

ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΧΑΡΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ ΚΑΙ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΑΝΤΟΧΩΝ ΤΣΙΜΕΝΤΟΥ: ΈΝΑ ΙΣΧΥΡΟ ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ ΤΗΣ ΠΟΙΟΤΗΤΑΣ

Δ.Χ.Τσαματσούλης

Δρ. Χημικός Μηχανικός, Συντονιστής Ποιότητας, ΧΑΛΥΨ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ Α.Ε.

Ν. Νικολακάκος

Χημικός Μηχανικός, Προϊστάμενος Ποιότητας, ΧΑΛΥΨ ΔΟΜΙΚΑ ΥΛΙΚΑ Α.Ε.

Λέξεις κλειδιά: Τσιμέντο, αντοχή, μοντέλο, ποιότητα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ: Στην παρούσα εργασία, περιγράφονται τεχνικές χαρτών ελέγχου εφαρμοσμένες στον καθημερινό ποιοτικό έλεγχο της παραγωγής τσιμέντου και παράλληλα αναπτύσσονται μαθηματικά πρότυπα πρόβλεψης των θλιπτικών αντοχών με βάση τις πρώιμες αντοχές καθώς και τα φυσικά και χημικά χαρακτηριστικά των τύπων τσιμέντου για τους οποίους είναι εφαρμόσιμα. Ο συνδυασμός των δύο εργαλείων έχει ως αποτέλεσμα την κατασκευή ενός αναλογικού – διαφορικού ρυθμιστή που στοχεύει τη ρύθμιση των αντοχών γύρω από μια καθορισμένη τιμή, κινούμενος πάντα εντός των ορίων που προδιαγράφονται από τα εφαρμοζόμενα πρότυπα τσιμέντου. Η επίδοση των μοντέλων διερευνάται αναλύοντας για μακρά χρονική περίοδο τα σφάλματα Τύπου I και Τύπου II.

1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η τεχνική των χαρτών ελέγχου αποτελεί ένα χρησιμότερο και σε ευρύ βαθμό εφαρμοσμένο εργαλείο παρακολούθησης και ελέγχου των βιομηχανικών διεργασιών καθώς και της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων. Ορισμένες από τις τεχνικές αυτές έχουν ήδη τυποποιηθεί μέσω του αντιστοίχου προτύπου ISO 8258:1991. Όσον αφορά τον κλάδο των δομικών υλικών και συγκεκριμένα τους κλάδους σκυροδέματος και τσιμέντου αναφέρονται αρκετά παραδείγματα εφαρμογής τους στην βιβλιογραφία από τους Dewar και Anderson (1992), Meyer (1997), Novokshchenov (2006) και Τσαματσούλη (2005). Συνήθως η τεχνική των χαρτών ελέγχου εφαρμόζεται για την θλιπτική αντοχή των 28 ημερών και ανάλογα με τη θέση των τρεχόντων αποτελεσμάτων λαμβάνονται οι αντίστοιχες ενέργειες, ώστε η αντοχή να διατηρείται γύρω από τον επιθυμητό στόχο. Το μειονέκτημα αυτού του τρόπου εφαρμογής

στατιστικού ελέγχου ποιότητας είναι ότι το διάστημα 28 ημερών που μεσολαβεί έως ότου ληφθούν αποτελέσματα αντοχής είναι αρκετά μακρό και πιθανά οι λόγοι που προκάλεσαν αποκλίσεις της αντοχής, έχουν ήδη εκλείψει. Γενικά μια αποτελεσματική λειτουργία καθημερινού ποιοτικού ελέγχου απαιτεί ενέργειες όταν εμφανίζεται η τάση προς απόκλιση είτε με την άμεση κατανόηση της αιτίας της απόκλισης και επενέργεια επ' αυτής, είτε με άμεση αντισταθμιστική ενέργεια, μέχρις ότου γίνουν κατανοητές οι πηγές των διαταραχών. Όταν η προς ρύθμιση παράμετρος πρόκειται να μετρηθεί μετά ένα σχετικά μακρό χρονικό διάστημα -όπως στην περίπτωση της αντοχής των 28 ημερών - είναι ιδιαίτερα χρήσιμα τα μαθηματικά πρότυπα πρόβλεψης της αντοχής με ένα αποδεκτό τυπικό σφάλμα.. Όσον αφορά το σκυρόδεμα ο Viviani et al. (2005) ανέπτυξαν μέθοδο με βάση μετρήσεις αντοχής 3 ημερών, υπολογίζοντας την ενέργεια ενεργοποίησης των αντιδράσεων ενυδάτωσης. Μαθηματικά μοντέλα πρόβλεψης για σκυρόδεμα ή και για τσιμέντο ανέπτυξαν επίσης οι Kostoglou et al. (1999), Τσαματσούλης (1999), Lacomte et al. (2001) και Hwang et al. (2004). Ένα μειονέκτημα είναι ότι ορισμένα από αυτά απαιτούν επιπλέον καθημερινές αναλύσεις, πέρα από τις δοκιμές ρουτίνας, γεγονός που δεν είναι πάντα δυνατό στην βιομηχανική παραγωγή. Τα παραπάνω μαθηματικά πρότυπα στηριγμένα σε σημαντικό αριθμό πειραματικών δεδομένων, παρέχουν επαρκή πρόβλεψη της θλιπτικής αντοχής για το πεδίο εφαρμογής τους, δηλ. για τους τύπους τσιμέντου ή σκυροδέματος που χρησιμοποιήθηκαν και τις δοσμένες α! ύλες. Το συμπέρασμα αυτό σημαίνει πως δεν υπάρχουν « παγκόσμια » μοντέλα που να παρέχουν συνεχώς επαρκή πρόβλεψη. Τα μαθηματικά πρότυπα τα οποία έχουν εξαχθεί από πειραματικά στοιχεία συγκεκριμένων α! υλών και συνθηκών παραγωγής, είναι εφαρμόσιμα ακριβώς σε αυτό το πεδίο εφαρμογής. Όταν κάποιες συνθήκες αλλάξουν, απαιτείται τροποποίηση του μοντέλου. Με την έννοια αυτή αποτελούν ιδιαίτερα χρήσιμα εργαλεία για τον τρέχοντα ποιοτικό έλεγχο των διεργασιών. Στις παραγράφους που ακολουθούν περιγράφεται η συνδυασμένη εφαρμογή των χαρτών ελέγχου – που αποτελεί εργαλείο στατιστικού ελέγχου διεργασιών, SPC – και των μαθηματικών προτύπων πρόβλεψης αντοχών .

