

Τεχνικές μαθηματικές συσχετίσεις θλιπτικών αντοχών σκυροδέματος και τσιμέντου

Κ. Κ. Ευαγόρου

Δρ. Χημικός, Διευθυντής Ποιότητας της Τσιμεντοποιίας ΒΑΣΙΛΙΚΟΥ Κύπρου

Α. Γ. Δημητρίου

Μεταλλειολόγος Μηχανικός, Διευθυντής Εργαστηρίου Σκυροδέματος της Τσιμεντοποιίας ΒΑΣΙΛΙΚΟΥ Κύπρου

Δ.Χ. Τσαματσούλης

Δρ. Χημικός Μηχανικός, Διευθυντής Συστήματος Ποιότητας, ΧΑΛΥΨ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ Α.Ε.

Λέξεις κλειδιά: Τσιμέντο, σκυρόδεμα, τσιμέντο, μοντέλο, αντοχή

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία αναπτύσσεται μαθηματικό πρότυπο συσχέτισης των αντοχών του σκυροδέματος για κάθε ηλικία με τις αντίστοιχες αντοχές του τσιμέντου, τον λόγο N/T και την εργασιμότητα. Χρησιμοποιήθηκαν πέντε διαφορετικοί τύποι τσιμέντου και έγιναν δοκιμές σε περίπου 1000 δείγματα. Τα τυπικά σφάλματα των εξισώσεων που προκύπτουν βρίσκονται στην περιοχή 2-2.5 Μpa. Το μαθηματικό πρότυπο μπορεί να αξιοποιηθεί τόσο για σχεδιασμό σύνθεσης όσο και για καθημερινή χρήση στις μονάδες που χρησιμοποιούν τα συγκεκριμένα τσιμέντα και αδρανή. Αποδεικνύεται ότι κατά τον σχεδιασμό αναμίγματος πρέπει απαραίτητα να λαμβάνεται υπόψη όχι μόνο η κατηγορία αντοχής του τσιμέντου αλλά και ο τύπος του, η σύνθεσή του καθώς και η ποιότητα του κλίνκερ.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Οι ειδικοί στο πεδίο του σκυροδέματος έχουν αναπτύξει ποικιλία μαθηματικών προτύπων τα οποία συνδέουν την θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος με ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του, όπως η ποιότητα και ποσότητα των πρώτων υλών, καθώς και οι συγκεκριμένοι λόγοι των ποσοτήτων αυτών. Ως ιστορικά μπορούν να χαρακτηριστούν τα πρότυπα των Abrams (1924) και Bolomey (1935), τα οποία ποσοτικοποιούν την επίδραση του λόγου N/T και της θλιπτικής αντοχής του τσιμέντου. Αυτά καθώς και άλλα πλέον αναλυτικά πρότυπα των Hwang (2004) και Tango (2000) αποδεικνύονται συνήθως επαρκή για λόγους σχεδιασμού. Ωστόσο σε αρκετές περιπτώσεις εφαρμογών, για συγκεκριμένες πρώτες ύλες, μεθόδους δοκιμής και εργαστήρια ελέγχου, απλουστευμένα γραμμικά μοντέλα αποδεικνύονται ιδιαίτερα εφαρμόσιμα, όταν ο στόχος είναι η καθημερινή πρόβλεψη των αντοχών του σκυροδέματος, με σκοπό την ολοκληρωμένη ρύθμιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος. Ειδικά αυτού του τύπου συσχετίσεις εμφανίζουν υψηλό βαθμό αξιοπιστίας, όταν το εύρος μεταβολής των μεταβλητών εισόδου κυμαίνεται στο σύνηθες εύρος μεταβολής των μονάδων παραγωγής. Τέτοιου τύπου γραμμικές σχέσεις είναι το αντικείμενο αυτής της μελέτης η οποία στηρίχτηκε σε ένα ιδιαίτερα εκτεταμένο αριθμό πειραμάτων σε ένα χρονικό εύρος περίπου τριών ετών. Η θλιπτική αντοχή του σκυροδέματος σε ηλικίες 2,7, και 28 ημερών συσχετίστηκε με την αντοχή του τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκε, τον λόγο N/T και την κάθιση. Διαφορετική εξίσωση παράχθηκε για κάθε τύπο τσιμέντου που μελετήθηκε, εκτός από δύο τύπους σύνθετου τσιμέντου, παρόμοιους όσον αφορά την σύνθεση του τσιμέντου, για τους οποίους παρήχθη η ίδια εξίσωση.

