

# Επίδραση της Περιεχόμενης Αργίλου στα Αδρανή στην Θλιπτική Αντοχή του Σκυροδέματος και Τσιμεντοκονιάματος

Δ.Χ.Τσαματσούλης,  
ΧΑΛΥΨ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ Α.Ε , Τμήμα Ποιότητας

Ν. Γ. Παπαγιαννάκος  
Καθηγητής ΕΜΠ, Τμήμα Χημικών Μηχανικών

Α. Παπά  
Τμήμα Χημικών Μηχανικών, ΕΜΠ

*Λέξεις κλειδιά:* Σκυρόδεμα, θλιπτική αντοχή, αδρανή, άργιλος, τσιμέντο

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Στην παρούσα εργασία αναλύονται τα αποτελέσματα της επίδρασης της αργίλου, που ορισμένες φορές περιέχεται στα αδρανή του σκυροδέματος, στην θλιπτική αντοχή τσιμεντοκονιάματος και επακόλουθα του σκυροδέματος. Χρησιμοποιήθηκε, τροποποιημένη εφαρμογή του EN 196-1, όπου αντί για πυριτική άμμο, προστέθηκε ασβεστολιθική ίδια κοκκομετρίας και στη συνέχεια μικρά κλάσματα αργίλου. Για τα δεδομένα αυτά, κάθε 1% άργιλος επί των αδρανών, προκαλεί πτώση της αντοχής κατά 2.7%. Η χρήση ασβεστολιθικής αντί πυριτικής άμμου προκαλεί αύξηση των αντίστοιχων αντοχών αλλά αυξάνει την αβεβαιότητα της μέτρησης. Η τάση αυτή εντείνεται περισσότερο, εάν τα αδρανή περιέχουν επιπλέον και άργιλο με αποτέλεσμα η άργιλος να επιδρά αρνητικά όχι μόνο στην τιμή της αντοχής αλλά και στην ομοιομορφία της.

## 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Ο βασικός στόχος της μελέτης είναι να ποσοτικοποιήσει την επίδραση της αργίλου, η οποία ορισμένες φορές βρίσκεται στα αδρανή, στην θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος ή του τσιμεντοκονιάματος. Για να επιτευχθεί αυτό, αναπτύχθηκε μια δοκιμή παραπλήσια με την προβλεπόμενη από το EN 196-1. Με βάση τα αποτελέσματα αυτών των δοκιμών, μελετήθηκε επίσης η ομοιογένεια των αποτελεσμάτων αντοχής εντός της δοκιμής. Παραπέρα μελετήθηκε η ανάπτυξη αντοχής σε μακρό χρονικό ορίζοντα δύο τύπων τσιμέντου υψηλής αντοχής, χρησιμοποιώντας διάφορους τύπους αδρανών: Πρότυπη κατά EN 196-1 πυριτική άμμο, ασβεστολιθική άμμο, ασβεστολιθική άμμο που περιείχε κλάσμα αργίλου. Στην παρούσα μελέτη θα αναφερθούν τα έως τώρα αποτελέσματα.

## 2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΚΑΙ Α! ΥΛΕΣ

Η πειραματική διαδικασία η οποία ακολουθήθηκε ήταν η παρακάτω:

(i) Επιλέγηκαν δύο τύποι τσιμέντου: CEM II A-L 42.5 R and CEM I 52.5 N

(ii) Εκτελέστηκαν τυπικές δοκιμές κατασκευής, συντήρησης και θραύσης δοκιμίων, σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-1. Δοκίμια συντηρήθηκαν επί μακρό χρονικό διάστημα ώστε να ληφθούν οι θλιπτικές αντοχές σε μακρό χρονικό ορίζοντα.

(iii) Παρασκευάστηκε ένα μεγάλο δείγμα ασβεστολιθικής άμμου, της ίδιας κοκκομετρίας με αυτή που δίνεται από το πρότυπο EN 196-1 όσον αφορά την πυριτική άμμο. Τα μερικά υπολείμματα σε κάθε κόσκινο του παρασκευασθέντος δείγματος δίνονται στον πίνακα 1.

