

ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑΣ ΤΗΣ ΕΝΥΔΑΤΩΣΗΣ ΤΕΤΑΡΤΟΜΕΡΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ

Μαργαρίτα Μπεάζη Κατσιώτη

Επικ. Καθηγήτρια Σχολής Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ

Παναγιώτα Πιπλικάκη

Χημικός Μηχανικός, Σχολή Χημικών Μηχανικών ΕΜΠ

Μιχάλης Φαρδής

Δρ. Φυσικός, Ινστιτούτο Επιστήμης Υλικών, ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος

Γεώργιος Παπαβασιλείου

Διευθυντής Ινστιτούτου Επιστήμης Υλικών, ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος

Λέξεις κλειδιά: Σύνθετα τσιμέντα, ενυδάτωση τσιμέντου, Πυρηνικός Μαγνητικός Συντονισμός (NMR)

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Η παρούσα εργασία έχει ως στόχο να εξετάσει την επίδραση που έχει η προσθήκη μίγματος τριών διαφορετικών προσθέτων στην διαδικασία της ενυδάτωσης σύνθετων τσιμέντων. Για το σκοπό αυτό παρήχθησαν σύνθετα τσιμέντα με δύο διαφορετικές αναλογίες ιπτάμενης τέφρας φυσικής ποζολάνης και ασβεστόλιθου τα οποία συγκρίθηκαν με κοινό τσιμέντο της ίδιας κατηγορίας αντοχής. Η εξέλιξη της ενυδάτωσης μετρήθηκε μακροσκοπικά μέσω της αντοχής σε θλίψη και μικροσκοπικά με τη χρήση Πυρηνικού Μαγνητικού Συντονισμού. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδειξαν ότι η ενυδάτωση των τεταρτομερών τσιμέντων καθυστερεί, γεγονός που αποδίδεται στην προσθήκη ποζολανικών προσθέτων.

1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Την τελευταία δεκαετία παράγεται και χρησιμοποιείται σε κατασκευές μεγάλος αριθμός σύνθετων τσιμέντων. Ανά τον κόσμο έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορα πρόσθετα καθώς και συνδυασμοί προσθέτων αλλά η επίδραση που έχει το καθένα στην διαδικασία της ενυδάτωσης του τσιμέντου δεν έχει ακόμα εξακριβωθεί για την περίπτωση τριμερών και τετραμερών σύνθετων τσιμέντων.

Ο σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να εξετάσει την επίδραση που έχει η προσθήκη μίγματος τριών διαφορετικών προσθέτων στην διαδικασία

της ενυδάτωσης των σύνθετων τσιμέντων. Έτσι, παρήχθησαν σύνθετα τσιμέντα με δύο διαφορετικές αναλογίες ιπτάμενης τέφρας προέλευσης Πτολεμαΐδας, φυσικής ποζολάνης (μηλαϊκής γής και περλίτη) και ασβεστόλιθου τα οποία συγκρίθηκαν με κοινό τσιμέντο της ίδιας κατηγορίας αντοχής σύμφωνα με το ΕΛΟΤ-EN 197-1. Η εξέλιξη της ενυδάτωσης μετρήθηκε μακροσκοπικά με την παρακολούθηση της αντοχής σε θλίψη σε 1, 2, 7, 28 ημέρες και μικροσκοπικά με τη χρήση Πυρηνικού Μαγνητικού συντονισμού πρωτονίου ($^1\text{H-NMR}$). Επίσης, έγιναν μετρήσεις των ιδιοτήτων του τσιμέντου (απαίτηση σε νερό και χρόνος πήξης).