2 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΩΝ ΧΑΡΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ

Για την κατασκευή των χαρτών ελέγχου εκτός από τον καθορισμό της κεντρικής γραμμής ή στόχου – central line (CL) – αιτείται και ο υπολογισμός του άνω και κάτω ορίου ελέγχου με βάση της «φυσική» απόκλιση της διεργασίας, αφού αφαιρεθούν τα σημεία εκτός ορίων – outliers – για τα οποία η πηγή της απόκλισης είναι συγκεκριμένη. Η φυσική απόκλιση σ , υπολογίζεται όπως περιγράφεται στην παράγραφο 2.1, από τις απόλυτες διαφορές $-R$ – μεταξύ δύο διαδοχικών τιμών, σύμφωνα με το πρότυπο ISO 8258:1991 . Ως στατιστική του χάρτη ελέγχου του μέσου

θεωρήθηκε ο εκθετικά ζυγισμένος κινούμενος μέσος - EWMA – όπως περιγράφεται από τον Pan (2002) και Neubauer (1997)

2.1 R-Χάρτες και φυσική απόκλιση

Η φυσική απόκλιση, σ , ενός χαρακτηριστικού ή μιας διεργασίας, είναι η τυπική απόκλιση εντός μιας μικρού μεγέθους υποομάδας του πληθυσμού, γεγονός που σημαίνει ότι είναι εγγενής στο χαρακτηριστικό ή την διεργασία. Όσο περισσότερες και μεγαλύτερης έντασης είναι οι διαταραχές στις οποίες μπορούν να αποδοθούν συγκεκριμένες αιτίες, τόσο μεγαλύτερη είναι η διαφορά μεταξύ της φυσικής και της συνολικής τυπικής απόκλισης της διεργασίας. Στην περίπτωση που δεν υπάρχουν πολλαπλές μετρήσεις στον ίδιο χρόνο, η φυσική απόκλιση υπολογίζεται από την απόλυτη διαφορά R , μεταξύ δύο διαδοχικών τιμών, με την παραδοχή ότι η διαταραχή σε ένα στενό χρονικό διάστημα είναι χαμηλή. Τα δεδομένα που θα μελετηθούν είναι τα αποτελέσματα ποιότητας για τσιμέντο ορισμένου τύπου που παράχθηκε από ένα μύλο. Ως χρονικό διάστημα θεωρείται η διαφορά μεταξύ δύο ημερών παραγωγής για τον ίδιο τύπο τσιμέντου – που είναι συνήθως μία ημέρα Έτσι δημιουργούνται οι R-χάρτες. Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 8258:1991, ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία για μια μεταβλητή X .

(i) Η διαφορά $R(i)$ για την ημέρα i , υπολογίζεται από τη σχέση (1):

$$R(i) = |X(i) - X(i-1)| \quad (1)$$

(ii) Υπολογίζεται η μέση διαφορά R_{Aver} , για όλες τις ημέρες της επιθεωρούμενης περιόδου

(iii) Ως τιμές εκτός ορίων – outliers - θεωρούνται αυτές που είναι μεγαλύτερες από την μέγιστη επιτρεπτή διαφορά που δίνεται από τη σχέση (2) και αποκλείονται από τους παραπέρα υπολογισμούς

$$R_{max} = 3.267R_{aver} \quad (2)$$

(iv) Μετά τον αποκλεισμό των outliers υπολογίζεται νέα τιμή του R_{Aver} και επαναλαμβάνονται τα βήματα (iii), (iv) έως ότου να μην υπάρχουν τιμές εκτός ορίων

(v) Η φυσική απόκλιση της διεργασίας ή του χαρακτηριστικού υπολογίζεται από την εξίσωση (3). Η τιμή αυτή αντιπροσωπεύει τα τρέχοντα φυσικά όρια της διεργασίας.

$$\sigma = 0.8865R_{aver} \quad (3)$$

Για τσιμέντο CEM II B-M (P-L) 32.5 N το οποίο έχει παραχθεί αποκλειστικά από ένα μύλο και για χρονικό διάστημα ενός έτους υπολογίζεται η φυσική απόκλιση για τα παρακάτω χαρακτηριστικά: (1)

Αντοχή 1 ημέρας – Str_1 (Mpa), (2) Αντοχή 7 ημερών – Str_7 (Mpa), (3) Αντοχή 28 ημερών – Str_28 (Mpa).

