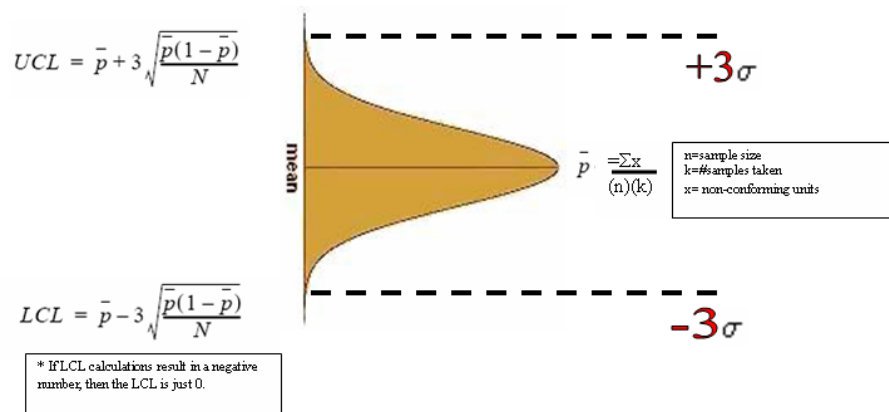




ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



**«Οι εκτεταμένες χρήσεις του Στατιστικού Ελέγχου
Διεργασιών στον Τομέα της Δομοστατικής»**

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Χρήστος Κουκουβίνος Καθηγητής Ε.Μ.Π.

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ ΦΟΙΤΗΤΗ

Ιωάννης Διαμαντής (Α.Μ.09110010)

ΑΘΗΝΑ 2013

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Τα τελευταία χρόνια, ο Στατιστικός Έλεγχος Διεργασιών έχει παρουσιάσει ραγδαία εξάπλωση σε όλους τους τομείς των παραγωγικών διαδικασιών, ανά τον κόσμο, σε τομείς με διεργασίες ελέγχου που φαινομενικά είναι ετερογενείς και μη συνδεδεμένοι μεταξύ τους, όπως η Οικονομία και η Βιομηχανία, φτάνοντας μέχρι τον τομέα της Εδαφομηχανικής και της Στατικής. Στόχος της παρούσας εργασίας, είναι η αναλυτική περιγραφή και η εκτενής παρουσίαση των μεθόδων μέσω των οποίων συντελείται η εφαρμογή του Σ.Ε.Δ. ειδικότερα σε στατικές και κατασκευαστικές πρακτικές, οι οποίες κάνουν εκτενή χρήση σκυροδέματος (τσιμέντου) ως βασικού υλικού των σύγχρονων κατασκευών. Το οπλισμένο σκυρόδεμα αποτελεί ένα σύγχρονο υλικό κατασκευών, οι προδιαγραφές καθώς και τα χαρακτηριστικά του οποίου μελετώνται και συνταιριάζονται ανάλογα με τον τύπο της κατασκευής για την οποία προορίζεται.

Προφανώς, σε μελέτες που λαμβάνουν χώρα σε διάφορα εργαστήρια αντοχής υλικών και μελέτης των χαρακτηριστικών και των προσμίξεων του οπλισμένου σκυροδέματος, είναι ζωτικής σημασίας, συνδέοντας τα μικροσκοπικά χαρακτηριστικά του υλικού με τα μακροσκοπικά χαρακτηριστικά (αντοχής, στεγανότητας, στρέψεως, κάμψεως, θραύσεως, κλπ.) που απαιτούνται για τις εκάστοτε κατασκευές.