Ο μηχανισμός της ενυδάτωσης του τσιμέντου είναι μία σύνθετη διαδικασία που έχει μελετηθεί εκτενώς λόγω της σημασίας της στην ανάπτυξη της αντοχής του τσιμέντου καθώς και τις επιδράσεις που έχει στην διαμόρφωση της εσωτερικής του δομής. Υπάρχουν αρκετές διαφορετικές απόψεις όσον αφορά τις λεπτομέρειες του μηχανισμού της ενυδάτωσης του τσιμέντου που περιγράφονται επαρκώς σε διάφορα άρθρα [Gartner and Gaidis (1989)]. Μια γενικά παραδεκτή περιγραφή της διαδικασίας διακρίνει τις παρακάτω χρονικές περιόδους της ενυδάτωσης του τσιμέντου. Ακριβώς μετά την ανάμειξη υπάρχει μια σύντομη αύξηση της δραστηριότητας που ακολουθείται από μια περίοδο αδράνειας (dormant period) όπου ο ρυθμός της αντίδρασης μειώνεται στο ελάχιστο. Η περίοδος αδράνειας ή εισαγωγής πιστεύεται ότι απορρέει από το γεγονός ότι στην επιφάνεια των κόκκων του C_3S δημιουργείται ένα στρώμα από αρχικά προϊόντα ενυδάτωσης απαγορεύοντας την περαιτέρω αντίδραση. Ο ρυθμός είναι μειωμένος για κάποιο χρονικό διάστημα (ο αριθμός των οποίων εξαρτάται από τη θερμοκρασία), μετά από το οποίο το επιφανειακό στρώμα των προϊόντων προφανώς διαρρηγνύεται. Κατά την περίοδο που ακολουθεί (acceleration period), δημιουργείται η πλειονότητα των ένυδρων ασβεστοπυριτικών ενώσεων (C-S-H) σε μορφή πήγματος μέσω ομογενούς πυρήνωσης και ανάπτυξης. Όταν όλα τα επιφανειακά στρώματα των κόκκων του C_3S επικαλύπτονται από ένα επαρκώς παχύ στρώμα C-S-H, η αντίδραση περιορίζεται από τον ρυθμό που το νερό διαχέεται μέσω του C-S-H ώστε να φτάσει το C_3S που δεν έχει αντιδράσει και η περίοδος αυτή χαρακτηρίζεται ως περίοδος επιβράδυνσης ή διάχυσης (diffusion limited period). [Gartner and Gaidis (1989)], [S.A.FitzGerald et al. 1998]

Με την χρησιμοποίηση του πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού σε πυρήνες πρωτονίων ($^1\text{H NMR}$) είναι δυνατό να παρακολουθηθεί η εξέλιξη της ενυδάτωσης του τσιμέντου με μη-καταστρεπτικό τρόπο, μέσω του νερού που παίρνει μέρος στην ενυδάτωση. Ο πυρηνικός μαγνητικός συντονισμός αποτελεί έναν κλάδο φασματοσκοπίας που γενικά περιλαμβάνει τη μελέτη της φύσης των ενεργειακών σταθμών στα υλικά και των μεταβάσεων που προκαλούνται μέσω της απορρόφησης ή εκπομπής

ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Στηρίζεται στο γεγονός ότι πολλοί ατομικοί πυρήνες παρουσιάζουν διπολική μαγνητική ροπή διάφορη του μηδενός.

Σε ένα πείραμα πυρηνικού μαγνητικού συντονισμού το υλικό που εξετάζεται τοποθετείται εντός ενός ομογενούς στατικού μαγνητικού πεδίου. Με τη χρήση ενός πομπού ραδιοσυχνοτήτων εκπέμπονται ηλεκτρομαγνητικά κύματα και δημιουργείται μαγνητικό πεδίο κάθετο προς το εξωτερικό στατικό πεδίο. Όταν η εκπεμπόμενη συχνότητα από τον πομπό φθάσει τη χαρακτηριστική συχνότητα προς συντονισμό των πυρήνων του δείγματος, λαμβάνει χώρα απορρόφηση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας λόγω της μεταβάσεως πυρήνων από τη βασική στη διεγερμένη κατάσταση.