Η φυσική απόκλιση σ και η τυπική απόκλιση s συνδέονται με την εξίσωση (3), όπου s_{Others} είναι η τυπική απόκλιση που οφείλεται σε άλλες πηγές, οι οποίες όταν σταδιακά ανακαλύπτονται και εξαλείφονται η φυσική απόκλιση και η τυπική απόκλιση προσεγγίζουν.

$$s^2 = \sigma^2 + s_{Others}^2 \quad (3)$$

Πίνακας 1. Τιμές αποκλίσεων των ιδιοτήτων

	σ	S	S_{Others}
Str_1 (Mpa)	0.66	0.88	0.58
Str_7 (Mpa)	1.34	1.66	0.98
Str_28 (Mpa)	1.25	1.69	1.13

Τα αποτελέσματα όσον αφορά τις αντοχές, δίνονται στον πίνακα 1 από όπου γίνεται κατανοητό ότι η εξάλειψη πηγών απόκλισης, μειώνει το περιθώριο μεταξύ σ και s . Αποδεικνύεται λοιπόν ότι ο υπολογισμός της φυσικής απόκλισης συμβάλλει στην αποκάλυψη μονίμων πηγών διαταραχής η οποίες πρέπει να ανευρεθούν και να εξαλειφθούν. Άρα αποτελεί εργαλείο ποιοτικού ελέγχου.

2.2 Χάρτες κινούμενου μέσου

Για την παρακολούθηση των τάσεων μεταβολής των παραμέτρων επιλέχθηκαν οι χάρτες εκθετικά ζυγισμένου κινούμενου μέσου – EWMA – επειδή μπορούν να αποκαλύψουν μικρές τάσεις μεταβολής. Για ένα χαρακτηριστικό X αυτοί οι χάρτες δομούνται σύμφωνα με την παρακάτω διαδικασία:

(i) Για τον χρόνο $I=0$ η αρχική κινούμενη τιμή $EW(0)$ δίνεται από τη σχέση (4):

$$EW(0) = X(0) \quad (4)$$

(ii) Για μια παράμετρο λ , όπου $0 < \lambda \leq 1$, η στατιστική $EW(I)$ υπολογίζεται από την αναδρομική σχέση (5):

$$EW(I) = \lambda \cdot X(I) + (1 - \lambda) \cdot EW(I - 1) \quad (5)$$

(iii) Εάν $\lambda=1$ ο EWMA - χάρτης γίνεται X - χάρτης όπου οι κινούμενοι μέσοι ισούνται με τις τρέχουσες τιμές. Όσο μικρότερη είναι η τιμή του λ , η ταχύτητα της μεταβολής γίνεται μικρότερη και μόνιμες τάσεις μπορούν να αποκαλυφθούν.

(iv) Η κεντρική γραμμή του χάρτη –CL – ισούται με τον στόχο.

(v) Για να υπολογιστεί το άνω όριο ελέγχου - UCL - και το κάτω όριο ελέγχου – LCL – υπολογίζεται αρχικά η τυπική απόκλιση της στατιστικής

EWMA, από την φυσική απόκλιση σ του χαρακτηριστικού X , σύμφωνα με τη σχέση (6):

$$\sigma_{EW} = \sigma \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{2-\lambda}} \quad (6)$$

(vi) Για το τρέχον έτος ως φυσική απόκλιση θεωρείται η τιμή που υπολογίστηκε τον προηγούμενο χρόνο.

(vii) Η κεντρική γραμμή και τα όρια ελέγχου, υπολογίζονται από τον στόχο του X , X_{Targ} και την απόκλιση σ_{EW} , σύμφωνα με τις σχέσεις (7):

$$CL = X_{Targ} \quad UCL = X_{Targ} + 3\sigma_{EW} \quad LCL = X_{Targ} - 3\sigma_{EW} \quad (7)$$

Με τον τρόπο αυτό κατασκευάζονται οι EWMA- χάρτες για κάθε ιδιότητα υπό παρακολούθηση

3 ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΑ ΠΡΟΤΥΠΑ ΠΡΟΒΛΕΨΗΣ ΑΝΤΟΧΩΝ

Με χρήση βιομηχανικών δεδομένων σύνθεσης τσιμέντου, λεπτότητας και πρώιμης αντοχής κατασκευάστηκαν πρότυπα πρόβλεψης των αντοχών 7 και 28 ημερών. Χρησιμοποιήθηκαν ημερήσια δεδομένα ποιότητας τσιμέντων CEM II A-L 42.5 R και CEM II B-M (P-L) 32.5 N τα οποία αλέστηκαν στον ίδιο μύλο από το 2003 έως το 2006. Κατά τη διάρκεια αυτή δεν υπήρχε κάποια σημαντική διαφοροποίηση στις a_1 ύλες και στις συνθήκες λειτουργίας του μύλου. Συνολικά χρησιμοποιήθηκαν 1021 ομάδες πειραματικών δεδομένων. Με βάση την χημική ανάλυση των a_1 υλών και του τσιμέντου υπολογίζεται η σύνθεση και το περιεχόμενο κλίνκερ με τον αλγόριθμο που περιγράφεται από τον Τσαματσούλη (2003). Τα πειραματικά δεδομένα προσαρμόστηκαν σε 4 γραμμικά πρότυπα.. Οι ανεξάρτητες και εξαρτημένες μεταβλητές κάθε προτύπου δίνονται στον πίνακα 2. Στην πρώτη στήλη δίνεται η εξαρτημένη μεταβλητή κάθε μοντέλου.