Στην σύνθεση σκυροδέματος λοιπόν, είναι απαραίτητη η παρακολούθηση και αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων που διεξάγονται στα εν λόγω εργαστήρια, με στόχο την έγκαιρη διάγνωση και προειδοποίηση σε περίπτωση αδυναμίας επίτευξης των δεδομένων χαρακτηριστικών, διασφαλίζοντας την αντοχή, στατικότητα και ασφάλεια τόσο της διεργασίας σύνθεσης αλλά τόσο και της τελικής κατασκευής

Μία τέτοια καινοτόμος εφαρμογή των μεθόδων του Σ.Ε.Δ. στον τομέα της Δομοστατικής θα μπορούσε να συντελέσει όχι μόνο στη βελτίωση της αποδοτικότητας των μακροσκοπικών χαρακτηριστικών του κονιάματος και οπλισμένου σκυροδέματος, αλλά και επιπλέον να συμβάλει στην περαιτέρω βελτίωση των τεχνικών και ειδικών χαρακτηριστικών του

Το πρώτο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας, αποτελεί μια εισαγωγή στη γενικότερη θεωρία και φιλοσοφία του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών, μέσα από την ιστορική αναδρομή της ποιότητας και των βασικών συνιστωσών της, καθώς και των κυριότερων εργαλείων ελέγχου της απόδοσης διεργασιών: των διαγράμματα ελέγχου.

Το δεύτερο κεφάλαιο, πραγματεύεται την παρουσία και χρήση διαφορετικών μεθόδων αξιολόγησης των αποτελεσμάτων μέσω Σ.Ε.Δ., επικεντρώνοντας σε εφαρμογές της Δομοστατικής. Η ανάλυση και επεξήγηση των προτερημάτων και μειονεκτημάτων της κάθε μεθόδου, μέσα από ένα πλαίσιο σύγκρισης μεταξύ τους, οδηγεί σε ενδιαφέροντα συμπεράσματα σχετικά με τη συνεισφορά τους σε διάφορες μηχανικές εφαρμογές.

Στο τρίτο κεφάλαιο, αναλύονται οι παράγοντες κινδύνου από αστοχία, οι οποίοι χαρακτηρίζουν κάθε τύπο σκυροδέματος. Τέτοιοι παράγοντες αστοχίας στην σύγχρονη κατασκευαστική επιστήμη αφορούν στην ομοιογένεια του σκυροδέματος, τους παράγοντες προσμίξεων, την αναλογία νερού/τσιμέντου στο μίγμα, τα επίπεδα φυσαλίδων αέρα στο μίγμα κλπ, καθώς αυτά συντελούν στην μεταβολή των μακροσκοπικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος, όπως των μέτρων ελαστικότητας Young, της ικανότητας στρέψεως-κάμψεως-θραύσεως κλπ. Συγκεκριμένα, η έννοια του κινδύνου αποκτάει ιδιαίτερο νόημα, μέσα από την εφαρμογή της μεθόδου Cusum στην μέτρηση και ανάλυση δοκιμίων σκυροδέματος.

Τέλος, στο τέταρτο κεφάλαιο, παρουσιάζεται μία προσέγγιση των τεχνικών Σ.Ε.Δ όπως εφαρμόζεται στην πράξη για την αξιολόγηση της παραγωγής σκυροδέματος. Συγκεκριμένα, παρουσιάζονται οι δομικές μονάδες ενός εργοστασίου σκυροδέματος, ο καθορισμός των σχέσεων αναλογίας συστατικών και επιτεύξιμης αντοχής θραύσεως καθώς και τα Πρότυπα Συμμόρφωσης Σκυροδέματος.

ABSTRACT

Over the last few years, the Statistical Quality Control (SQC) has experienced an enormous expansion in the field of production procedures, in all over the world: related with fields and procedures that seem heterogeneous and non-relevant such as economics and industries upto engineering and static applications (constructions). Main aspect of this work, is the analytical and detailed presentation of the methods, as paths for the application of SQC, focusing into static and cement-concrete applications. Cement is a modern material, widely approved in constructions, targeting into special mechanical characteristics where required by the outcome result.