(iv) Κατασκευάστηκαν δοκίμια με την ίδια παρτίδα τσιμέντου, σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-1 αλλά με χρήση ασβεστολιθικής άμμου αντί της πρότυπης πυριτικής. Δημιουργήθηκε σημαντικός αριθμός δοκιμίων, ώστε να μετρηθούν αντοχές επί μακρό χρονικό διάστημα..

(v) Ένα κλάσμα από τα λεπτά της ασβεστολιθικής άμμου διάστασης 150 μ – 75 μ υποκαταστάθηκε με λεπτά αλεσμένη άργιλο διάστασης μικρότερης των 200 μ.

(vi) Επαναλήφθηκε το βήμα (iv), όπου όμως αντί ασβεστολιθικής άμμου, χρησιμοποιήθηκε μίγμα της με μικρά ποσοστά αργίλου και κατασκευάστηκαν όπως προηγούμενα αρκετές σειρές δοκιμίων ώστε να μετρηθούν αντοχές έως και μακρό χρονικό διάστημα.

Πίνακας 1. Κοκκομετρία ασβεστολιθικής άμμου

Διάσταση (mm)	Μερικό Υπόλειμμα, %r
2.00	0
1.60	7
1.00	26
0.50	34
0.15	20
0.075	13

Η χημική ανάλυση της αργίλου δίνεται στον πίνακα 2.

Πίνακας 2. Χημική ανάλυση αργίλου

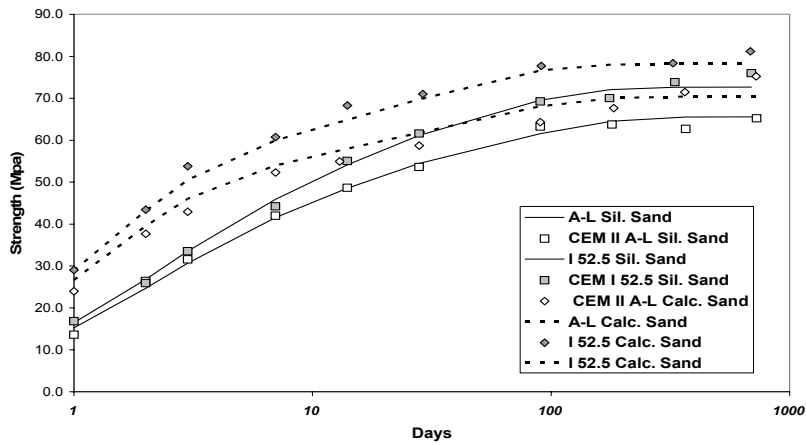
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	LOI
44.48	11.16	5.30	15.85	2.88	0.04	2.04	0.46	16.04

Όσον αφορά τα κονιάματα που δημιουργήθηκαν με το τσιμέντο CEM II A-L 42.5 το ποσοστό της αργίλου που υποκατέστησε τα λεπτά της ασβεστολιθικής άμμου ήταν: 0%, 4%, 8%. Η αντίστοιχη τιμή για τα κονιάματα που δημιουργήθηκαν με τσιμέντο CEM I 52.5 ήταν 0%, 2%, 4%. Το υψηλό ποσοστό αργίλου - 8% - επιλέχθηκε για να ευρεθούν τα όρια της επίδρασης της αργίλου όσον αφορά την εργασιμότητα.