Πίνακας 2. Ανεξάρτητες και εξαρτημένες μεταβλητές των προτύπων

Αντοχή	%Κλίνκερ %Clinker	Ειδική επιφάνεια Sb, (cm ² /gr)	%R40	Str_1 (Mpa)	Str_7 (Mpa)
Str_7	X	X	X	X	
Str_28_C1	X	X	X		
Str_28_1	X	X	X	X	
Str_28_7	X	X	X	X	X

Αναμένεται ότι καθώς η ηλικία της πρώιμης αντοχής αυξάνει, η πρόβλεψη να είναι καλύτερη και το τυπικό σφάλμα να μειώνεται. Αυτό σημαίνει ότι η πρόβλεψη της αντοχής 28 ημερών με βάση την πραγματική αντοχή 7 ημερών πρέπει να προσεγγίζει στενότερα την πραγματική. Το μειονέκτημα είναι ότι στην περίπτωση αυτή η πρόβλεψη γίνεται 8 ημέρες μετά την πραγματική παραγωγή. Αυτό το χρονικό διάστημα είναι ανεπαρκές για γρήγορη ενέργεια και ρύθμιση. Για καθημερινές ενέργειες ρύθμισης το πρότυπο που προβλέπει την αντοχή 28 ημερών από την αντοχή 1 ημέρας - πρόβλεψη στενού χρονικού ορίζοντα - είναι πλέον αποδεκτό στην περίπτωση που το τυπικό σφάλμα είναι επαρκώς χαμηλό. Η αντίστοιχη εκτίμηση με βάση την αντοχή των 7 ημερών - πρόβλεψη μέσου χρονικού ορίζοντα - αναμένεται να λειτουργεί καλύτερα στην περίπτωση πλέον μόνιμων τάσεων αποκλίσεων από το στόχο, που απαιτούν πλέον αναλυτική διερεύνηση. Τα προτεινόμενα μοντέλα έχουν την γενικότερη γενική μορφή που δίνεται από την εξίσωση (8):

$$Y = A_0 + \sum_{I=1}^N A_I X_I + \sum_{I=1}^N A_{II} X_I^2 + \sum_{I=1}^N \sum_{J=I+1}^N A_{IJ} X_I \cdot X_J \quad (8)$$

Οι συντελεστές του κάθε προτύπου υπολογίζονται μέσω του παρακάτω αλγορίθμου:

- (i) Υπολογίζονται αρχικοί συντελεστές μέσω πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης .
- (ii) Ακολουθεί t-test με πιθανότητα 95% και οι μη σημαντικοί συντελεστές δεν λαμβάνονται υπ' όψη στους παραπέρα υπολογισμούς.
- (iii) Επαναλαμβάνεται η πολλαπλή παλινδρόμηση και ο έλεγχος σημαντικότητας, καταλήγοντας σε μοντέλο του οποίου όλοι οι συντελεστές είναι σημαντικοί. Με τον τρόπο αυτό τα πρότυπα απλοποιούνται στο μέγιστο βαθμό, παράγοντας το ελάχιστο τυπικό σφάλμα σε κάθε περίπτωση.
- (iv) Μετά την εύρεση του τελικού μοντέλου, οι πειραματικές ομάδες τιμών που δίνουν απόλυτη διαφορά μεταξύ μετρημένης και υπολογιζόμενης αντοχής μεγαλύτερη από 3 τυπικά σφάλματα του προτύπου εξαιρούνται ως εκτός ορίων.
- (v) Ακολουθεί ξανά υπολογισμός των συντελεστών και εξαίρεση των τιμών εκτός ορίων, έως ότου δεν παρατηρούνται τιμές εκτός ορίων.

Οι τιμές των συντελεστών για κάθε μαθηματικό πρότυπο δίνονται στον πίνακα 3. Παρέχονται πέραν των συντελεστών το τυπικό σφάλμα κάθε μοντέλου, std.Error, για όλα τα πειραματικά σημεία και κάθε τύπο τσιμέντου ξεχωριστά. Δίνεται επίσης η συνολική τυπική απόκλιση των πειραματικών σημείων, s Experimental και η τυπική απόκλιση η οποία καλύπτεται από το μοντέλο, s Model. Ως αποτέλεσμα των δύο τελευταίων τιμών προκύπτει ο συντελεστής συσχέτισης R. Από τον πίνακα 3 παρατηρείται ότι: Κινούμενοι από το μοντέλο Str_28_C1 προς το μοντέλο

Str_28_7 το τυπικό σφάλμα συνεχώς μειώνεται. Το τυπικό σφάλμα του μοντέλου Str_28_1 είναι αποδεκτό εφόσον είναι πάντα μικρότερο από την τυπική απόκλιση αποτελεσμάτων 4 ετών σε κάθε τύπο τσιμέντου.