Apparently, it is vitally important to record and assess the outcomes of the applications and the analysis of the ingredients of cement, taking place in material testing laboratories and reinforced concrete. The analytical overview of the ingredients, affects macroscopical characteristics such as strength, water/cement ratio (w/c ratio), material resilience, elasticity, air in mixture, etc.

In the industry of cement, it is necessary to monitor and evaluate the results of measurements carried out in these laboratories, as early warning indicators of a potential failure, securing this way not only the achieved characteristics but also the safety of the final construction. Such functional and innovative presence of S.Q.D. in the field of structural engineering could assist not only to improve the efficiency of cement and concrete, but it may well contribute onto the development of new methods of repair and strengthening of reinforced concrete in terms and sections that are unknown and not-applicable until now.

The first chapter is an introduction to general theory and philosophy related to the Statistical Quality Control, in the frame of quality historical retrospection, the basic parameter estimation techniques, and the main tools which are applicable in terms of control: the control charts.

The second chapter deals with the presence and use of different methods for evaluating the results and applications of Structural Engineering. The analysis and explanation of the benefits and disadvantages of each, within a framework of comparison between them, is expected to lead into interesting conclusions about method's contribution in various engineering applications and technical segments.

The third chapter analyzes the risk factors, which characterize each type of concrete type. The risk factors related with cement technical characteristics, such as the Young

modulus, tension and pressure diagrams, etc. Specifically, the concept of risk takes on special meaning, through the application of the method to measure Cusum essays.

Finally, in the fourth chapter, an approach S.Q.D. techniques as applied in practice to assess the production of concrete. Specifically presented are the building blocks of a concrete factory, the defining relations of ingredients and achievable fracture strength and the Standards Compliance Concrete.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κ. Χρήστο Κουκουβίνο, για την ανάθεση της εργασίας, την καθοδήγηση, τις αλάνθαστες υποδείξεις και την ευκαιρία μίας εποικοδομητικής συνεργασίας πάνω σε ένα γνωστικό αντικείμενο το οποίο με ενθουσίασε ιδιαίτερος την περίοδο που το διδάχθηκα. Οι επιστημονικές γνώσεις του στον τομέα αυτό, η εμπειρία, ο επαγγελματισμός, η αφοσίωση και η διάθεση του για εποικοδομητική συνεργασία συνέβαλαν καθοριστικά στη θετική μου στάση και ενδιαφέρον ως προς την αποτελεσματική και δημιουργική προετοιμασία του συγκεκριμένου θέματος.

Επίσης, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον υποψήφιο διδάκτορα Ανδρουλάκη Εμμανουήλ, για την καθοδήγηση και πολύτιμη βοήθεια που μου προσέφερε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης και προετοιμασίας της συγκεκριμένης εργασίας, όπως επίσης και για τις πολύ εύστοχες παρατηρήσεις και υποδείξεις που συνέβαλαν στην άρτια παρουσίαση της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την ανεκτίμητη βοήθεια και συμπαράσταση που μου παρείχαν με κάθε δυνατό τρόπο, ηθικά και ψυχολογικά, καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Για την αγάπη, την αφοσίωση, την κατανόηση, την υπομονή, την υποστήριξη και γενικώς για όλα όσα μου προσέφεραν τους οφείλω την αμέριστη ευγνωμοσύνη μου και όλη μου την αγάπη.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

Σελίδα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	- 2 -
ABSTRACT.....	- 4 -
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	- 6 -

ΚΕΦΑΛΑΙΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1.....	- 12 -
Η μεθοδολογία του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών (Σ.Ε.Δ.).....	- 12 -
1.1. Εισαγωγή.....	- 12 -
1.1.1. Η Έννοια της Ποιότητας και οι Διαστάσεις της.....	- 13 -
1.1.2. Ιστορική Αναδρομή της Ποιότητας.....	- 14 -
1.1.3. Συνιστώσες του Στατιστικού Ελέγχου Ποιότητας.....	- 19 -
1.2. Το πρόβλημα του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών.....	- 21 -
1.2.1. Περιγραφή και Χρήση ενός Διαγράμματος Ελέγχου.....	- 24 -
1.3. Ο Σ.Ε.Δ στον τομέα της Σύνθεσης Σκυροδέματος και της Δομοστατικής. Αξιολόγηση στατικών και εδαφομηχανικών εφαρμογών.....	- 30 -
1.3.1. Ειδικότερα θέματα του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών στην σύνθεση σκυροδέματος.....	- 32 -
1.3.2. Εφαρμογές του Σ.Ε.Δ στις Δομοστατικές Μελέτες.....	- 35 -
1.4. Κριτήρια αξιολόγησης διαγραμμάτων ελέγχου:.....	- 37 -
ARL, ATS, ANOS.....	- 37 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2.....	- 41 -
Η μεθοδολογία του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών (Σ.Ε.Δ.) στην παρασκευή Σκυροδέματος.....	- 41 -
2.1. Εισαγωγή.....	- 41 -
2.1.1. Διαγράμματα Ελέγχου και παράμετροι ελέγχου των διεργασιών παραγωγής σκυροδέματος.....	- 42 -

2.1.2. Παράμετροι Ελέγχου και Ενέργειες για την Αποκατάσταση της διεργασίας.....	- 43 -
2.1.3. Η αξιολόγηση της παραγωγής σκυροδέματος και τα πρότυπα προδιαγραφών.....	- 45 -
2.2. Στατιστικά Στοιχεία για την παραγωγή σκυροδέματος.....	- 46 -
2.2.1. Η Κανονική Κατανομή και ο ρόλος της στην εκτίμηση της αντοχής θραύσεως των δοκιμίων σκυροδέματος	- 46 -
2.2.2. Χαρακτηριστικά και Επιθυμητά όρια αντοχής θραύσεως δοκιμίων..	- 47 -
2.3. Το πρότυπο EN 206-1 και οι εμπλοκές που αυτό δημιουργεί στην αξιολόγηση των δοκιμίων σκυροδέματος	- 50 -
2.4. Η τυπική απόκλιση ως μέτρο αξιολόγησης των δοκιμίων σκυροδέματος και ο υπολογισμός της	- 53 -
2.4.1. Μεθοδολογίες Επαλήθευσης των αρχικών εκτιμήσεων της τυπικής απόκλισης του σκυροδέματος.....	- 56 -
2.4.2. Καθορισμός των ορίων αντοχής θραύσεως των δοκιμίων σκυροδέματος	- 57 -
2.5. Απλοποιημένα Διαγράμματα Δεδομένων και η χρήση τους στην αξιολόγηση της παραγωγής σκυροδέματος.....	- 59 -
2.5.1. Διαγράμματα Shewart.....	- 60 -
2.5.2. Κριτήρια δράσης Shewart.....	- 62 -
2.5.3. Έλεγχος δράσης βασισμένος στην τυπική απόκλιση	- 64 -
2.5.4. Εφαρμογή των γραφικών μεθοδολογιών Shewart στην παραγωγή σκυροδέματος	- 64 -
2.5.5. Τροποποιημένη εφαρμογή των διαγραμμάτων ελέγχου Shewart	- 65 -
2.6. Διαγράμματα CUSUM.....	- 70 -
2.6.1. Εισαγωγή	- 70 -
2.6.2. Εφαρμογή της μεθόδου CUSUM σε αριθμητικά δεδομένα παραγωγής σκυροδέματος	- 72 -
2.6.3. CUSUM τυπικής απόκλισης.....	- 74 -
2.6.4. CUSUM και έλεγχος συσχέτισης	- 74 -
2.6.5. Σχεδιασμός V-μάσκας	- 76 -