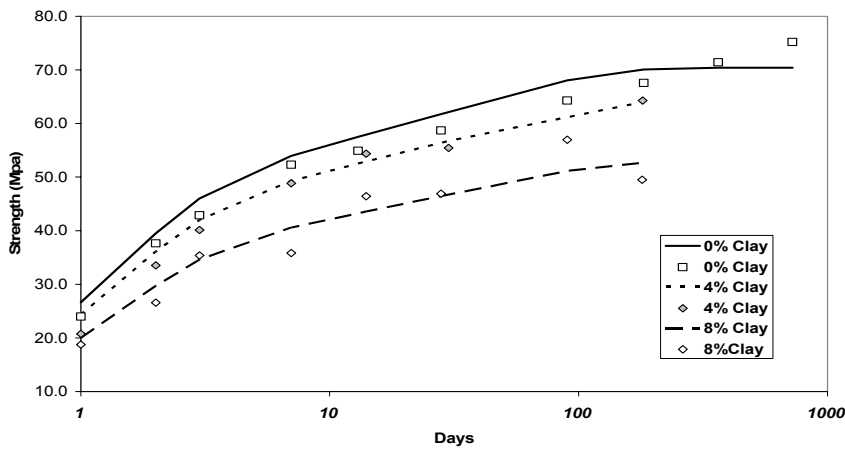
### 3 ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΑΝΑΠΤΥΞΗΣ ΑΝΤΟΧΩΝ

Όπως αναφέρθηκε κατασκευάστηκαν δοκίμια ώστε να μετρηθούν αντοχές επί μακρό χρονικό διάστημα συντήρησης. Τα έως τώρα αποτελέσματα για τα κονιάματα που περιέχουν πυριτική είτε ασβεστολιθική άμμο – χωρίς προσθήκη αργίλου – δίνονται στο σχήμα 1 από το οποίο παρατηρείται ότι για τον ίδιο τύπο τσιμέντου οι αντοχές που λαμβάνονται στην περίπτωση της ασβεστολιθικής άμμου είναι σημαντικά υψηλότερες από αυτές που λαμβάνονται με την πυριτική άμμο. Το γεγονός αυτό πρέπει να αποδοθεί στους παρακάτω λόγους:

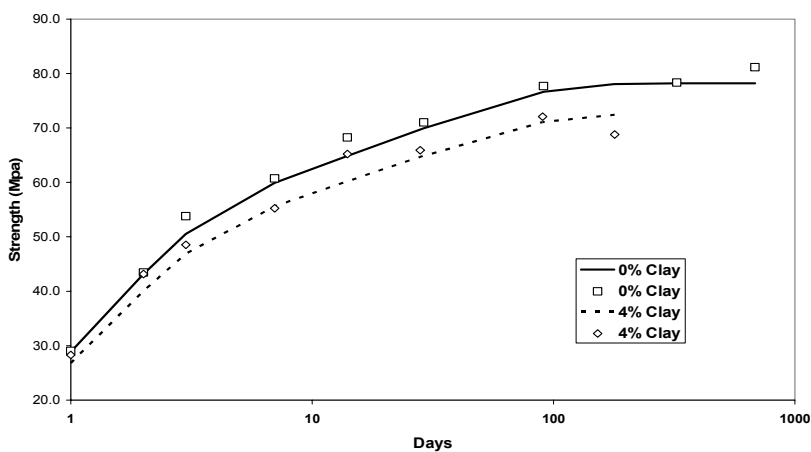
- Το διαφορετικό σχήμα των θραυστών αδρανών σε σχέση με την σφαιρική πυριτική άμμο
- Την υψηλότερη ειδική επιφάνεια της ασβεστολιθικής άμμου
- Τους πιθανά αυξημένους αρχικούς ρυθμούς ενυδάτωσης



Σχήμα 1. Ανάπτυξη αντοχών CEM II A-L 42.5 R, CEM I 52.5 N σε κονιάματα που περιέχουν πυριτική και ασβεστολιθική άμμο.