4 ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΡΥΘΜΙΣΤΗ ΑΝΤΟΧΩΝ

Η συνδυασμένη δράση των δύο εργαλείων που αναλύθηκαν στις παραγράφους 2 και 3 παρέχει την δυνατότητα της κατασκευής ενός ρυθμιστή που στόχο έχει να σταθεροποιήσει την αντοχή συγκεκριμένου τύπου τσιμέντου που αλέθεται στον συγκεκριμένο μύλο, από τα δεδομένα του οποίου παράχθηκαν τα μοντέλα πρόβλεψης, γύρω από ένα στόχο. Ο ρυθμιστής που κατασκευάστηκε είναι αναλογικός – διαφορικός. Μεταβλητή εισόδου αποτελεί ο κινούμενος μέσος της αντοχής 28 ημερών που υπολογίζεται από την αντοχή μιας ημέρας με βάση το μοντέλο str_28_1, και μεταβλητή χειρισμού αποτελεί το ποσοστό του κλίνκερ. Η εξίσωση του ρυθμιστή είναι η εξής:

Πίνακας 3. Συντελεστές των προτύπων πρόβλεψης αντοχής

Συντελεστής	Str_7_1	Str_28_Cl	Str_28_1	Str_28_7
Σταθερά	100.08	105.35	58.511	3.154
%Clinker	-2.198	-2.714	-1.125	
Sb/10 ⁴	-104.91	-39.387	-15.168	45.903
%R40	0.519	1.407		
Str_1	1.124		0.911	1.091
%Clinker · Sb / 10 ⁴	1.734	0.909		-0.799
%Clinker · %R40	-0.011	-0.021	-0.008	
%Clinker · Str_1			0.025	
%R40 · Sb / 10 ⁴			1.319	0.204
%Clinker ²	0.014	0.024	0.011	0.004
Str_1 ²			-0.084	-0.096
Str_7				0.337
Str_1 · Str_7				0.033
Std. Error	1.476	2.039	1.652	1.359
Std. Error CEM B-M	1.308	1.842	1.46	1.215
Std. Error CEM A-L	2.029	2.431	2.037	1.653
s Experimental	4.991	6.643	6.643	6.643
s Exper. CEM B-M	1.767	1.852	1.852	1.852
s Exper. CEM A-L	2.456	2.515	2.515	2.515
s Model	4.768	6.322	6.434	6.502
R	0.955	0.952	0.969	0.979

$$D_Clinker(I+1) = -K_P \cdot (EW_Str(I-1) - Str_{Targ}) - K_D \cdot (EW_Str(I-1) - EW_Str(I-2)) \quad (9)$$

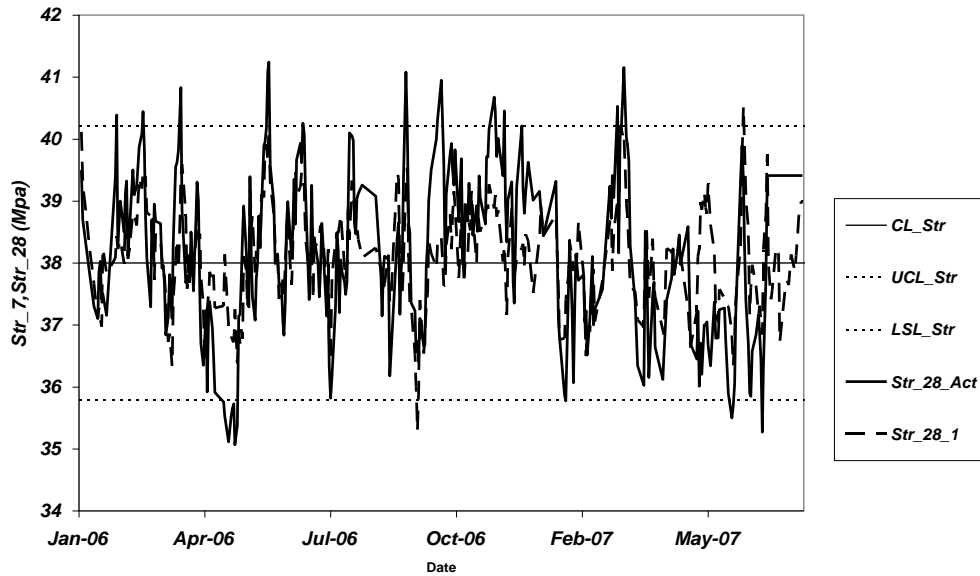
Όπου I είναι η μέρα παραγωγής, EW_Str(I-1), EW_Str(I-2) οι κινούμενοι μέσοι τις ημέρες I-1 και I-2, D_Clinker(I+1), η προτεινόμενη αλλαγή στη σύνθεση του κλίνκερ για την ημέρα I+1, Str_{Targ} ο στόχος αντοχής, K_P το αναλογικό μέρος του ρυθμιστή, K_D το αντίστοιχο διαφορικό μέρος. Επιπλέον ο ρυθμιστής περιλαμβάνει επιτρεπτή ζώνη λειτουργίας για την σύνθεση, ώστε το ποσοστό κλίνκερ να βρίσκεται διαρκώς εντός των προδιαγραφόμενων από το πρότυπο προϊόντος ορίων. Περιλαμβάνει επίσης νεκρή ζώνη, έτσι ώστε όταν οι προτεινόμενες αλλαγές είναι αρκετά μικρές να μηδενίζονται. Οι βέλτιστες τιμές του αναλογικού και διαφορικού μέρους υπολογίστηκαν με χρήση δεδομένων παλαιότερων ετών και προσομοιωμένη λειτουργία του ρυθμιστή. Η λογική της ρύθμισης είναι να δίνονται καθημερινές μικρές αλλαγές στην σύνθεση - αν απαιτούνται - ώστε να αποφεύγονται δύο εξ ίσου καταστροφικές για την ομοιομορφία του προϊόντος ενέργειες: (i) Διαστήματα αδράνειας και στη συνέχεια απότομες μεταβολές (ii) Συνεχείς απότομες μεταβολές. Βεβαίως η αυτόματη ρύθμιση δεν υποκαθιστά αλλά υποβοηθά την καθημερινή εμπειρία των στελεχών της παραγωγής και την εμπλουτίζει παραπέρα.