2.6.6. Ενέργειες στην CUSUM που απορρέουν από τις αλλαγές της διεργασίας	- 78 -
2.6.7. Πολυμεταβλητή και Πολυσυνθετική Ανάλυση Σκυροδέματος	- 80 -
2.7. Επιτάχυνση της Απόκρισης Επεξεργασίας – Αποφάσεων του Συστήματος Ελέγχου	- 83 -
2.7.1. Εξέταση αντοχής πρώιμων δοκιμίων	- 83 -
2.7.2. Αντιλήψεις για το σκυρόδεμα μίξεως	- 84 -
2.8. Καθοδήγηση των Συστημάτων Ελέγχου	- 89 -
2.8.1. Ανώμαλα Αποτελέσματα	- 89 -
2.8.2. Χειριζόμενα μίγματα που δεν ανήκουν στην ίδια οικογένεια σκυροδέματος	- 89 -
2.8.3. Χειρισμός μιγμάτων που δεν ελέγχονται από τις απαιτήσεις θλιπτικής αντοχής	- 90 -
2.8.4. Ρυθμοί Ελέγχου	- 92 -
2.8.5. Δράσεις του συστήματος σε συνδιασμό με τις προκύπτουσες μεταβολές	- 93 -
2.9. Το πρότυπο EN 206-1 και ο Κανονισμός Συμμόρφωσης σε Θλιπτική Αντοχή	- 95 -
2.9.1. Βασικές Απαιτήσεις	- 95 -
2.9.2. Περίοδος Αξιολόγησης	- 96 -
2.9.3. Κανόνες συμμόρφωσης για θλιπτική αντοχή	- 97 -
2.9.4. Επιτυγχάνοντας μια AOQL της τάξης του 5% με CUSUM	- 99 -
2.9.5. Μη συμμόρφωση	- 102 -
2.10. Ο Σχεδιασμός του Συστήματος Ελέγχου	- 103 -
2.11. Παραδείγματα Εφαρμογών της Μεθόδου CUSUM	- 104 -
2.11.1. Μίγμα Αναφοράς και Οικογένεια Σκυροδέματος	- 104 -
2.11.2. Κύρια Σχέση	- 105 -
2.11.3. Εφαρμογή Διορθώσεων	- 107 -
2.11.4. Υπολογισμός CUSUM	- 109 -
2.11.5. Ενέργειες συστημάτων CUSUM μετά από αλλαγές	- 112 -
2.11.6. Δεδομένα και αλλαγές στην τυπική απόκλιση	- 114 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3	- 118 -

Η τεχνική του συσσωρευμένου αθροίσματος προσαρμοσμένου κινδύνου (Risk Adjusted CUSUM – RACUSUM) για την εντός ελέγχου (on-line) παρακολούθηση της αντοχής θραύσεως για μονάδες παραγωγής σκυροδέματος.....	- 118 -
3.1. Εισαγωγή	- 118 -
3.2. Λεπτομέρειες και Μεθοδολογία εφαρμογής.....	- 120 -
3.3. Η μέθοδος CUSUM και οι ιστορικές απόπειρες «εμπλουτισμού» και «ενίσχυσης» των αποτελεσμάτων της.....	- 122 -
3.4. Κίνδυνοι στην παραγωγή ετοιμού σκυροδέματος και προσδοκίες από τον σχεδιασμό και την εφαρμογή των RACUSUM τεχνικών.....	- 126 -
3.5. Το Εννοιολογικό πλαίσιο της μεθόδου RACUSUM	- 128 -
3.5.1. Παρουσίαση των μεταβλητών και των παραμέτρων που χρησιμοποιεί το μοντέλο RACUSUM	- 128 -
3.5.2. Λειτουργία του μοντέλου CUSUM στην παρακολούθηση της παραγωγικής διαδικασίας	- 129 -
3.5.3. Τροποποίηση του μοντέλου CUSUM με την συμπερίληψη συναρτήσεων βαρών πιθανοφάνειας	- 130 -
3.6. Το προτεινόμενο μοντέλο προσαρμοσμένου κινδύνου CUSUM (RACUSUM)	- 132 -
3.7. Εφαρμογή του μοντέλου RACUSUM σε πραγματικά δεδομένα.....	- 134 -
3.7.1. Ανάλυση των τάσεων του γραφήματος του σχήματος 1.....	- 139 -
3.7.2. Παρουσίαση μιας ειδικής της τεχνικής V-μάσκας στα διαγράμματα CUSUM.....	- 139 -
3.7.3. Εφαρμογή της ειδικής τεχνικής V-μάσκας στα διαγράμματα CUSUM και RACUSUM	- 141 -
3.7.4. Απαιτούμενες δράσεις για την διόρθωση των μεταβολών.....	- 142 -
3.7.5. Αποτελέσματα και ενέργειες δράσης από την εφαρμογή των ανωτέρω μεθοδολογιών.....	- 143 -
3.8. Συμπεράσματα από την εφαρμογή της τεχνικής RACUSUM	- 145 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4.....	- 146 -
Προσέγγιση των τεχνικών Σ.Ε.Δ. όπως εφαρμόζονται στην πράξη για την αξιολόγηση της παραγωγής σκυροδέματος - Συμπεράσματα	- 146 -
4.1. Εισαγωγή	- 146 -