Σχήμα 2. Ανάπτυξη αντοχών CEM II A-L 42.5 R σε κονιάματα που περιέχουν ασβεστολιθική άμμο και άργιλο

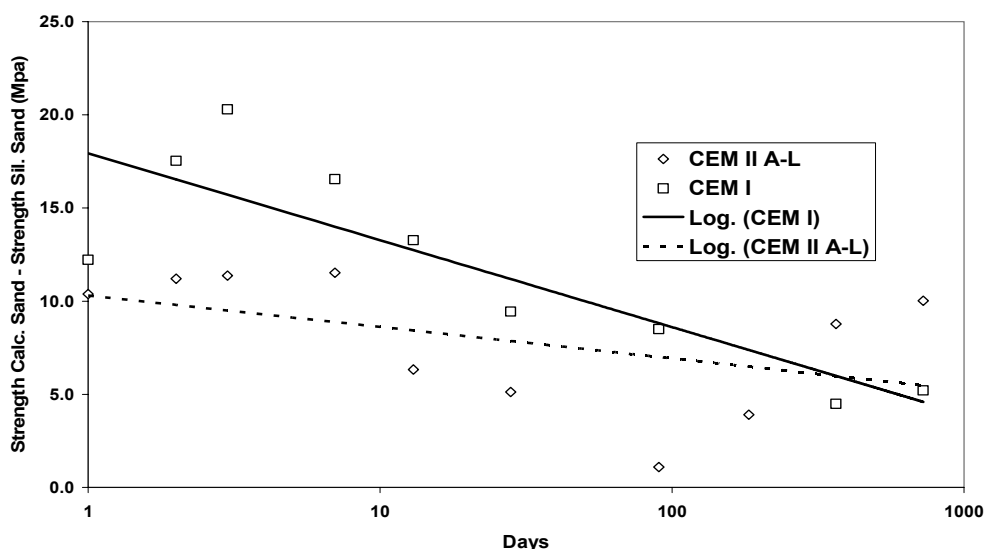


Σχήμα 3. Ανάπτυξη αντοχών CEM I 52.5 N σε κονιάματα που περιέχουν ασβεστολιθική άμμο και άργιλο

Στα σχήματα 1,2,3 δίνονται και οι βέλτιστα υπολογιζόμενες τιμές με βάση το κινητικό μοντέλο που αναπτύχθηκε από τον Τσαματσούλη (2003) και στο οποίο παράλληλα έχει ληφθεί υπόψη η επίδραση της φύσης των αδρανών.

#### 4 ΔΙΑΦΟΡΕΣ ΑΝΤΟΧΩΝ ΜΕΤΑΞΥ ΤΩΝ ΔΙΑΦΟΡΩΝ ΤΥΠΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ

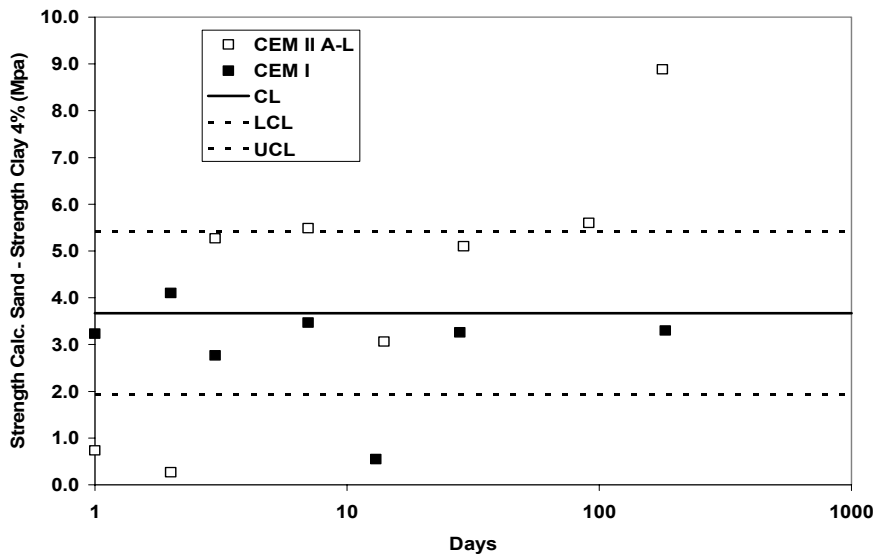
Για τους δύο τύπους τσιμέντου που μελετήθηκαν και για κάθε ηλικία θραύσης υπολογίστηκε η διαφορά αντοχών για χρήση ασβεστολιθικής και πυριτικής άμμου. Τα αποτελέσματα φαίνονται στο σχήμα 4.



Σχήμα 4. Διαφορές αντοχών κονιαμάτων που περιέχουν ασβεστολιθική και πυριτική άμμο

Προφανώς οι διαφορές μεταξύ των δύο τύπων αδρανών είναι σημαντικότερες Όσον αφορά το CEM I, όσο αυξάνει ο χρόνος ωρίμανσης, η διαφορά των αντοχών ελαττώνεται. Στο σύνθετο τσιμέντο η τάση αυτή είναι ασθενής έως ανύπαρκτη. Το φαινόμενο αυτό πρόκειται να διερευνηθεί παραπέρα όταν ληφθούν πλέον μακροχρόνια αποτελέσματα. Εάν οι τελικές αντοχές για τους δύο τύπους αδρανών και το ίδιο τσιμέντο είναι ίδιες, τότε η ασβεστολιθική άμμος δρα μόνο ως επιταχυντής. Σε αντίθετη περίπτωση ο παράγοντας σχήματος και η υψηλότερη ειδική επιφάνεια του θραυσμένου ασβεστόλιθου προκαλούν την υψηλότερη αντοχή, εξαιτίας πιθανά του μεγαλύτερου αριθμού επαφών μεταξύ των κόκκων.

Όπως παρατηρείται από τα σχήματα 2 και 3, η άργιλος δεν δρα μόνο ως επιβραδυντής της ανάπτυξης των αντοχών αλλά μετά από συντήρηση 6 μηνών οι αντοχές των δοκιμών με αδρανή που περιέχουν άργιλο υστερούν σημαντικά από τις αντίστοιχες των ασβεστολιθικών αδρανών. Για να διευκρινιστεί αυτό καλύτερα υπολογίζεται η διαφορά των αντοχών μεταξύ δοκιμών παρασκευασμένων με καθαρό ασβεστόλιθο και αυτών που ο ασβεστόλιθος περιέχει 4% άργιλο. Τα αποτελέσματα δίνονται στο σχήμα 5 για αντοχές έως και 6 μηνών με μορφή χάρτη ελέγχου. Στο σχήμα δίνεται, εκτός των πειραματικών διαφορών, η μέση διαφορά και τα άνω και κάτω όρια ελέγχου με βάση το πρότυπο ISO 8258: 1991. Από το σχήμα προκύπτει μια μέση διαφορά 3.7 Mpa με άνω και κάτω όρια 5.4 Mpa και 1.9 Mpa αντίστοιχα.