2 ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

2.1 Πρώτες ύλες

Χρησιμοποιήθηκαν πέντε τύποι τσιμέντου. Σε μεγάλο αριθμό δειγμάτων από κάθε τύπο εκτελέστηκαν δοκιμές αντοχής σε κονίαμα σύμφωνα με το πρότυπο EN 196-1 σε ηλικίες 2,7 και 28 ημερών. Με τα ίδια δείγματα παρασκευάστηκαν εργαστηριακά κυβικά δοκίμια σκυροδέματος σε μήτρες πλευράς 15 cm. Η διαδικασία παρασκευής ήταν η ακόλουθη:

- Έλεγχος αδρανών (κοκκομετρία, απορροφητικότητα, ειδικά βάρη)
- Ανάμιξη αδρανών στο μίξερ για 30 sec. Η υγρασία της άμμου κυμαινόταν από 3% έως 10% και των χονδρών αδρανών από 0.5% έως 2.5%
- Πρόσθεση του τσιμέντου και των 2/3 του νερού.
- Μετά από 15 sec πρόσθεση του προσμίκτη και του υπόλοιπου νερού και ανάμιξη για 2 min.
- Δοκιμή εργασιμότητας (κάθιση)
- Καλούπωμα σε τράπεζα δόνησης. Τρία στρώματα σκυροδέματος και συμπίκνωση για 30 sec μετά την πρόσθεση κάθε στρώματος
- Συντήρηση για 24 ώρες στο εργαστήριο σε 20 ± 2 °C και μετά σε νερό σε 20 ± 1 °C

Ακολούθησε θραύση τους στις ίδιες ηλικίες με τα δοκίμια τσιμέντου. Εκτός του τύπου τσιμέντου, παραμέτρους του σχεδιασμού των πειραμάτων αποτελούν επίσης ο λόγος N/T και η κάθιση σε mm. Κατά την παραγωγή των δοκιμών σκυροδέματος χρησιμοποιήθηκε πάντα το ίδιο προσμικτο στην ίδια ποσότητα (0,4%). Στον πίνακα 1 δίνονται οι τύποι τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκαν καθώς και ο αριθμός δειγμάτων ανά τύπο.

Πίνακας 1. Τύποι τσιμέντων και αριθμός δειγμάτων

Τύπος τσιμέντου	Αριθμός δειγμάτων
CEM I 42.5 N	182
CEM I 42.5 R	233
CEM II A-M (S-L) 42.5 R	210
CEM II A-M (S-L) 52.5 N	78
CEM I 52.5 N (SR)	234

Τα αδρανή που χρησιμοποιήθηκαν ήταν τα συνήθη που χρησιμοποιούνται στην Κύπρο. Πριν από την έναρξη των πειραμάτων, επαρκής ποσότητα αδρανών αναμίχθηκε, έγινε έλεγχος της ποιότητάς τους (απορροφητικότητα, ειδικά βάρη, κοκκομετρήσεις) και επιβεβαιώθηκε ότι αυτά είναι αντιπροσωπευτικά των αδρανών που χρησιμοποιούνται στην Κύπρο. Το νερό που υφιστάται στον υπολογισμό του N/T είναι το ελεύθερο νερό το οποίο δεν έχει απορροφηθεί από τα αδρανή.

2.2 Περιοχή μεταβολής των μεταβλητών

Λόγω του μεγάλου αριθμού των πειραματικών σημείων επιτεύχθηκε μια αρκετά πλατιά περιοχή των μεταβλητών εισόδου και εξόδου, ευρισκόμενη όμως πάντα στο εύρος μεταβολής των βιομηχανικών προϊόντων.

Ένα από τα πλεονεκτήματα της εργαστηριακής παρασκευής δοκιμών σκυροδέματος είναι αναμφίβολα οι ελεγχόμενες συνθήκες ανάμιξης και δειγματοληψίας. Στον πίνακα 2 δίνονται οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις των αντοχών δοκιμών τσιμέντου και σκυροδέματος για όλους τους τύπους τσιμέντου που μελετήθηκαν. Όλα τα δείγματα τσιμέντου ήταν στιγμιαία δείγματα που λήφθηκαν στο εργοστάσιο τσιμέντου στο Βασιλικό, για μια εκτεταμένη χρονική περίοδο περίπου τριών ετών. Στον πίνακα 3 δίνονται οι μέσες, μέγιστες και ελάχιστες τιμές των

λόγων N/T και της κάθισης. Δίνονται επίσης οι μέσες τιμές και οι τυπικές αποκλίσεις των ποσοτήτων τσιμέντου που χρησιμοποιήθηκαν.

Πίνακας 2. Αντοχές δοκιμών τσιμέντου και σκυροδέματος (Μρα)

	Μέση τιμή	Τυπ. Απόκλιση	Μέση τιμή	Τυπ. Απόκλιση
	Αντοχή 2 ημερών τσιμέντου		Αντοχή 2 ημερών σκυροδέματος	
CEM I 42.5 N	29.4	2.5	14.9	1.8
CEM I 42.5 R	31.5	2.5	15.0	1.8
CEM II A-M (S-L) 42.5 R	30.4	3.0	15.0	1.9
CEM II A-M (S-L) 52.5 N	35.9	2.1	17.4	2.1
CEM I 52.5 N (SR)	29.8	3.2	16.4	2.4
	Αντοχή 7 ημερών τσιμέντου		Αντοχή 7 ημερών σκυροδέματος	
CEM I 42.5 N	42.7	2.6	25.4	2.5
CEM I 42.5 R	45.0	2.4	25.3	2.4
CEM II A-M (S-L) 42.5 R	43.9	2.8	24.2	2.6
CEM II A-M (S-L) 52.5 N	49.7	2.0	27.4	2.7
CEM I 52.5 N (SR)	46.1	3.2	29.7	3.0
	Αντοχή 28 ημερών τσιμέντου		Αντοχή 28 ημερών σκυροδέματος	
CEM I 42.5 N	52.9	2.9	34.7	2.7
CEM I 42.5 R	54.9	2.5	34.2	2.5
CEM II A-M (S-L) 42.5 R	53.5	2.8	32.9	3.3
CEM II A-M (S-L) 52.5 N	59.7	2.5	37.1	3.1
CEM I 52.5 N (SR)	61.9	3.0	40.1	2.9

