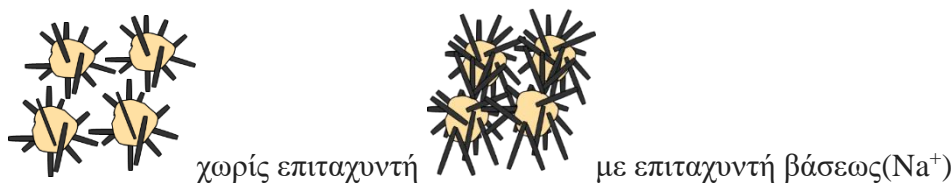
Στην τελευταία περίοδο (Σχήμα 3 περιοχή V) η αντίδραση της ενυδάτωσης των μη ενυδατωμένων κόκκων προχωράει αλλά με αργό ρυθμό.

Λαμβάνοντας υπόψη τα στάδια της ενυδάτωσης του τσιμέντου, η χημική επιτάχυνση μπορεί να επιτευχθεί είτε με την μείωση του χρόνου της περιόδου ωρίμανσης είτε με την αύξηση ρυθμού ανάπτυξης των κρυστάλλων εττριγκίτη ώστε να έχουμε σαν αποτέλεσμα την επιτάχυνση της σκλήρυνσης σκυροδέματος.

Επιταχυντικά πρόσθετα σκυροδέματος

Οι επιταχυντές πήξης είναι πρόσθετα σκυροδέματος που επιταχύνουν τη διαδικασία ενυδάτωσης του τσιμέντου. Υπάρχουν διαφορετικής χημικής βάσεως επιταχυντές. Μέχρι πρότινος οι πιο διαδεδομένοι επιταχυντές είχαν σαν κύριο συστατικό το χλωριούχο ασβέστιο (CaCl_2). Λαμβάνοντας υπόψη δευτερογενείς συνέπειες όπως ενδεχόμενη διάβρωση του οπλισμού όταν η περιεκτικότητα σε Cl ξεπεράσει ορισμένο όριο, η αδύνατη εφαρμογή τους σε προεντεταμένο σκυρόδεμα και η μη συμβατότητα τους με άλλα υλικά όπως το αργιλικό τσιμέντο, έχουν αναπτυχθεί και επιταχυντές ελεύθερων χλωριόντων (περιεκτικότητα $\text{Cl} \leq 0,1\%$) με βάση το ασβέστιο ή το νάτριο και νιτρικά ή θειοκυανικά ανιόντα.

Οι επιταχυντές ελεύθερων χλωριόντων με βάση το ασβέστιο (Ca^{2+}) δρουν κατά κύριο λόγο μειώνοντας τον χρόνο ωρίμανσης στην ενυδάτωση . Οι επιταχυντές ελευθέρων χλωριόντων με βάση το νάτριο (Na^+) έχουν ουδέτερη δράση στον χρόνο ωρίμανσης αλλά δρουν σαν καταλύτες στην ανάπτυξη των κρυστάλλων εττριγκίτη όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.



Σχήμα 4. Ανάπτυξη κρυστάλλων εττριγκίτη

ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

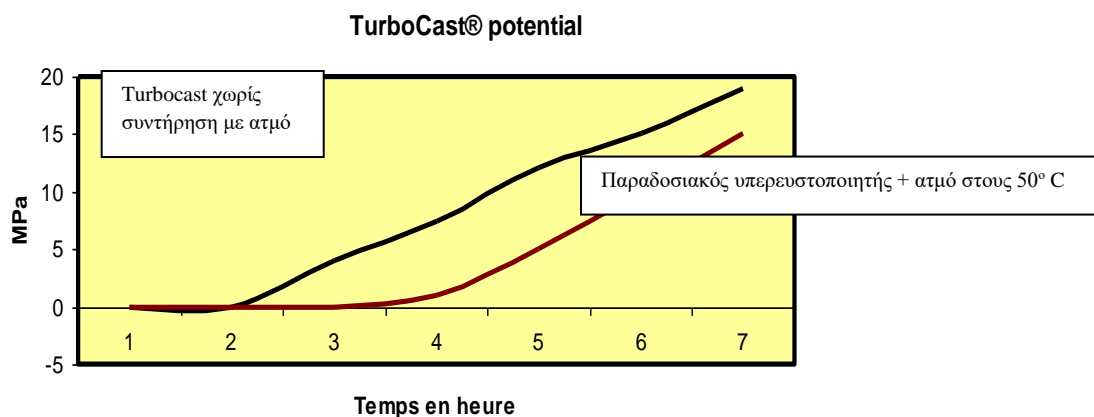
Το σύστημα TurboCast[®] αποτελείται από 3 προϊόντα τα οποία αλληλεπιδρούν μεταξύ τους :