4.2. Οι δομικές μονάδες ενός εργοστασίου παραγωγής σκυροδέματος.....	147 -
4.3. Έλεγχος Παραγωγής – Εργοστάσιο σε πραγματική λειτουργία	149 -
4.3.1. Η παραγωγή σκυροδέματος και τα επίπεδα υγρασίας των υλικών σύνθεσης.....	149 -
4.3.2. Η αυτοματοποίηση και οι σύγχρονες ηλεκτρονικές μετρητικές διατάξεις στα εργοστάσια παραγωγής σκυροδέματος.....	151 -
4.3.3. Μορφές των παρατηρούμενων αποκλίσεων.....	152 -
4.3.4. Τα οφέλη στην παραγωγή από την κατηγοριοποίηση των σκυροδεμάτων σε οικογένειες	153 -
4.4. Εργοστάσιο παραγωγής σκυροδέματος και πρακτική εφαρμογή του ελέγχου. -	153 -
4.4.1. Επιλογή της Οικογένειας Σκυροδέματος.....	154 -
4.4.2. Καθορισμός των σχέσεων αναλογίας συστατικών και επιτεύξιμης αντοχής θραύσεως	154 -
4.4.3. Καθορισμός των δευτερευουσών σχέσεων της αναλογίας συστατικών σε σχέση με την επιτεύξιμη αντοχή θραύσεως.....	155 -
4.5. Συμμόρφωση και Έλεγχος Ταυτότητας Σκυροδέματος.....	155 -
4.5.1. Χρόνος Δειγματοληψίας.....	155 -
4.5.2. Χώρος Δειγματοληψίας.....	155 -
4.5.3. Συμμόρφωση σε αντοχή θραύσεως με βάση τους τύπους παραγωγής	156 -
4.5.4. Συμμόρφωση σε αντοχή θραύσεως σε συνεχή παραγωγή	156 -
4.5.5. Εναλλακτικές μέθοδοι συμμόρφωσης.....	157 -
4.5.6. Άλλες παράμετροι που χρησιμοποιούνται στον έλεγχο συμμόρφωσης....	157 -
4.6. Πρότυπα Συμμόρφωσης Σκυροδέματος.....	157 -
4.7. Ενέργειες κατά την μη-συμμόρφωση.....	158 -
4.8. Ενέργειες αποκατάστασης.....	158 -
4.9. Βεβαιώσεις (Πιστοποιήσεις) συμμόρφωσης.....	158 -
4.10. Ταυτοποίηση Σκυροδέματος και σχέση με την συμμόρφωση.....	159 -
4.11. Μηχανισμοί Διασφάλισης Ποιότητας Παραγωγής (ISO) και τα πρότυπα παραγωγής σκυροδέματος.....	159 -