Πίνακας 3. Ιδιότητες δοκιμών σκυροδέματος

	Μέση τιμή	Ελάχιστη	Μέγιστη
		Λόγος N/T	
CEM I 42.5 N	0.65	0.60	0.71
CEM I 42.5 R	0.65	0.60	0.71
CEM II A-M (S-L) 42.5 R	0.65	0.60	0.71
CEM II A-M (S-L) 52.5 N	0.65	0.60	0.73
CEM I 52.5 N (SR)	0.63	0.59	0.72
	Κάθιση (mm)		
CEM I 42.5 N	97	50	120
CEM I 42.5 R	95	65	120
CEM II A-M (S-L) 42.5 R	95	50	120
CEM II A-M (S-L) 52.5 N	92	50	120
CEM I 52.5 N (SR)	90	50	110
	Ποσότητα τσιμέντου (kg)		
	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	
CEM I 42.5 N	318	2	
CEM I 42.5 R	318	2	
CEM II A-M (S-L) 42.5 R	319	3	
CEM II A-M (S-L) 52.5 N	319	3	
CEM I 52.5 N (SR)	320	2	

Από τον πίνακα 2 παρατηρείται πως με βάση τον σχεδιασμό που ακολουθήθηκε, οι αντοχές του τσιμέντου και του σκυροδέματος ενώ συνεχώς βρίσκονται εντός των ορίων βιομηχανικών προϊόντων, κυμαίνονται σε μια αρκετά ευρεία περιοχή, ώστε να είναι δυνατή η εξαγωγή συσχετίσεων. Όπως προκύπτει από τον πίνακα 3, ενώ η ποσότητα τσιμέντου διατηρήθηκε σταθερή στην περιοχή των 320 Kg, ο λόγος N/T εμφανίζει το απαιτούμενο εύρος ώστε να είναι δυνατός ο συσχετισμός τους με την διακύμανση της αντοχής του σκυροδέματος. Η κάθιση παραμένει πάντα στην περιοχή S₂-S₃ αλλά η μεγάλη πλειοψηφία των εργαστηριακών αναμιγμάτων, το 90%, εμφάνιζε κάθιση 80-100 mm.

3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΙΑ ΣΥΣΧΕΤΙΣΗΣ

3.1 Συσχέτιση αντοχών σκυροδέματος με αντοχές τσιμέντου, λόγο N/T και εργασιμότητα

Οι αντοχές του σκυροδέματος σε όλες τις ηλικίες – str_concr – συσχετίστηκαν με τις αντοχές του τσιμέντου στις ίδιες ηλικίες – str_cem , τον λόγο $N/T - W/C$ - και την κάθιση - SI . Ο λόγος που λήφθηκαν υπ' όψη τόσο ο λόγος N/T όσο και η εργασιμότητα, οι οποίες δεν είναι κατ' αρχήν ανεξάρτητες μεταβλητές, είναι ότι η εργασιμότητα, πέραν του λόγου N/T , αναμένεται να εξαρτάται και από την σύνθεση και την λεπτότητα του τσιμέντου. Ο τύπος της συσχέτισης που ακολουθήθηκε είναι εν γένει πολυωνμικός της μορφής που δίνεται από την εξίσωση (1). Παραπλήσιο αλλά ποιο απλουστευμένο γραμμικό πρότυπο έχει αναπτυχθεί από τον Τσαματσούλη (2003).

$$str_concr = A_0 + A_1 \cdot str_cem + A_2 \cdot \frac{W}{C} + A_3 \cdot SI + A_4 \cdot str_cem^2 \quad (1)$$

Οι συντελεστές A_0, A_1, A_2, A_3, A_4 υπολογίζονται με πολλαπλή γραμμική παλινδρόμηση. Η παλινδρόμηση εκτελείται για κάθε τύπο τσιμέντου ξεχωριστά, όπου υπολογίζονται παράλληλα ο συντελεστής συσχέτισης, R , και το τυπικό σφάλμα της εξίσωσης, std_err . Παράλληλα γίνεται έλεγχος για αποτελέσματα εκτός ορίων – outliers. Ως τέτοια μπορούν να θεωρηθούν εκείνα για τα οποία ισχύει:

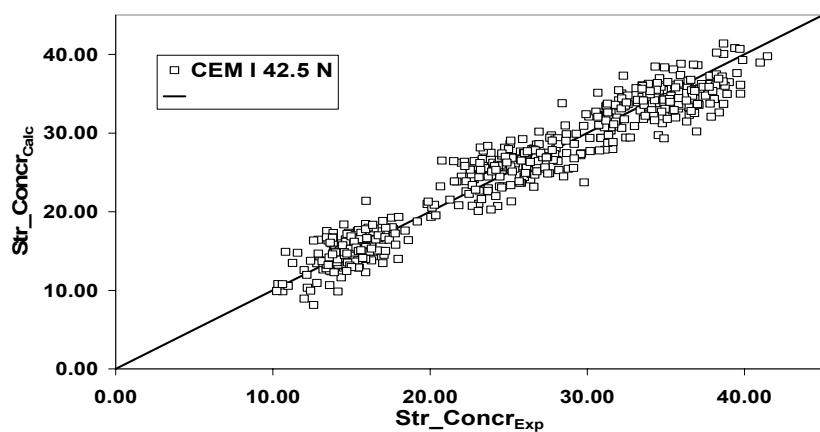
$$\left| str_concr_{calc} - str_concr_{exp} \right| \geq 3 \cdot std_err \quad (2)$$

Όπου str_concr_{calc} = υπολογιζόμενη από το μοντέλο αντοχή, str_concr_{exp} = πειραματική αντοχή. Στην περίπτωση αυτή οι δύο τιμές διαφέρουν σημαντικά με πιθανότητα >99%. Μετά τον αρχικό υπολογισμό των συντελεστών κάθε προτύπου ακολουθεί έλεγχος σημαντικότητας τους με εφαρμογή του t-test όπως περιγράφεται από τον Vining (2006). Σε περίπτωση που κάποιος συντελεστής δεν είναι στατιστικά σημαντικός, τότε τίθεται ίσος με μηδέν και η παλινδρόμηση επαναλαμβάνεται έως ότου όλοι οι συντελεστές να είναι σημαντικοί σε επίπεδο εμπιστοσύνης 95% με χρήση δίπλευρου test Student. Τα αποτελέσματα των συσχετίσεων που δίνονται από την εξίσωση (1) ανά τύπο τσιμέντου δίνονται στον πίνακα 4.

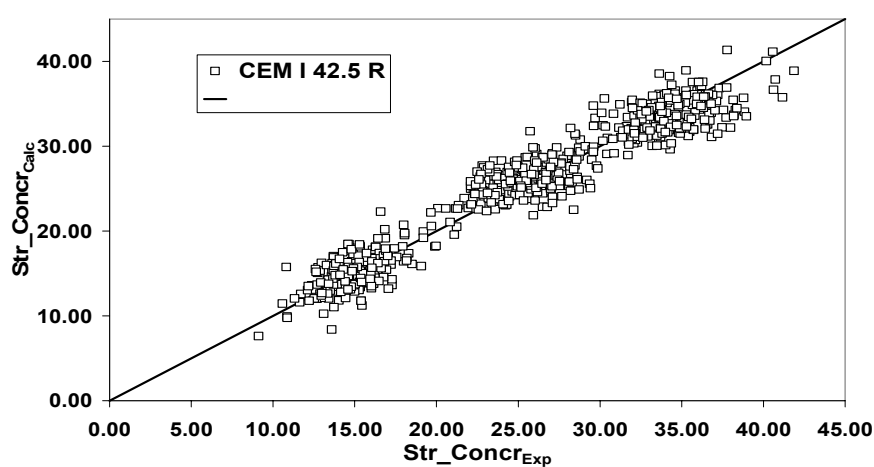
Πίνακας 4. Συντελεστές του μαθηματικού προτύπου της εξίσωσης (1)

	CEM I 42.5 N	CEM I 42.5 R	CEM II AM (S-L) 42.5 R, 52.5 N	CEM I 52.5 N (SR)
A_0	10.3	16.9	20.3	6.64
A_1	0.811	0.795	0.741	1.065
A_2	-20.0	-35.7	-38.9	-28.9
A_3	$-6.47 \cdot 10^{-2}$	$-3.93 \cdot 10^{-2}$	$-2.87 \cdot 10^{-2}$	0.0
A_4	0.0	0.0	0.0	$-3.74 \cdot 10^{-3}$
R	0.985	0.984	0.964	0.984
Std err	2.07	2.04	2.02	2.45