- Chryso Turbo F50-τροποποιεί την αρχική αντίδραση ενυδάτωσης του τσιμέντου
- Chryso Cast M50- επιτρέπει τον έλεγχο της διατήρησης της συνεκτικότητας
- Chryso Premia- ισχυρός μειωτής νερού

Τα εργαστηριακά αποτελέσματα καθώς και τα αποτελέσματα εφαρμογών του TurboCast® που ακολουθούν μας παραθέτουν το τεχνικό δυναμικό του συστήματος.

Εργαστηριακά αποτελέσματα

Σε συνθέσεις βαριάς προκατασκευής με περιεκτικότητα τσιμέντου CEM I52,5R στα 400 kg/m³, το TurboCast® (συντήρηση χωρίς ατμό) παρουσιάζει τα ίδια αποτελέσματα πρώιμων αντοχών δύο ώρες νωρίτερα από τις συνθέσεις με παραδοσιακούς υπερευστοποιητές (συντήρηση με ατμό). **Σχήμα 5.**

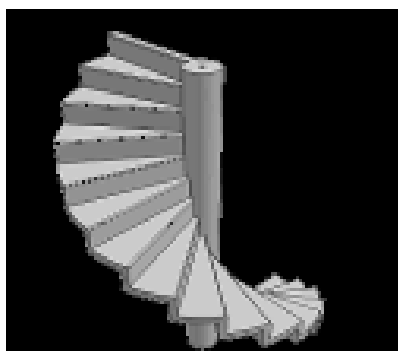


Σχήμα 5. Ανάπτυξη αντοχών σε σχέση με το χρόνο.

Αποτελέσματα εφαρμογής

Παραγωγή στοιχείων ελικοειδούς κλιμακοστασίου στο Βέλγιο

Το σύστημα TurboCast® έχει εφαρμοστεί σε στοιχεία ελικοειδούς κλιμακοστασίου στο Βέλγιο.



Σχήμα 6. Παράσταση στοιχείων προκατασκευής για εφαρμογή συστήματος Turbocast® στο Βέλγιο

Η σύνθεση σκυροδέματος αναφοράς που ήταν και η τρέχουσα σύνθεση παραγωγής συμπεριλαμβάνει:

- CEM I 52,5R : 400 kg/m³
- Ισχυρός μειωτής νερού (πολυκαρβοξυλικής βάσεως) : 0,5% κ.β. τιμέντου
- Συνεκτικότητα : S3(13-14 cm)
- Περιεκτικότητα νερού στο νωπό σκυρόδεμα: 9%
- T_{περ}=25°C

Στόχος ήταν η παραγωγή περισσότερων κλιμακοστασιών στο ίδιο καλούπι χωρίς επίδραση στην απαιτούμενη διατήρηση της συνεκτικότητας (για χρόνο 30'). Πραγματοποιήθηκαν στην παραγωγή δύο εναλλακτικά σενάρια του συστήματος, διατηρώντας την ίδια δοσολογία του ισχυρού μειωτή νερού όπως στο σκυρόδεμα αναφοράς και τα αποτελέσματα φαίνονται στον **Πίνακα 2**.