Σε ένα παλμικό πείραμα NMR, το υλικό τοποθετείται σε ένα στατικό μαγνητικό πεδίο H_0 με αποτέλεσμα τη δημιουργία μιας μαγνήτισης ισορροπίας M_0 σε κατάσταση θερμικής ισορροπίας. Ακολουθώντας με την εφαρμογή ενός ή περισσότερων παλμών, η κατάσταση αυτή της ισορροπίας διαταράσσεται και η επαναφορά του συστήματος στην ισορροπία παρατηρείται μέσω της μαγνήτισης όπως αυτή επανέρχεται στην αρχική της τιμή M_0 . Η επαναφορά του συστήματος περιγράφεται χρονικά με τη διαμήκη και την εγκάρσια συνάρτηση αποδιέγερσης. Η διαμήκης συνάρτηση αποδιέγερσης περιγράφει την αποδιέγερση της συνιστώσας της μαγνήτισης η οποία είναι παράλληλη με το πεδίο H_0 και χαρακτηρίζεται με τον χρόνο αποδιέγερσης spin-πλέγματος T_1 (spin-lattice relaxation time T_1). Η εγκάρσια συνάρτηση αποδιέγερσης περιγράφει την επαναφορά στο μηδέν της συνιστώσας της μαγνήτισης στο επίπεδο που είναι κάθετο στο πεδίο H_0 και χαρακτηρίζεται με τον χρόνο αποδιέγερσης T_2 (spin-spin relaxation time T_2).

Ο πυρηνικός μαγνητικός συντονισμός σε πυρήνες πρωτονίων (1H NMR), είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για την μελέτη της κινητικής της ενυδάτωσης του τσιμέντου μέσω των παραπάνω χαρακτηριστικών χρόνων αποδιέγερσης των πυρήνων των μορίων του νερού που λαμβάνει μέρος στην ενυδάτωση. Η εφαρμογή αυτή στηρίζεται στο γεγονός ότι ο χαρακτηριστικός χρόνος αποδιέγερσης spin-πλέγματος T_1 των μορίων του νερού, μεταβάλλεται ριζικά όταν αυτό βρίσκεται σε επαφή με την επιφάνεια ενός υλικού (Korringa et al. 1962). Κατά την διάρκεια της ενυδάτωσης του τσιμέντου, ένα μεγάλο ποσοστό του νερού ευρίσκεται προσροφημένο στην τεράστια επιφάνεια της πάστας τσιμέντου και των άλλων προϊόντων της ενυδάτωσης και ο χρόνος T_1 εξάρταται από το ποσοστό του προσροφημένου νερού και κατά συνέπεια από τον λόγο επιφάνειας προς όγκο του πορώδους αυτού μέσου (Papavassiliou et al 1998, Papavassiliou et al 1997, Milia et al. 1994).

Συγκεκριμένα, στα αρχικά στάδια της ενυδάτωσης λόγω της γρήγορης ανταλλαγής μεταξύ μορίων του νερού που είναι προσροφημένα στις επιφάνειες των κόκκων του τσιμέντου και των μορίων του νερού που είναι σχετικά ελεύθερα, ο μετρούμενος μέσος χρόνος αποδιέγερσης T_1 θα είναι (Zimmerman και Brittin, 1957):

$$(1/T_1) = (n/T_{1surf}) + ((1-n)/T_{1bulk}) \quad (1)$$

όπου T_{1bulk} χαρακτηρίζει τον χρόνο αποδιέγερσης του ελεύθερου νερού, T_{1surf} χαρακτηρίζει το χρόνο του προσροφημένου νερού και n είναι το ποσοστό του προσροφημένου νερού. Για ένα κορεσμένο με νερό πόρο το ποσοστό αυτό είναι ανάλογο του λόγου επιφάνειας/όγκο (S/V) του πόρου.