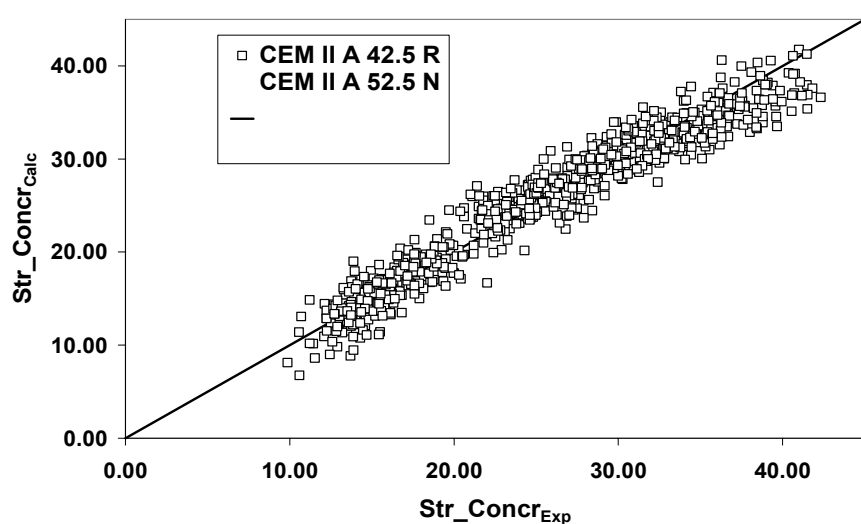
Τα τυπικά σφάλματα των εξισώσεων βρίσκονται στην περιοχή 2-2.5 Μρα και οι συντελεστές συσχέτισης είναι επαρκείς. Οποσδήποτε στον συντελεστή του N/T υπάρχει κάποια αβεβαιότητα διότι έχουν ληφθεί υπόψη όλες οι αντοχές 2,7,28 ημερών. Ο λόγος N/T δείχνει να είναι πιο σημαντικός για πιο λεπτά τσιμέντα.. Δηλ. ο συντελεστής του N/T είναι μεγαλύτερος κατ' απόλυτη τιμή στην περίπτωση του I 42.5 R από αυτόν του I 42.5 N Υπονοείται ότι για ίδιο τύπο τσιμέντου τα τσιμέντα R και 52.5 είναι λεπτότερα από τα 42.5 N. Στα σχήματα 1 έως 4 δίνονται οι πειραματικές και υπολογιζόμενες από το μοντέλο τιμές – parity plot – για όλα τα τσιμέντα που μελετήθηκαν. Παρατηρείται ικανοποιητικότερη προσαρμογή των σημείων.



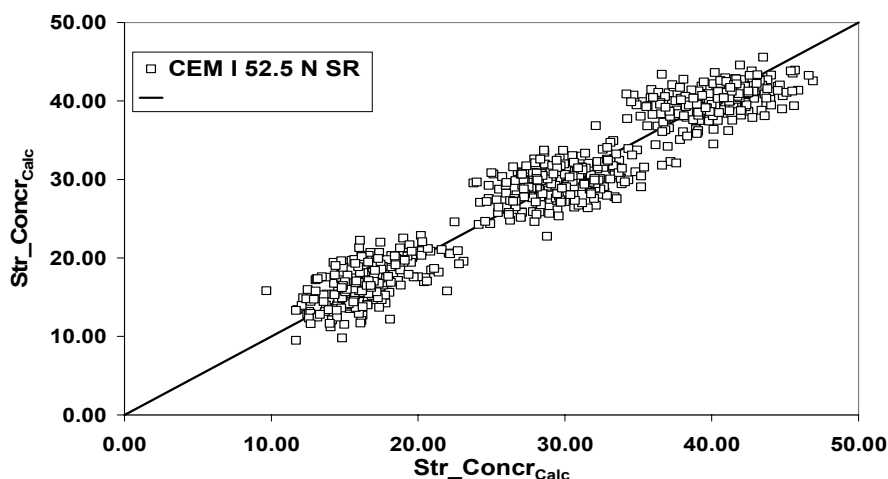
Σχήμα 1. Πειραματικές και υπολογιζόμενες τιμές για το CEM I 42.5 N



Σχήμα 2. Πειραματικές και υπολογιζόμενες τιμές για το CEM I 42.5 R



Σχήμα 3. Πειραματικές και υπολογιζόμενες τιμές για το CEM II AM (S-L) 42.5 R, CEM II AM (S-L) 52.5 N



Σχήμα 4. Πειραματικές και υπολογιζόμενες τιμές για το CEM I 52.5 (SR)

3.2 Σύγκριση ταυτότητας των εξισώσεων

Όπως παρατηρείται από τον πίνακα 4 οι συντελεστές των εξισώσεων που περιγράφουν το μαθηματικό πρότυπο ανά τύπο τσιμέντου είναι αρκετά διαφορετικοί μεταξύ τους. Έτσι η επίδραση της αντοχής του τσιμέντου και του λόγου N/T είναι διαφορετική στην αντοχή του σκυροδέματος ανάλογα με τον τύπο τσιμέντου. Για τον λόγο αυτό θα εξεταστεί εάν οι πέντε διαφορετικές εξισώσεις διακρίνονται στατιστικά μεταξύ τους ανά δύο ή εάν υπάρχει μια κοινή εξίσωση που μπορεί να περιγράψει την συμπεριφορά δύο τύπων τσιμέντου. Στην πρώτη περίπτωση τα δύο τσιμέντα αναμένεται με σημαντικό βαθμό αξιοπιστίας να εμφανίζουν ίδια συμπεριφορά στο σκυρόδεμα, ενώ στην δεύτερη δεν αρκεί η ίδια αντοχή τσιμέντου και ίδιος λόγος N/T για να επιτευχθεί συγκεκριμένος στόχος αντοχής σκυροδέματος. Ο έλεγχος εκτελείται με την βοήθεια του F-test όπως περιγράφεται από τον Τζιαφέτα (1980). Η ανάλυση περιλαμβάνει τα παρακάτω βήματα:

(α) Για δύο τσιμέντα (1) και (2) θεωρείται η μηδενική υπόθεση H_0 : Οι δύο εξισώσεις δεν είναι σημαντικά διαφορετικές έως και επίπεδο εμπιστοσύνης 99%.