T _{περ} =25°C	Σκυρόδεμα αναφοράς	Δοκιμή 1 TurboF50 10% CastM50 0,15%	Δοκιμή 2 TurboF50 9% CastM50 0,2%
Θλιπτική αντοχή (6 ώρες)	1,6 MPa	11 MPa	15 MPa
Θλιπτική αντοχή (24 ώρες)	34 MPa	43 MPa	44 MPa
Περιεκτικότητα νερού (24 ώρες)	8,2%	7,7%	6,9%
Συνεκτικότητα στα 30'	S3	S3	S3

Πίνακας 2. Αποτελέσματα δύο εναλλακτικών σεναρίων εφαρμογής του συστήματος

Στην προκείμενη παραγωγή το σύστημα Turbocast[®] επιτρέπει την ανάπτυξη της απαραίτητης θλιπτικής αντοχής ώστε να είναι εφικτό το ξεκαλούπωμα στις 6 ώρες, εξοικονόμηση 3 ωρών στον συνήθη κύκλο παραγωγής και κατά συνέπεια σημαντική αύξηση δυναμικότητας της παραγωγής τους χωρίς απαίτηση αγοράς νέων καλουπιών.

Παραγωγή πλακών κοίλου πυρήνα στη Σουηδία

Το σύστημα TurboCast[®] έχει εφαρμοστεί και για την παραγωγή πλακών κοίλου πυρήνα στη Σουηδία.



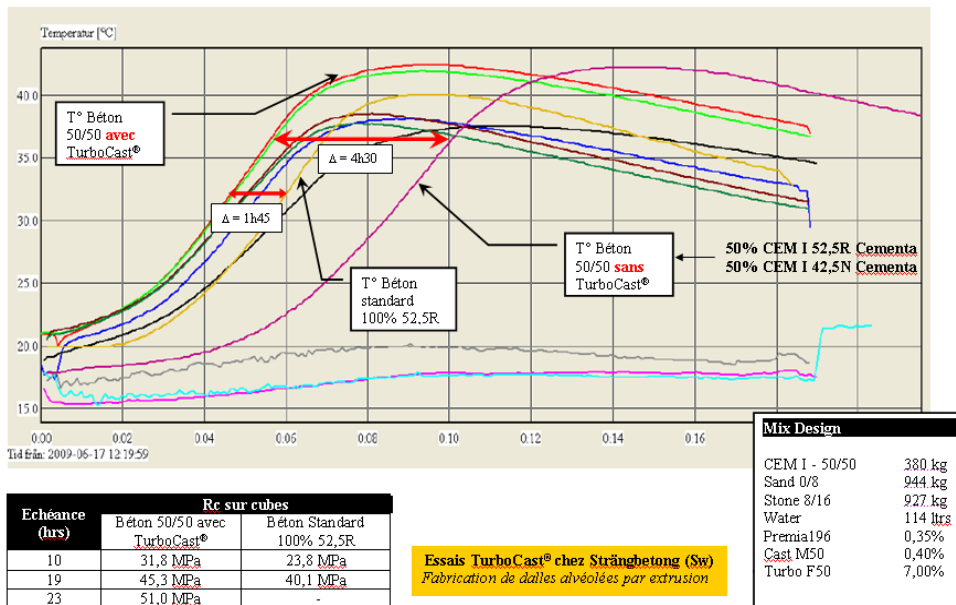
Σχήμα 7. Εφαρμογή συστήματος Turbocast[®] στη Σουηδία

Στην παρούσα δοκιμή παραγωγής έγινε καταγραφή της θερμοκρασίας του σκυροδέματος σε σχέση με τον χρόνο σε 3 διαφορετικές συνθέσεις όσον αφορά τον τύπο τσιμέντου και τα πρόσθετα σκυροδέματος. Η τρέχουσα σύνθεση παραγωγής σκυροδέματος (αναφοράς) των στοιχείων περιλαμβάνει 380kg/m³ CEM I 52,5R , η δεύτερη σύνθεση περιλαμβάνει μίξη CEM I 42,5N & CEM I 52,5R (σε αναλογία 50% - 50% κ.β.) και η τρίτη την μίξη των τσιμέντων αλλά με την χρήση του συστήματος Turbocast.