4.12. Συστήματα Ελέγχου και Παραγωγή.....	- 160 -
4.12.1. Χρονικά πλαίσια ωρίμανσης δειγμάτων.....	- 160 -
4.12.2. Το πρότυπο ISO και το σύστημα ελέγχου	- 161 -
4.13. Γενικά Συμπεράσματα.....	- 161 -
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5.....	- 163 -
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	- 163 -

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Η μεθοδολογία του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών (Σ.Ε.Δ.)

1.1. Εισαγωγή

Κάθε άνθρωπος στην φάση αξιολόγησης για την ενδεχόμενη αγορά ενός προϊόντος (ή εκλογής μιας υπηρεσίας) αντιμετωπίζει το πρόβλημα της επιλογής ανάμεσα σε ομοειδή προϊόντα που ικανοποιούν την ίδια ανάγκη. Η επιλογή του προϊόντος από τον καταναλωτή καθορίζεται κυρίως από δύο παράγοντες, τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του και την τιμή του.

Η αναγνώριση αυτών των δύο κύριων παραγόντων οι οποίοι καθορίζουν τις αγοραστικές συνήθειες των καταναλωτών οδήγησε τις επιχειρήσεις στην αναζήτηση επιχειρηματικών τακτικών που θα οδηγήσουν στη βέλτιστη δυνατή ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Η αναζήτηση αυτή οδήγησε σε μια σειρά παρεμβάσεων στο επιχειρηματικό περιβάλλον οι οποίες τελικά διαμόρφωσαν νέα πλαίσια λειτουργίας και διοίκησης των επιχειρήσεων με τελικό στόχο και σκοπό, τη διαρκή βελτίωση της ποιότητας. Η βελτίωση των χαρακτηριστικών και η μείωση της τιμής ενός προϊόντος είναι άρρηκτα συνδεδεμένη με την εσωτερική δομή, οργάνωση και λειτουργία μιας εταιρείας που παράγει το εν λόγω προϊόν. Επομένως το προηγούμενο πρόβλημα βελτιστοποίησης (χαρακτηριστικών/κόστους) αναπόφευκτα οδηγεί στην βελτιστοποίηση της λειτουργίας και των δομών οργάνωσης της ίδιας της εταιρείας. Η στρατηγική - φιλοσοφία που επιζητεί τη συνεχή βελτίωση στην ποιότητα εκτέλεσης όλων των διεργασιών, προϊόντων και υπηρεσιών, σε μια επιχείρηση ονομάζεται Διοίκηση Ολικής Ποιότητας (Total Quality Management). Σύμφωνα με αυτή τη φιλοσοφία «η διοίκηση μιας εταιρείας πρέπει να κατευθύνει (λήψη αποφάσεων) και το εργατικό δυναμικό να ενεργεί σύμφωνα με τις οδηγίες (εκτέλεση εντολών) με στόχο τη βελτίωση της ποιότητας σε κάθε επίπεδο λειτουργίας της επιχείρησης». Σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των νέων πλαισίων λειτουργίας και διοίκησης των επιχειρήσεων διαδραματίζει ο Διεθνής Οργανισμός Τυποποίησης (ISO, International Standards Organization) ο οποίος με τα πρότυπα ISO καθορίζει τις διαδικασίες που πρέπει να υιοθετηθούν από μια επιχείρηση με

τελικό σκοπό τη συνεχή προαγωγή και διασφάλιση της ποιότητας των προϊόντων και λειτουργίας της ίδιας της εταιρείας. Σημαντικό ρόλο στις διαδικασίες αυτές κατέχει ο Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας (Statistical Quality Control).