(β) Υπολογίζεται το σφάλμα Q_1 που δίνεται από τη σχέση:

$$Q_1 = \sum_{i=1}^{N_1} (str_concr_calc(i) - str_concr_exp(i))^2 + \sum_{i=1}^{N_2} (str_concr_calc(i) - str_concr_exp(i))^2 \quad (3)$$

Όπου N_1, N_2 = αριθμός πειραματικών σημείων αντοχών για τα τσιμέντα 1 και 2 αντίστοιχα

(γ) Με παλινδρόμηση υπολογίζεται το βέλτιστο μοντέλο που προσαρμόζει τα πειραματικά σημεία των 1 και 2.

(δ) Υπολογίζεται το σφάλμα μεταξύ των υπολογιζόμενων τιμών από το μοντέλο του οποίου οι συντελεστές εκτιμήθηκαν στο βήμα (γ) και των πειραματικών, Q_0 , από την εξίσωση (4):

$$Q_0 = \sum_{i=1}^{N_1+N_2} (str_concr_calc(i) - str_concr_exp(i))^2 \quad (4)$$

(ε) Υπολογίζεται η διαφορά $Q_2 = Q_0 - Q_1$.

(στ) Εάν r_1, r_2 οι βαθμοί ελευθερίας των προτύπων που περιγράφουν τα τσιμέντα 1,2 θεωρείται $r = \max(r_1, r_2)$.

(ζ) Υπολογίζεται η στατιστική F που δίνεται από τη σχέση (5):

$$F = \frac{Q_2}{r} \cdot \frac{(N1 + N2 - 2 \cdot r)}{Q_1} \quad (5)$$

(η) Από πίνακες στατιστικής υπολογίζεται η τιμή του F-test, $F_{Tab} = F(0.01, r, N1+N2-2r)$ για 99% επίπεδο εμπιστοσύνης.

(θ) Εάν $F > F_{Tab}$, τότε η μηδενική υπόθεση απορρίπτεται και οι δύο εξισώσεις είναι σημαντικά διαφορετικές. Διαφορετικά η εξίσωση που υπολογίστηκε στο βήμα (γ) περιγράφει επαρκώς και τα δύο τσιμέντα.

Τα αποτελέσματα της στατιστικής ανάλυσης δίνονται στον πίνακα 5. Στο άνω τριγωνικό μέρος του πίνακα εμφανίζονται οι τιμές F, ενώ στο κάτω τριγωνικό μέρος οι τιμές F_{Tab} . Η σύγκριση γίνεται σε ίδιες αποστάσεις από την διαγώνιο.

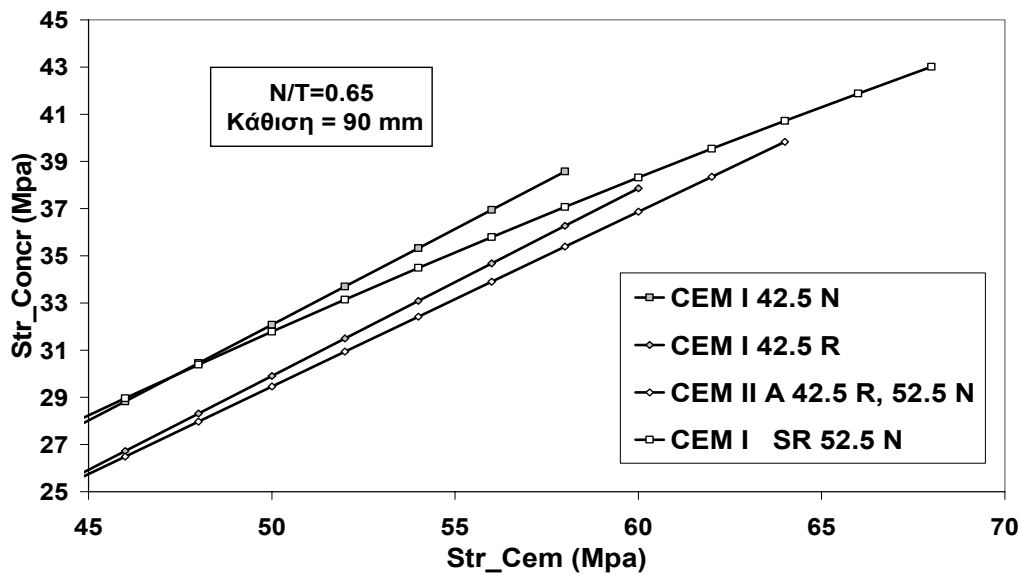
Πίνακας 5. Σύγκριση ταυτότητας εξισώσεων με χρήση F-test

	CEM I 42.5 N	CEM I 42.5 R	CEM II AM (S-L) 42.5 R, 52.5 N	CEM I 52.5 N (SR)
CEM I 42.5 N		63.1	80.4	21.0
CEM I 42.5 R	3.33		17.8	59.5
CEM II A-M (S-L) 42.5 N	3.03	3.03		87.1
CEM I 52.5 N SR	3.03	3.03	3.03	