5 ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΗ ΚΑΙ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΤΗΣ ΜΕΘΟΔΟΥ

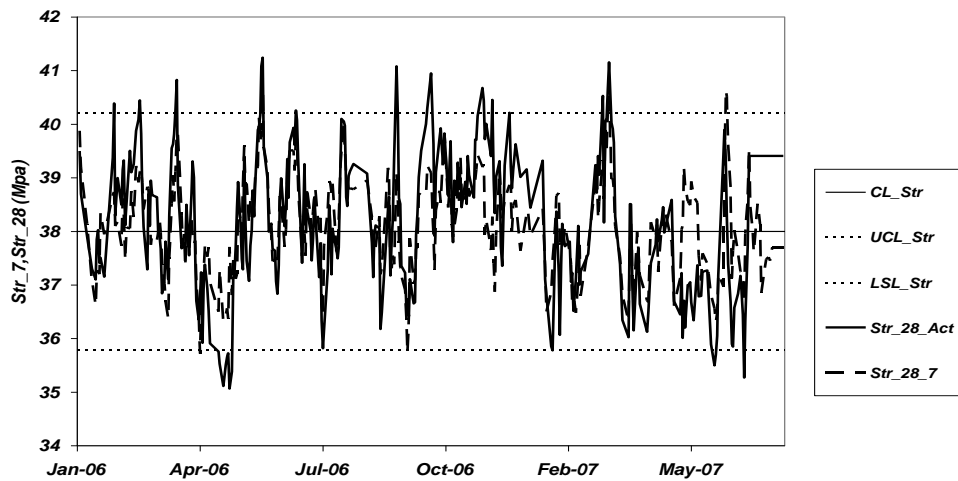
5.1 Σύγκριση πειραματικών δεδομένων με υπολογιζόμενες τιμές

Η επίδραση του ρυθμιστή στην ποιότητα του προϊόντος εξαγωγής του ίδιου μύλου τσιμέντου φαίνεται στο σχήμα 1 σε μορφή χάρτη ελέγχου όπου δίνονται οι πραγματικές και υπολογιζόμενες από την 1 ημέρα, αντοχές 28 ημερών καθώς και τα όρια ελέγχου. Καλύπτεται μια περίοδος 19 μηνών. Αντίστοιχα στο σχήμα 2 δίνονται οι πραγματικές και οι υπολογιζόμενες από τις 7 ημέρες αντοχές 28 ημερών. Ως παράμετρος λ του EWMA – χάρτη λήφθηκε η τιμή που χρησιμοποιείται στον ρυθμιστή, λ=0.5. Από το σχήμα 1 παρατηρείται μια επαρκής συμφωνία μεταξύ των πραγματικών και υπολογιζόμενων τιμών. Πρέπει επιπλέον να τονιστεί ότι τα όρια ελέγχου είναι ιδιαίτερα στενά: LCL = 35.8 Mpa, UCL =40.2 Mpa σημαντικά πιο στενά από τα όρια του προτύπου EN 197-1 για το CEM 32.5 που είναι 32.5 και 52.5 αντίστοιχα. Από το σχήμα φαίνεται ότι λόγω του τρόπου ρύθμισης δεν παρατηρείται αντοχή μικρότερη του 35.1 και ψηλότερη του 41.2. Επιπλέον ο ρυθμιστής πραγματοποιεί το στόχο. Η πραγματοποιημένη μέση

τιμή είναι 38.1 Μρα με τυπική απόκλιση 1.7 Μρα, τιμή ιδιαίτερα χαμηλή για προϊόν εξαγωγής μύλου. Αυτό αναμένεται να έχει σαν αποτέλεσμα την πραγματοποίηση αποκλίσεων σημαντικά μικρότερων στο τσιμέντο προς φόρτωση μετά τα σιλό αποθήκευσης.



Σχήμα 1. Αντοχές 28 ημερών, πραγματικές και υπολογιζόμενες από πρώιμη αντοχή 1 ημέρας



Σχήμα 2. Αντοχές 28 ημερών, πραγματικές και υπολογιζόμενες από πρώιμη αντοχή 7 ημερών

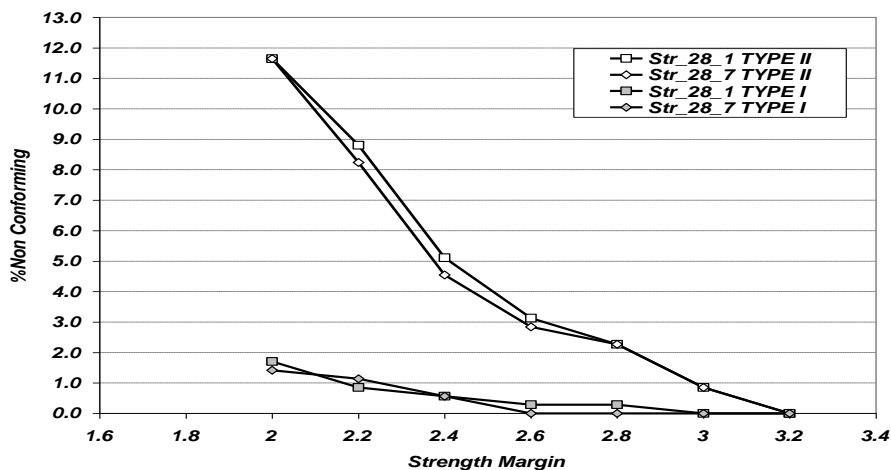
Η προσέγγιση των πραγματικών αντοχών και των υπολογιζόμενων από τις 7 ημέρες είναι ιδιαίτερα επαρκής. Το γεγονός αυτό επαληθεύει ότι η πρόβλεψη των 7 ημερών παρέχει μεσοπρόθεσμες τάσεις και στην περίπτωση αποκλίσεων από την πρόβλεψη της μίας ημέρας απαιτείται αναλυτική διερεύνηση των αιτιών των αποκλίσεων και εξάλειψή τους.