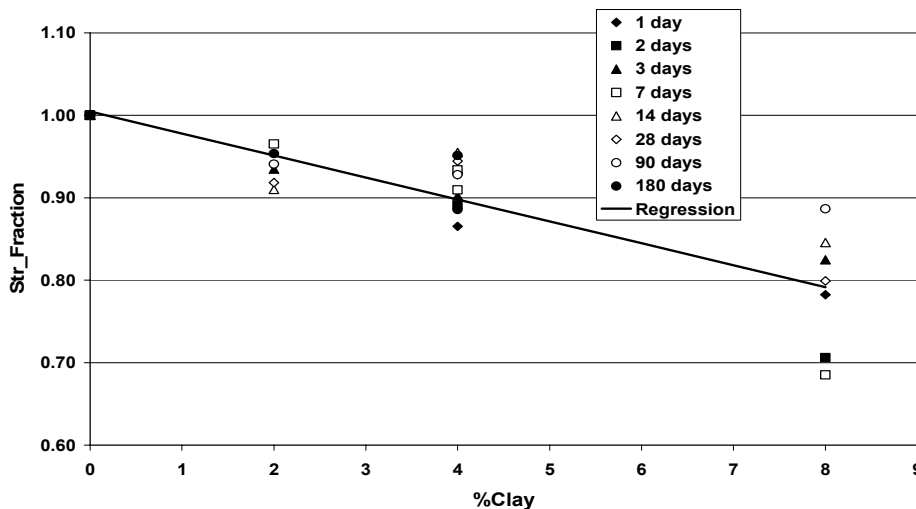


Σχήμα 5. Διαφορές αντοχών κονιαμάτων που περιέχουν καθαρή ασβεστολιθική άμμο και άμμο με 4% άργιλο.

Για να υπολογιστεί το κλάσμα της απομένουσας αντοχής,  $Str\_Fraction(t)$ , όταν τα αδρανή περιέχουν άργιλο, θεωρείται η παρακάτω αδιάστατη μορφή της αντοχής για χρόνο ωρίμανσης  $t$ :

$$Str\_Fraction(t) = \frac{Str(\%Clay, t)}{Str\_Calc\_Sand(t)} \quad (1)$$

Όπου  $Str\_Calc\_Sand(t)$  = η θλιπτική αντοχή δοκιμών που περιέχουν καθαρή ασβεστολιθική άμμο για χρόνο συντήρησης  $t$ ,  $Str(\%Clay, t)$  = η θλιπτική αντοχή δοκιμών που περιέχουν ασβεστολιθική άμμο με %άργιλο = %Clay, για χρόνο συντήρησης  $t$ . Τα αποτελέσματα από 1 έως 180 ημέρες δίνονται στο σχήμα 6.



Σχήμα 6. Κλάσμα αντοχής δοκιμών συναρτήσει του ποσοστού αργίλου στα αδρανή.

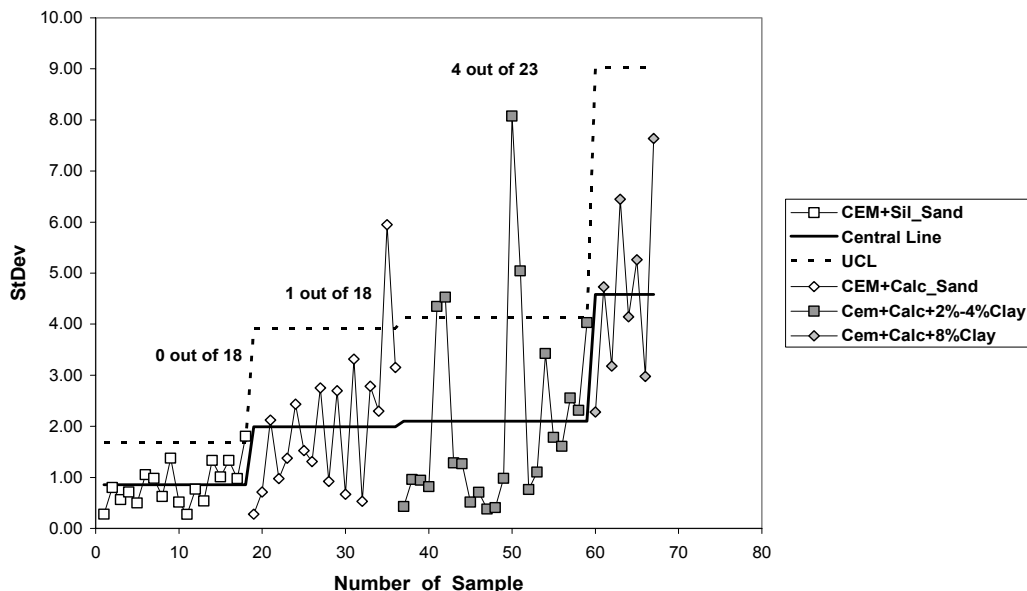
Από τα αποτελέσματα αυτά προκύπτει η σχέση (2):

$$Str\_Fraction(t) = 1.00 - 0.027 * \%Clay \quad (2)$$

Δηλ. κάθε 1% άργιλος στα αδρανή και για σχέση Αδρανή/Τσιμέντο =3, προκαλεί μια πτώση της αντοχής κατά 2.7%.