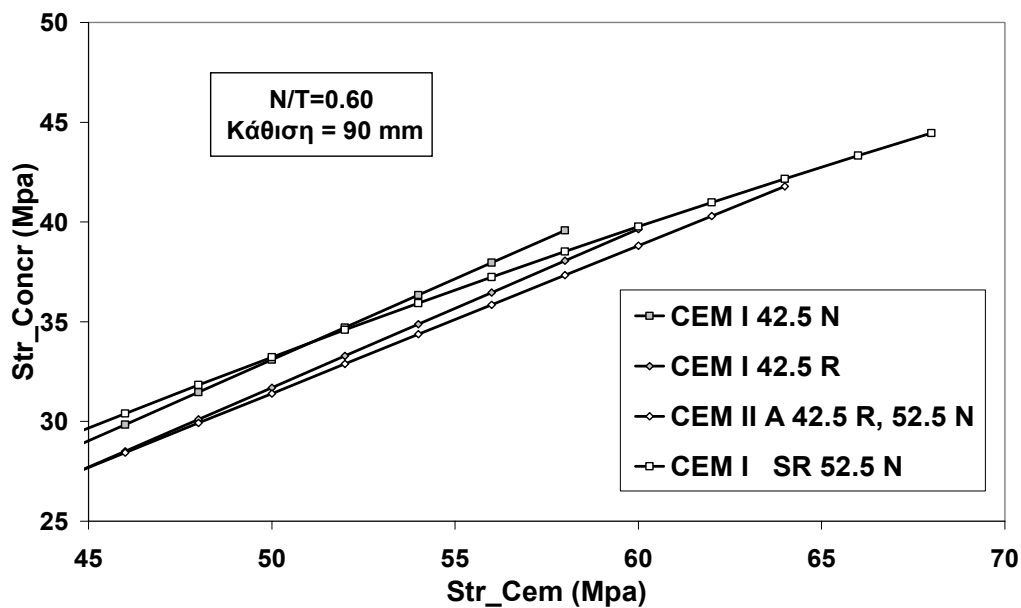
Από τα αποτελέσματα του πίνακα 5 προκύπτει πως όλες οι εξισώσεις είναι σημαντικά διαφορετικές μεταξύ τους. Για την συγκεκριμένη λοιπόν επιχείρηση αλλά και για όλες τις μονάδες σκυροδέματος που χρησιμοποιούν στις συνθέσεις τους τα τσιμέντα που μελετήθηκαν οι εξισώσεις που προκύπτουν από το μαθηματικό πρότυπο που περιγράφηκε, αποτελούν χρησιμότητα εργαλεία σχεδιασμού και καθημερινού ποιοτικού ελέγχου.

Στο σχήμα 5 δίνονται οι αντοχές σκυροδέματος για $N/T = 0.65$, κάθιση 90 mm και αντοχές τσιμέντου 45-68 Mpa, από όπου παρατηρείται ότι πράγματι μεταξύ τσιμέντων της ίδιας κατηγορίας αντοχής οι διαφορές στην αντοχή σκυροδέματος για ίδια αντοχή τσιμέντου, δεν είναι καθόλου αμελητέες. Από το σχήμα παρατηρείται ότι όσον αφορά τα CEM I, για ίδια αντοχή τσιμέντου 53 Mpa, το σκυρόδεμα που κατασκευάζεται με τσιμέντο N δίνει 2.2 Mpa μεγαλύτερη αντοχή από αυτό που κατασκευάζεται με τσιμέντο R. Για να καλυφθεί αυτή η διαφορά θα πρέπει το τσιμέντο R, το οποίο είναι πιο λεπτό από το τσιμέντο N, να διαθέτει 2.5 Mpa περισσότερα από το τσιμέντο N. Βέβαια όπως παρατηρούμε από τον πίνακα 1, πράγματι το τσιμέντο R είναι κατά 2 Mpa ανώτερο όσον αφορά την μέση τιμή. Αντίστοιχες διαφορές παρατηρούνται μεταξύ των τσιμέντων 52.5.

Στο σχήμα 6 δίνονται τα ίδια αποτελέσματα για λόγο $N/T=0.60$ και τις άλλες παραμέτρους ίδιες. Ενώ από το σχήμα 5 φαίνεται πως συνεχώς οι αντοχές του σκυροδέματος που παρασκευάστηκε με CEM II AM(L-S) 42.5R, 52.5N είναι μονίμως χαμηλότερες από αυτές του σκυροδέματος που παρασκευάστηκε με CEM I 52.5 (SR), για λόγο $N/T=0.60$ – σχήμα 6 – οι αντοχές των 28 ημερών προσεγγίζουν. Προκύπτει επομένως πως στη συσχέτιση αντοχών τσιμέντου σκυροδέματος επιδρά σημαντικά, τόσο η λεπτότητα του τσιμέντου, όσο και η σύνθεση του τσιμέντου και η λεπτότητα του κλίνκερ.