Επειδή $T_{1bulk} \gg T_{1surf}$, λόγω της παρουσίας παραμαγνητικών κέντρων στην επιφάνεια των πόρων που μειώνουν τον χρόνο αποδιέγερσης του προσροφημένου νερού στην επιφάνεια έχουμε:

$$(1/T_1) = n/T_{1surf} \sim (S/V) / (1/T_{1surf}) \quad (2)$$

Από την παραπάνω σχέση προκύπτει ότι η μεταβολή του χρόνου αποδιέγερσης T_1 αντανακλά την μεταβολή του λόγου S/V . Καθώς η ενυδάτωση του τσιμέντου συνοδεύεται από μια δραματική αλλαγή του λόγου S/V , η σχέση αυτή καθιστά δυνατή την παρακολούθηση της διαδικασίας ενυδάτωσης του τσιμέντου μέσω της μεταβολής του χρόνου αποδιέγερσης T_1 .

2. ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

Παρήχθησαν με εργαστηριακό σφαιρόμυλο σύνθετα τσιμέντα με 6% κ.β. ιπτάμενη τέφρα προέλευσης Πτολεμαΐδας, 17% κ.β. περλίτη, 8% κ.β. ασβεστόλιθο και 69% τσιμέντο (Σύνθεση 1) και 15% κ.β. ιπτάμενη τέφρα προέλευσης Πτολεμαΐδας, 12% κ.β. Μηλαϊκή Γή, 15% κ.β. ασβεστόλιθο και 58% κ.β. τσιμέντο (Σύνθεση 2) καθώς και αμιγές τσιμέντο (OPC). Τα σύνθετα τσιμέντα είχαν ειδική επιφάνεια κατά Blaine αντίστοιχα 4660, 5240 και 2660 cm^2/g .

Τα παραπάνω σύνθετα τσιμέντα υποβλήθηκαν σε δοκιμές απαίτησης σε νερό, χρόνου πήξης όπως περιγράφεται στο ΕΛΟΤ-EN 196-3. Επίσης μετρήθηκε η αντοχή τους σε θλίψη σε ηλικίες 1, 2, 7 και 28 ημερών όπως περιγράφεται στο ΕΛΟΤ-EN 196-1.

Επιπλέον, παρασκευάστηκαν δείγματα παστών τσιμέντου με λόγο νερού προς τσιμέντο 0,5 τα οποία αμέσως μετά την παρασκευή τους τοποθετήθηκαν σε ειδικό δειγματοφορέα και μελετήθηκαν με πυρηνικό μαγνητικό συντονισμό μέχρι την ηλικία των 14 ημερών γιατί μετά από αυτή την ηλικία η εξέλιξη της αντίδρασης της ενυδάτωσης ήταν πολύ αργή για να μπορεί να καταγραφεί. Καθ' όλη τη διάρκεια του πειράματος καταγράφονταν ο ρυθμός αποδιέγερσης T_1 .

3. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

3.1 Απαίτηση σε νερό και χρόνος πήξης

Η απαίτηση σε νερό καθώς και ο χρόνος πήξης είναι ιδιαίτερα σημαντικές παράμετροι καθώς το μεν απαιτούμενο νερό επιδρά στο πορώδες που δημιουργεί η πάστα τσιμέντου και ο δε χρόνος πήξης σχετίζεται με την ανάπτυξη αντοχής.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της απαίτησης σε νερό και του χρόνου πήξης παρουσιάζονται στον Πίνακα 1.