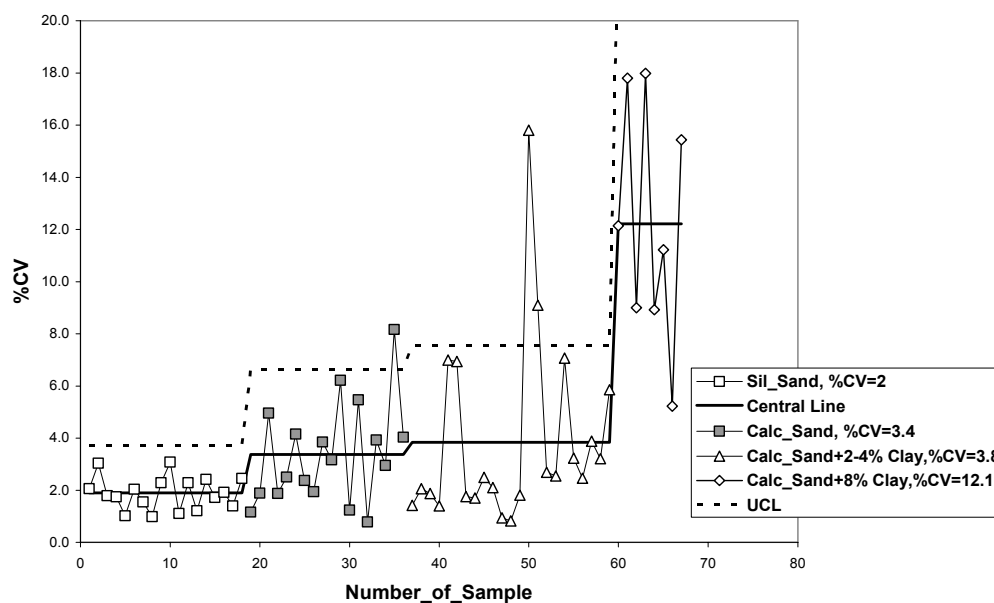
## 5 ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΤΩΝ ΑΔΡΑΝΩΝ ΣΤΗΝ ΤΥΠΙΚΗ ΑΠΟΚΛΙΣΗ ΤΩΝ ΑΝΤΟΧΩΝ

Για να μελετηθεί η επίδραση της ποιότητας των αδρανών – πυριτική άμμος, ασβεστολιθική άμμος, μίγμα ασβεστολιθικής άμμου με άργιλο – στην διασπορά της αντοχής του σκυροδέματος, θεωρήθηκε η τυπική απόκλιση των 6 μεμονωμένων αποτελεσμάτων αντοχής κάθε θραύσης. Αυτή είναι η «εντός της δοκιμής» - within test – τυπική απόκλιση. Όσο υψηλότερη είναι, τόσο υψηλότερη η ανομοιομορφία του κονιάματος και συνεπώς του σκυροδέματος. Οι τυπικές αποκλίσεις ανά εξάδα δίνονται στο σχήμα 7 με τη μορφή Sewhart χάρτη ελέγχου, όπου δίνεται παράλληλα η μέση τυπική απόκλιση και το άνω όριο ελέγχου σύμφωνα με το πρότυπο ISO 8258: 1991.



Σχήμα 7. Επίδραση του τύπου των αδρανών στην τυπική απόκλιση «εντός δοκιμής».