5.2 Αξιολόγηση με βάση την διακύβευση Τύπου I και Τύπου II

Για να οριστεί η διακύβευση Τύπου I ή II, απαιτείται κατ' αρχήν η τοποθέτηση ενός κριτηρίου. Στη συνέχεια ως διακύβευση Τύπου I, θεωρείται η περίπτωση που ένα συμμορφούμενο στην πραγματικότητα προϊόν, σύμφωνα με το εφαρμοζόμενο κριτήριο θεωρείται μη συμμορφούμενο. Στην περίπτωση αυτή πάσχει ο παραγωγός. Τύπου II θεωρείται η αντίθετη περίπτωση που ένα μη συμμορφούμενο στην πραγματικότητα προϊόν, σύμφωνα με το εφαρμοζόμενο κριτήριο, θεωρείται συμμορφούμενο. Για να αξιολογηθούν τα μοντέλα πρόβλεψης με αυτή τη μεθοδολογία, τοποθετείται κατ' αρχήν ένα δίπλευρο κριτήριο, άνω και κάτω ορίου αντοχής και θεωρούνται οι παρακάτω περιπτώσεις:

(i) Εάν και η πραγματική και η προβλεπόμενη τιμή είναι και οι δύο εντός είτε και οι δύο εκτός της επιτρεπόμενης από το κριτήριο περιοχής, τότε η πρόβλεψη είναι επιτυχής

(ii) Εάν η προβλεπόμενη τιμή είναι εκτός της επιτρεπόμενης ζώνης και η πραγματική τιμή είναι εντός της ζώνης, τότε προκύπτει διακύβευση Τύπου I, διότι ο παραγωγός τυπικά έκανε μη απαιτούμενη ενέργεια η οποία είχε κάποιο κόστος



Σχήμα 3. Ποσοστό μη συμμορφούμενων συναρτήσει τους εύρους του εφαρμοζόμενου κριτηρίου

Σύμφωνα με τα παραπάνω εάν ως κριτήριο συμμόρφωσης θεωρηθεί το δεδομένο από το πρότυπο ΕΛΟΤ EN 197-1 δηλ. επιτρεπτή περιοχή 32.5 έως 52.5 Μρα τα μοντέλα πρόβλεψης είναι επιτυχή με ποσοστό 100%, διότι πάντα η υπολογιζόμενη τιμή και οι πραγματικές κινούνται εντός της ζώνης του κριτηρίου. Ως κριτήριο συμμόρφωσης θεωρήθηκε το εύρος γύρω από τη μέση τιμή. Για μέση τιμή 38.1 Μρα, θεωρήθηκαν εύρη από 2 Μρα έως 3.2 Μρα και υπολογίστηκαν τα άνω και κάτω όρια. Η μεταβολή των διακυβεύσεων Τύπου I και II συναρτήσει του εύρους του θεωρούμενου κριτηρίου δίνεται στο σχήμα 3. Από το σχήμα παρατηρείται μια εξαιρετική συμπεριφορά της εφαρμοζόμενης μεθόδου ρύθμισης:

(i) Η διακύβευση Τύπου I διατηρείται πάντα σημαντικά χαμηλή και πρακτικά μηδενίζεται για ένα εύρος κριτηρίου 2.6 Μρα δηλ. για περιοχή αντοχής [35.5, 40.6] Μρα.

(ii) Για εύρος κριτηρίου 2.4 Μρα και άνω - περιοχή αντοχής [35.7, 40.4] - η διακύβευση Τύπου II γίνεται μικρότερη του 5%. Το αντίστοιχο πρότυπο EN 197-1 επιτρέπει διακύβευση 5% σε αντοχή 32.5 Μρα. Άρα παρέχεται μια περαιτέρω ασφάλεια 3.2 Μρα

(iii) Για εύρος κριτηρίου 3.2 Μρα και άνω - περιοχή αντοχής [34.9, 41.3] - η διακύβευση Τύπου II καθίσταται μηδενική. Το πρότυπο EN 197-1 επιβάλλει διακύβευση 0% σε αντοχή 30.0 Μρα. Η εφαρμοζόμενη ρύθμιση παρέχει στον πελάτη μια παραπάνω ασφάλεια 4.9 Μρα σε σχέση με την επιβαλλόμενη από την προδιαγραφή.