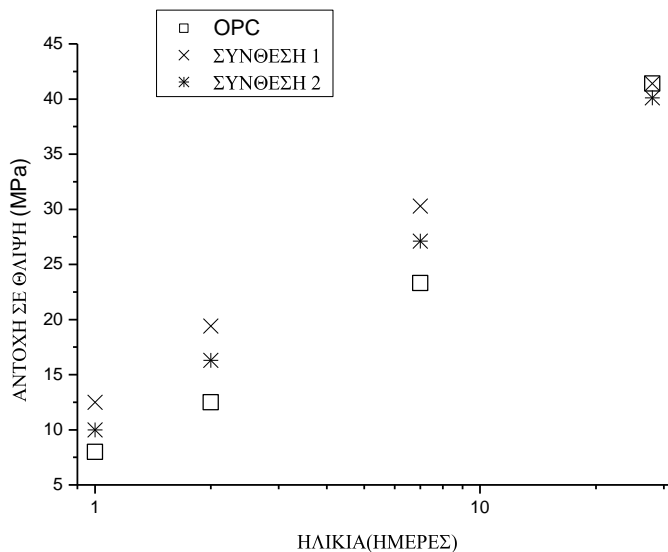
Πίνακας 1: Αποτελέσματα μετρήσεων απαίτησης σε νερό και χρόνου πήξης

	Απαίτηση σε νερό (%)	Αρχή πήξης(min)	Τέλος Πήξης(min)
OPC	24,0	110	160
ΣΥΝΘΕΣΗ 1	29,4	130	190
ΣΥΝΘΕΣΗ 2	31,4	120	140

Από τις παραπάνω τιμές φαίνεται ότι τα σύνθετα τσιμέντα αυξάνουν την απαίτηση σε νερό . Όσον αφορά τον χρόνο πήξης τα σύνθετα τσιμέντα καθυστερούν την αρχή της πήξης. Τέλος, θα πρέπει να σημειωθεί ότι όλες οι τιμές απαίτησης σε νερό και χρόνου πήξης είναι εντός των ορίων που καθορίζονται από το πρότυπο EN 197-1 (για τα τσιμέντα κατηγορίας 32.5 ορίζεται ως κατώτατο όριο για την αρχή της πήξης τα 60 min και για τα τσιμέντα κατηγορίας 42.5 ορίζεται ως κατώτατο όριο για την αρχή της πήξης τα 50 min.)

3.2 Αντοχή σε θλίψη

Ένα από τα βασικότερα για την κατηγοριοποίηση των τσιμεντών είναι η αντοχή σε θλίψη κονιαμάτων με πρότυπη πυριτική άμμο που έχουν παρασκευαστεί από αυτό, και ειδικότερο κριτήριο αποτελεί η αντοχή σε θλίψη στις 28 ημέρες ζωής του κονιάματος. Το Ευρωπαϊκό Πρότυπο EN 197-1 ορίζει τις κατηγορίες αντοχής και το EN 196-1 την μέθοδο προσδιορισμού τους.



Εικόνα 1: Διάγραμμα αντοχής σε θλίψη σύνθετων τσιμεντών

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων αντοχής σε θλίψη παρουσιάζονται στην Εικόνα 1. Είναι εμφανές ότι τα τεταρτομερή σύνθετα τσιμέντα εμφανίζουν ικανοποιητικές αντοχές τόσο πρώιμες όσο και σε μεγαλύτερη ηλικία ανάλογες με αυτές του αμιγούς τσιμέντου.

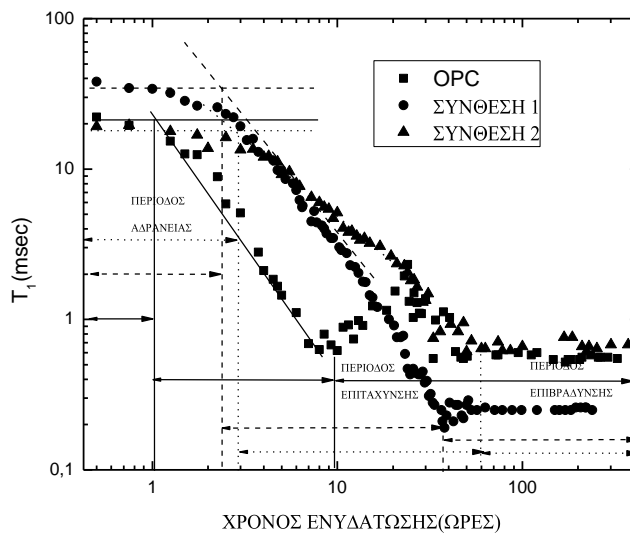
Πρέπει να σημειωθεί ότι τα τεταρτομερή σύνθετα τσιμέντα έχουν υψηλότερο ρυθμό ανάπτυξης αντοχών από το αμιγές, γεγονός που οφείλεται στις υψηλές σχετικά πρώιμες αντοχές. Αντίθετα η αντοχή στις 28 ημέρες είναι περίπου ίδια και για τα τρία τσιμέντα.