Από το σχήμα 7 παρατηρείται μια σημαντική χειροτέρευση της τυπικής απόκλισης, όταν αντί της πυριτικής χρησιμοποιηθεί ασβεστολιθική άμμος. Όταν η άμμος περιέχει και άργιλο τότε παρατηρείται σημαντικός αριθμός αποκλίσεων εκτός ορίων. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι η ύπαρξη αργίλου στα αδρανή, όχι μόνο μειώνει την αντοχή, αλλά και αυξάνει την ανομοιομορφία της. Για υψηλό ποσοστό αργίλου, το κονίαμα δεν είναι πλέον εργάσιμο, οπότε φυσικά και η απόκλιση που προκύπτει είναι πολύ υψηλή. Επειδή οι αντοχές με χρήση ασβεστολιθικών αδρανών είναι υψηλότερες, για να αδιαστατοποιηθεί η τυπική απόκλιση, υπολογίζεται ο αντίστοιχος συντελεστής μεταβλητότητας, %CV. Τα αποτελέσματα δίνονται στο σχήμα 8. Ενώ στην περίπτωση πυριτικής άμμου ο μέσος %CV είναι 2%, χειροτερεύει σε 3.4% όταν τα αδρανή είναι ασβεστολιθικά και χειροτερεύει ακόμα περισσότερο σε 3.8%, όταν περιέχουν άργιλο. Αποδεικνύεται λοιπόν πιο ισχυρά η προηγούμενη παρατήρηση.



Σχήμα 8. Επίδραση του τύπου των αδρανών στον συντελεστή μεταβλητότητας «εντός δοκιμής».

## 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία μελετάται η επίδραση της αργίλου, όταν αυτή περιέχεται σε αδρανή στην θλιπτική αντοχή τσιμεντοκονιάματος, χρησιμοποιώντας απλές τεχνικές βασισμένες στο πρότυπο EN 196-1. Η βασική ιδέα ήταν η αντικατάσταση της πρότυπης πυριτικής άμμου με ασβεστολιθική της ίδιας κοκκομετρίας και στη συνέχεια η υποκατάσταση των λεπτών της ασβεστολιθικής με λεπτά αλεσμένη άργιλο.

Τα αποτελέσματα αποδεικνύουν ότι κάθε 1% αργίλου επί των αδρανών για αδρανή/τσιμέντο = 3:1 προκαλεί μια πτώση της αντοχής κατά 2.7%. Σύμφωνα με την τροποποιημένη EN 196-1 δοκιμή, το κονίαμα που παρασκευάζεται με ασβεστολιθική άμμο αντί πυριτικής δίνει σημαντικά υψηλότερες αντοχές αλλά ψηλότερη αβεβαιότητα όσον αφορά την αναφερόμενη τιμή της δοκιμής – μέση τιμή αντοχών των 6 πρισμάτων. Το γεγονός αυτό σημαίνει πως η δοκιμή αυτού του τύπου θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για πρόβλεψη της τυπικής αντοχής κονιάματος τσιμέντου που παρασκευάστηκε σύμφωνα με την δοκιμή EN 196-1, πρόβλεψη βασισμένη σε δεδομένα πλέον πρώιμων ηλικιών. Η μεγαλύτερη ωστόσο αβεβαιότητα επιβάλλει μια πλέον λεπτομερή ανάλυση των παραμέτρων που υπεισέρχονται στην τροποποιημένη δοκιμή. Η προσθήκη αργίλου στα αδρανή όχι μόνο επιβραδύνει την ανάπτυξη και τελικά μειώνει δραστικά την αντοχή του σκυροδέματος, αλλά και αυξάνει σημαντικά την αβεβαιότητα στο μετρούμενο αποτέλεσμα.

## 7 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

ISO 8258:1991,1995. Sewhart control charts. *ISO Standards Handbook*. Fourth Edition, 2: 355-383.

Τσαματσούλης Δ.Χ. 2003. Κινητική ανάπτυξης αντοχών τσιμέντου. *14ο Συνέδριο Σκυροδέματος*, Κώς, Τόμος Β: 255-262.