Σχήμα 5. Συσχέτιση αντοχών τσιμέντου σκυροδέματος για σταθερό N/T=0.65 και κάθιση 90 mm



Σχήμα 6. Συσχέτιση αντοχών τσιμέντου σκυροδέματος για σταθερό N/T=0.60 και κάθιση 90 mm

4 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Πειραματικά δεδομένα τσιμέντου και σκυροδέματος τα οποία λήφθηκαν σε ένα χρονικό ορίζοντα τριών ετών συσχετίστηκαν μεταξύ τους. Χρησιμοποιήθηκε μια μεγάλη ποικιλία τσιμέντων υψηλής αντοχής στα οποία μεταβλητές ήταν η σύνθεση, η λεπτότητα και η ποιότητα του κλίνκερ. Με βάση το προτεινόμενο μαθηματικό πρότυπο συσχετισμού των αντοχών του σκυροδέματος σε κάθε ηλικία με τις αντίστοιχες αντοχές του τσιμέντου, τον λόγο N/T και την εργασιμότητα προκύπτει ότι:

- Οι εξισώσεις που περιγράφουν το πρότυπο είναι ιδιαίτερα επαρκείς εφόσον το τυπικό σφάλμα στις τρεις από τις τέσσερις περιπτώσεις είναι στην περιοχή των 2 Μρα, ενώ στην περίπτωση του τσιμέντου υπερυψηλής αντοχής CEM I 52.5 (SR) είναι μικρότερο των 2.5 Μρα
- Εκτός της περίπτωσης των τσιμέντων CEM II, μια κοινή εξίσωση δεν μπορεί να εφαρμοστεί σε κανένα συνδυασμό δύο τσιμέντων, ακόμα και αν είναι της ίδιας κατηγορίας αντοχής και έχουν παραχθεί από την ίδια μονάδα παραγωγής – πιθανά και από τον ίδιο μύλο, εφόσον τα τσιμέντα αυτά διαφέρουν στον τύπο.
- Δεν επαρκεί για ένα εργοστάσιο σκυροδέματος να κάνει σχεδιασμό αναμίγματος απλώς και μόνο με την κατηγορία αντοχής τσιμέντου, αλλά επιβάλλεται να λαμβάνεται υπόψη και ο τύπος του. Πολύ περισσότερο εάν χρησιμοποιηθεί τσιμέντο άλλης εταιρείας παραγωγής και εάν ακόμα είναι του ίδιου τύπου και μέσης αντοχής, αυτό δεν σημαίνει καθόλου πως η ποιότητα του κλίνκερ είναι ίδια καθώς και η λεπτότητα του τσιμέντου.
- Για όλες τις μονάδες σκυροδέματος που χρησιμοποιούν στις συνθέσεις τους τα τσιμέντα που μελετήθηκαν οι εξισώσεις που προκύπτουν από το μαθηματικό πρότυπο που περιγράφηκε, αποτελούν χρησιμότερα εργαλεία σχεδιασμού της σύνθεσης και καθημερινού ποιοτικού ελέγχου. Παρόμοια χρησιμότερα εργαλεία μπορούν να χρησιμοποιηθούν από κάθε εταιρεία σκυροδέματος, αρκεί να συσχετιστούν τα δεδομένα της παραγωγής τσιμέντου με τα αντίστοιχα της παραγωγής σκυροδέματος
- Μια παραπέρα διερεύνηση μπορεί να οδηγήσει στην συσχέτιση των τυπικών αντοχών 28 ημερών με τις πρώιμες αντοχές και τα αντίστοιχα χαρακτηριστικά του σκυροδέματος – N/T εργασιμότητα. Η διερεύνηση αυτή μπορεί να οδηγήσει στην χρήση χαρτών ελέγχου, όπου οι αποκλίσεις από τα όρια ελέγχου των υπολογιζόμενων ή και των πειραματικών τιμών θα οδηγεί σε ενέργειες διορθωτικές ή και βελτίωσης.

5 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- Abrams, D.A. 1924. *Design of concrete mixtures*, Chicago: Structural Materials Research Laboratory.
- Bolomey, J. 1935. Granulation et prévision de la résistance probable des bétons, *Travaux*, Vol. 19, 30 : 228-232
- Hwang, K, Nogushi, T., Tomosawa, F. 2004. Prediction model of compressive strength development of fly-ash concrete, *Cement and Concrete research*, 34:2269-2276
- Tango, C.E.S. 2000. Time-generalisation of Abrams' model for high performance concrete and practical application examples, *Proceedings of the International Symposium on High Performance Concrete*, Hong Kong, Hong Kong University of Science and Technology.
- Τζιαφέτας, Γ.Ν. 1980. *Εισαγωγικά μαθήματα στατιστικής ανάλυσεως. II Επαγωγική στατιστική*, Αθήνα: Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο.
- Τσαματσούλης, Δ.Χ. 2003. Συσχέτιση αντοχών σκυροδέματος και τσιμέντου και ανάλυση αβεβαιότητας, *14^ο Συνέδριο Σκυροδέματος*, Κως, Τόμος Β! :250-254
- Vining, G., Kowalski, S. 2006. *Statistical methods for engineers*, Belmont: Thomson Higher Education.