Αυτή η συμπεριφορά μπορεί να οφείλεται είτε σε επιτάχυνση της αντίδρασης της ενυδάτωσης είτε στη δράση των προσθέτων στα σύνθετα τσιμέντα ως πληρωτικά υλικά τα οποία βοηθούν στην ανάπτυξη πρώιμης αντοχής. Προκειμένου να εξακριβωθεί ποιά εκδοχή ισχύει στην

πραγματικότητα πρέπει να γίνει μελέτη της κινητικής της ενυδάτωσης κάθε τσιμέντου.

3.3 Μελέτη ενυδάτωσης με Πυρηνικό Μαγνητικό Συντονισμό Πρωτονίου (NMR- ^1H)

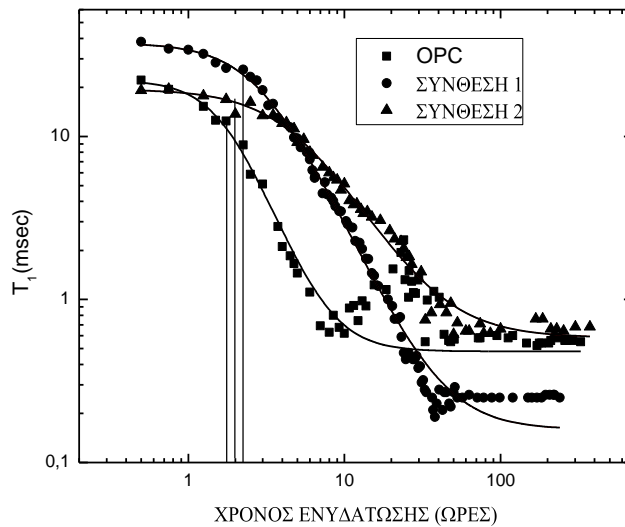
Στην Εικόνα 2 παρουσιάζονται τα διαγράμματα μεταβολής του μέσου χρόνου αποδιέγερσης (T_1) του ^1H με τη πάροδο του χρόνου. Στα διαγράμματα έχουν σημειωθεί οι βασικές περιόδους της αντίδρασης της ενυδάτωσης: η περίοδος αδράνειας, η περίοδος επιτάχυνσης και η περίοδος επιβράδυνσης.



Εικόνα 2: Διαγράμματα μεταβολής του μέσου χρόνου αποδιέγερσης (T_1) του ^1H με τη πάροδο του χρόνου ενυδάτωσης