Η δοκιμή αυτή μας έδειξε ότι με την χρήση του συστήματος Turbocast μπορεί να αντικατασταθεί η υφιστάμενη σύνθεση (εξ' ολοκλήρου CEM I 52.5R) με μίξη τσιμέντων CEM I παρουσιάζοντας υψηλότερη ανάπτυξη θερμοκρασίας στους

αρχικούς χρόνους και κατά επέκταση υψηλότερες πρώιμες αντοχές στις 10hr (31,8MPa έναντι 23,8 MPa). **Σχήμα 8.**

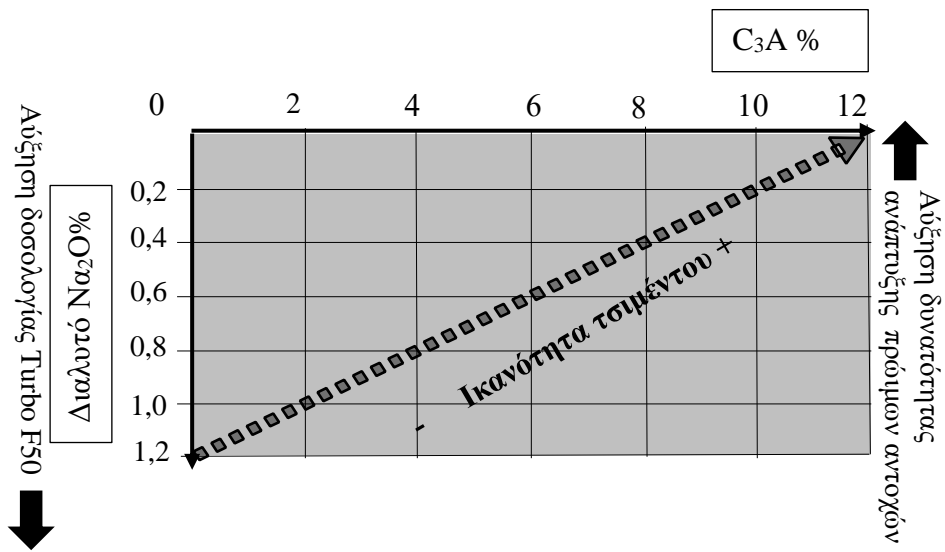
Αξιοσημείωτη είναι και η διαφορά του χρόνου ανάπτυξης της ίδιας θερμοκρασίας μεταξύ των δύο συνθέσεων με την μίξη των τσιμεντών (με και χωρίς TurboCast). **Σχήμα 8.**



Σχήμα 8. Καταγραφή θερμοκρασίας σκυροδέματος στη μονάδα προκατασκευής

ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Το TurboCast® παρέχει απόδοση υψηλών αποτελεσμάτων σε σύγκριση με τους παραδοσιακούς επιταχυντές, αλλά θα πρέπει να λαμβάνουμε υπόψη μας ότι οι κανόνες αλληλεπίδρασης με τα τσιμεντά παραμένουν αμετάβλητοι. **Σχήμα 9.**



Σχήμα 9. Ικανότητα ανάπτυξης πρώιμων αντοχών

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Δεδομένου της ικανότητας ανάπτυξης υψηλότερων πρώιμων αντοχών σε σχέση με τα παραδοσιακά πρόσθετα σκυροδέματος, η χρήση του συστήματος Turbocast είναι η τεχνική λύση για τις παρακάτω περιπτώσεις:

- Μείωση /εξάλειψη συντήρησης με ατμό, λαμβάνοντας τις ίδιες μηχανικές αντοχές στον απαιτούμενο χρόνο.
- Αύξηση της παραγωγικής ικανότητας του εργοστασίου χωρίς να είναι απαραίτητη η επένδυση αγοράς νέων καλουπιών ή συστήματος συντήρησης με ατμό.
- Βελτίωση των συνθηκών εργασίας και κόστους των τεχνιτών, αφού μπορεί να εξαλειφθεί η νυχτερινή βάρδια και να βελτιστοποιηθεί το εργατικό κόστος

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Μοροπούλου, Α., Λαμπρόπουλος, Κ., «Δομικά Υλικά», Διδακτικές σημειώσεις μαθήματος «Δομικά Υλικά» 9^ο εξαμ., Χ-Μ (2012) 27-28

Οικονόμου, Χ., «Τεχνολογία του Σκυροδέματος», Art of Text, Ξάνθη, (1993)

Seurre, J., Bonafous, L., «TurboCast Dossier Technique», CHRYSO Technical and R&D Departments, (2011)15-18