(iv) Η συνδυασμένη λοιπόν εφαρμογή της τεχνικής χαρτών ελέγχου και των μαθηματικών προτύπων πρόβλεψης αντοχής, που οδηγεί στην κατασκευή αυτόματου ρυθμιστή των αντοχών, έχει ως αποτέλεσμα την σημαντικότερη μείωση έως εκμηδένιση των σφαλμάτων Τύπου I και Τύπου II, λειτουργεί επομένως προς όφελος και του παραγωγού και του πελάτη και συμβάλλει στην συνολική βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων τόσο του συγκεκριμένου οργανισμού παραγωγής τσιμέντου όσο και των χρηστών των προϊόντων, άρα στην συνολική βελτίωση αυτού του κλάδου δομικών υλικών.

6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην παρούσα εργασία έγινε περιγραφή ορισμένων στατιστικών εργαλείων ποιότητας, εφαρμοσμένα στο εργοστάσιο τσιμέντου ΧΑΛΥΨ. Η εφαρμογή των χαρτών ελέγχου εύρους R-charts και κινούμενου μέσου – EWMA charts – συνδυάστηκε με μαθηματικά πρότυπα πρόβλεψης των αντοχών τσιμέντου. Ως αποτέλεσμα κατασκευάστηκε ένας αναλογικός – διαφορικός ρυθμιστής αντοχών. Πρέπει να σημειωθεί ότι δεν απαιτείται ολοκληρωτικό μέρος του ρυθμιστή, διότι η μεταβλητή εισόδου αποτελεί κινούμενο μέσο, άρα έχει ήδη ολοκληρωμένη μορφή. Η αξιολόγηση της μεθόδου με έλεγχο των διακυβεύσεων Τύπου I – διακύβευση παραγωγού – και Τύπου II – διακύβευση πελάτη – αποδεικνύει εξαιρετική επίδοση. Τα ιδιαίτερα χαμηλά

επίπεδα τυπικών αποκλίσεων των αντοχών των τσιμέντων του Εργ. ΧΑΛΥΨ σε μακροχρόνια βάση, σχετίζονται με τέτοιου τύπου μεθόδους ρύθμισης του τσιμέντου εξαγωγής από τους μύλους καθώς και με αντίστοιχους ρυθμιστές που έχουν κατασκευαστεί και λειτουργούν σε πολυετή βάση (Τσαματσούλης (2005))

Η συνδυασμένη λοιπόν εφαρμογή της τεχνικής χαρτών ελέγχου και των μαθηματικών προτύπων πρόβλεψης αντοχής, που οδηγεί στην κατασκευή αυτόματου ρυθμιστή των αντοχών, έχει ως αποτέλεσμα την σημαντικότερη μείωση έως εκμηδένιση των σφαλμάτων Τύπου I και Τύπου II. Λειτουργεί επομένως προς όφελος και του παραγωγού και του πελάτη και συμβάλλει στην συνολική βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων τόσο του συγκεκριμένου οργανισμού παραγωγής τσιμέντου όσο και των χρηστών των προϊόντων, άρα στην συνολική βελτίωση αυτού του κλάδου δομικών υλικών.

7 ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Hwang, K. Noguchib, T. Tomosawac, F., "Prediction model of compressive strength development of fly-ash concrete", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34(2004), 2269 - 2276

Dewar J. Anderson, R., "Manual of Ready Mix Concrete". Glasgow: Blackie Academic and professional, (1992)

Kostogloudis, G. Anagnostou, J. Ftikos, C. & Marinos, J., "Development of a Multiple Linear Regression Model for Predicting the 28 days Compressive Strength of Portland Pozzolan Cement", *Materials and Structures*, Vol. 32 (1999),98-102

Lecomte, A. de Larrard, F. & Mechling, J.P., "Compressive Strength of Hydraulic Concretes with a Non-Optimized Granular Matrix", *Bulletin des laboratoires des ponts et chaussées*, 234 (2001), 85-101

Meyer, D. "A Statistical Comparison of Accelerated Concrete Testing Methods", *Journal of Applied Mathematics & Decision Sciences*, Vol. 1(1997), 89-100

Novokshchenov, V. Al-Mudhaf, H.& Al-Fadhala, M. "Computer-aided statistical quality control in a concrete block factory in Kuwait", *Materials and Structures*, Vol. 30(2006), 112-119.

Newubauer, A., "The EWMA control chart: properties and comparison with other quality-control procedures by computer simulation", *Clinical Chemistry*, Vol. 43 (1997),594-601

Pan, R. "Statistical Process Adjustment Methods For Quality Control In Short-Run Manufacturing, Thesis in Industrial Engineering", Pennsylvania State University, (2002)

"Statistical methods for quality control", ISO 8258: 1991. Shewhart control charts. Vol. 2 (1995), 355-383

Tsamatsoulis, D., "Development and Application of a Cement Raw Meal Controller", Industrial Engineering and Chemistry Research, Vol. 44 (2005), 7164-7174

Τσαματσούλης, Δ., "Συσχέτιση Αντοχών Τσιμέντου με Φυσικές και Χημικές Ιδιότητες Μέσω μαθηματικής Μοντελοποίησης", 13^ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Ρέθυμνο (1999), Τόμος II, 176-183

Τσαματσούλης, Δ. "Υπολογισμός Σύνθεσης Τσιμέντου και Ανάλυση Αβεβαιότητας", 14^ο Ελληνικό Συνέδριο Σκυροδέματος, Κως (2003), Τόμος Β, 263-270

Viviani, M. Glisic, B.& Smith I., "Three-Day Prediction of Concrete Compressive Strength Evolution", ACI Materials Journal, July-August (2005)