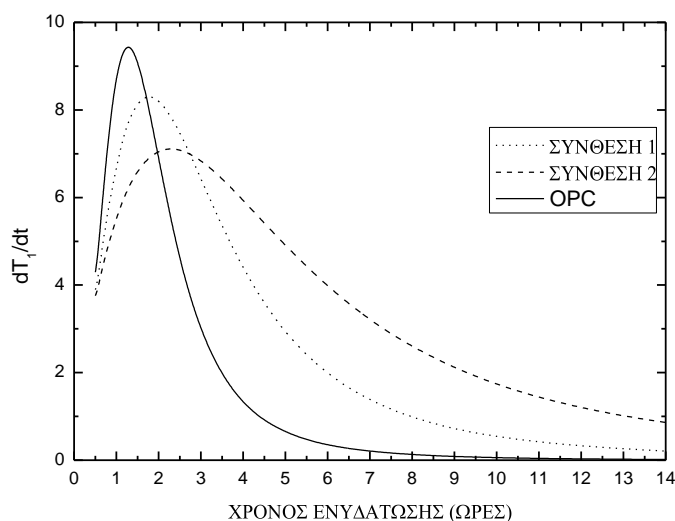
Από τα διαγράμματα αυτά προκύπτει ότι η περίοδος αδράνειας είναι μεγαλύτερη στην περίπτωση των τεταρτομερών σύνθετων τσιμέντων. Αντίστοιχα μεγαλύτερη είναι και η περίοδος επιτάχυνσης. Σημειώνεται δηλαδή καθυστέρηση στην αντίδραση της ενυδάτωσης η οποία προφανώς οφείλεται στο γεγονός ότι το κλίνκερ που ενυδατώνεται είναι λιγότερο στην περίπτωση των τεταρτομερών σύνθετων τσιμέντων. Είναι λοιπόν προφανές ότι τα τεταρτομερή σύνθετα τσιμέντα ενυδατώνονται με αργότερο ρυθμό από ότι τα αμιγή τσιμέντα.

Είναι επίσης δυνατό στις καμπύλες της κινητικής ενυδάτωσης να προσαρμόστουν σιγμοειδείς καμπύλες για να καταγραφεί και ποσοτικά ο ρυθμός της ενυδάτωσης. Το αποτέλεσμα της προσαρμογής παρουσιάζεται στην Εικόνα 3. Στην ίδια εικόνα σημειώνεται και ο χρόνος στον οποίο η αρχική τιμή της σιγμοειδούς καμπύλης έχει ελατωθεί στο μισό της τιμής της. Οι τιμές αυτές που υπολογίζονται από το διάγραμμα συμφωνούν με τις τιμές που υπολογίστηκαν από τη δοκιμή της πήξης.



Εικόνα 3: Προσαρμογή σιγμοειδούς στα διαγράμματα μεταβολής του μέσου χρόνου αποδιέγερσης (T_1) του ^1H με τη πάροδο του χρόνου

Οι καμπύλες προσαρμογής μας δίνουν επίσης την δυνατότητα να υπολογισθεί η παράγωγος των καμπυλών και να παρουσιαστεί ο ρυθμός ενυδάτωσης σαν συνάρτηση του χρόνου. Οι παράγωγοι παρουσιάζονται στην Εικόνα 4 και οι καμπύλες αυτές εξετάζονται μόνο ως προς τη θέση και το εύρος της κορυφής και όχι ως προς το ύψος τους.



Εικόνα 4: Διαγράμματα της πρώτης παραγώγου της μεταβολής του μέσου χρόνου αποδιέγερσης (T_1) του ^1H ως προς τον χρόνο

Παρατηρείται ότι α) Το μέγιστο του ρυθμού ενυδάτωσης μετατοπίζεται με τον χρόνο για τα σύνθετα τσιμέντα και β) Το εύρος του ρυθμού ενυδάτωσης αυξάνει σημαντικά για τα σύνθετα τσιμέντα που σημαίνει ότι η διαδικασία ενυδάτωσης τους διαρκεί για πολλή μεγαλύτερο χρόνο σε σύγκριση με το τσιμέντο αναφοράς.

Από τα παραπάνω είναι εμφανές ότι η αντικατάσταση μέρους του κλίνκερ του τσιμέντου από πρόσθετα υλικά καθυστερεί και επιμηκύνει σημαντικά την περίοδο επιτάχυνσης της ενυδάτωσης του τσιμέντου που χαρακτηρίζεται από την δημιουργία της πλειονότητας των ένυδρων ασβεστοπυριτικών ενώσεων (C-S-H) σε μορφή πηγματος μέσω ομογενούς πυρήνωσης και ανάπτυξης. Η πληροφορία αυτή δεν είναι δυνατόν να εξαχθεί από μακροσκοπικές μετρήσεις αντοχών του τσιμέντου παρά μόνο με τη μελέτη της κινητικής ενυδάτωσης του τσιμέντου με Πυρηνικό Μαγνητικό Συντονισμό Πρωτονίου.

4.ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Από την παραπάνω πειραματική διερεύνηση προκύπτουν τα ακόλουθα συμπεράσματα:

Στα τεταρτομερή σύνθετα τσιμέντων καθυστερεί η αρχή του χρόνου πήξης καθώς και η ολοκλήρωση της περιόδου επιτάχυνσης της ενυδάτωσης του τσιμέντου που χαρακτηρίζεται από την δημιουργία της πλειονότητας των ένυδρων ασβεστοπυριτικών ενώσεων (C-S-H) σε μορφή πήγματος μέσω ομογενούς πυρήνωσης και ανάπτυξης.

Το γεγονός ότι η αντοχή σε θλίψη ήταν αυξημένη στις πρώιμες ηλικίες οφείλεται στο ότι τα πρόσθετα λειτούργησαν ως πληρωτικά υλικά των πόρων και δεν φαίνεται να σχετίζονται με την αντίδραση της ενυδάτωσης όπως προκύπτει από τα συμπεράσματα της μελέτης της κινητικής ενυδάτωσης με πυρηνικό μαγνητικό συντονισμό (NMR).

5.ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα χρηματοδοτείται από το έργο ΠΕΝΕΔ 2003, το οποίο εντάσσεται στο Επιχειρησιακό Πρόγραμμα «Ανταγωνιστικότητα» και συγχρηματοδοτείται κατά 75% από την Ευρωπαϊκή Ένωση – Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο και κατά 25% από το Ελληνικό Δημόσιο–Υ.Π.Α.Ν.–Γ.Γ.Ε.Τ.

Οι συγγραφείς επίσης ευχαριστούν τον κ. Ε. Χανιωτάκη, Διευθυντή Έρευνας και Ποιότητας της Α.Ε. Τσιμέντων TITAN, για την διάθεση πρώτων υλών για την παραγωγή των σύνθετων τσιμέντων και εξοπλισμού για τις δοκιμές απαίτησης σε νερό, πήξης και αντοχής σε θλίψη.

6.ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Brown P.W., Shi D. “Porosity/permeability relationships”, in Materials Science of Concrete II, J.Scalny, S. Mindess (eds), The American Ceramic Society, Westerville, OH,(1991), p. 83-109

FitzGerald S.A., Neumann D.A., Rush J.J., Bentz D.P., Livingston R.A., “In Situ Quasi-elastic Neutron Scattering Study of the Hydration of Tricalcium Silicate”, Chem. Materials, (1998),p.397-402

Gartner E.M and Gaidis J.M., "Hydration Mechanisms I", in J.P Scalny (Ed.), Materials Science of Concrete I, The American Ceramic Society,, OH, (1989), p.95-121

Korringa J., Seevrs D.O., Trrey H.C., Phys.Rev., (1962) 127,p.1143-1150

Milia F., Papavassiliou G., Fardis M., Laganas E.,Chaniotakis E., Fragoulis D., and Meletiou C.(1994), "NMR and MRI Studies in Cementitious Materials", Molecular Physics Reports 6, (1994), p.(7-107)

Papavassiliou G., Fardis M., E.Laganas, Leventis A., Hassanien A., Milia F., Papageorgiou A., Chaniotakis E., and Meletiou C., " Role of the Morphology in Cement Gel Growth Dynamics: A combined NMR and AFM Study", J. Appl. Phys.,(1997), p.449-452

Papavassiliou G., Fardis M., Leventis A., Milia F., Chaniotakis E. Papageorgiou A., "NMR Spectroscopy of cement based materials", edited by P.Colombet, Springer, Verlag (1998)

Zimmerman J.R., Brittin W.E., "Nuclear Magnetic Resonance Studies in Multiple Phase Systems: Lifetime of a Water Molecule in an Adsorbing Phase on Silica Gel", J. Phys. Chem. 61, (1957). p. 1328-1333