Ο Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας αποτελεί την παλαιότερη και γνωστότερη μέθοδο ελέγχου παραγωγικών διεργασιών για τη βελτίωση της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων. Ένας από τους βασικούς στόχους του είναι η έγκαιρη ανακάλυψη μη συμμορφούμενων με τις προδιαγραφές παραγόμενων προϊόντων, γεγονός που σηματοδοτεί τη λήψη διορθωτικών ενεργειών για την απομάκρυνση των αιτιών (defects) που είναι υπεύθυνες για τις αποκλίσεις ποιότητας, συμβάλλοντας έτσι στη διατήρηση του επιπέδου των χαρακτηριστικών και της ποιότητας των προϊόντων. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι ο Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας επηρεάζει σημαντικά στην λήψη αποφάσεων σχετικά με τις προδιαγραφές, την παραγωγή και τον έλεγχο των παραγόμενων προϊόντων μιας επιχείρησης.

1.1.1. Η Έννοια της Ποιότητας και οι Διαστάσεις της

Η έννοια της ποιότητας εγκυμονεί έναν υποκειμενισμό, σύμφωνα με τον οποίο, μπορεί να οριστεί με πολλούς τρόπους. Οι περισσότεροι άνθρωποι έχουν μια διαισθητική άποψη για το τι είναι ποιότητα και τι συνδέουν με τα επιθυμητά χαρακτηριστικά - διαστάσεις που πρέπει να έχει ένα προϊόν (ή μια υπηρεσία). Οι διαστάσεις αυτές, βάσει των οποίων ο καταναλωτής αξιολογεί τα προϊόντα, καθορίζουν την τελική ποιότητα ενός προϊόντος και σχετίζονται με την ποιότητα του σχεδιασμού και τη διαδικασία παραγωγής του προϊόντος.

Σύμφωνα με τα όσα αναφέρθηκαν για τις διαστάσεις της ποιότητας μπορούμε να ορίσουμε ότι ποιότητα είναι η προσαρμογή των χαρακτηριστικών ενός προϊόντος (ή υπηρεσίας) στις απαιτήσεις του καταναλωτή - χρήστη, δηλαδή ότι ποιότητα σημαίνει καταλληλότητα προς χρήση (παραδοσιακός ορισμός της ποιότητας). Έτσι η ποιότητα μπορεί να «μετρηθεί» μέσω της ικανοποίησης που προσφέρει το προϊόν στον καταναλωτή. Δυστυχώς ο παραπάνω ορισμός έχει συσχετιστεί περισσότερο με την έννοια της συμμόρφωσης των παραγόμενων προϊόντων με τις προδιαγραφές που πρέπει αυτά να πληρούν, και λιγότερο με την έννοια της ποιότητας που απορρέει από τις μεθόδους και τεχνικές σχεδιασμού των. Για παράδειγμα, όλα τα αυτοκίνητα αποσκοπούν στην ικανοποίηση της ανάγκης ασφαλούς μεταφοράς των ανθρώπων, ωστόσο διαφέρουν σε μέγεθος, εμφάνιση, απόδοση, εξοπλισμό, κτλ.

Οι ανωτέρω διαφορές οφείλονται σε διαφορετικές σχεδιαστικές προσεγγίσεις που εξαρτώνται από τον τύπο των υλικών που χρησιμοποιούνται στην παραγωγή, τις προδιαγραφές των εξαρτημάτων, το σχεδιασμό και την ανάπτυξη νέων κινητήρων και νέων τεχνολογιών, των μακροσκοπικών χαρακτηριστικών που μέσω του σχεδιασμού επιθυμούμε να επιτύχουμε (π.χ. ευρυχωρία, ταχύτητα, ενεργητική-παθητική ασφάλεια). κτλ.

Αποφεύγοντας έτσι τα υποκειμενικά χαρακτηριστικά που εύκολα μπορούμε να προσδώσουμε στον ορισμό της έννοιας της ποιότητας, ένας νεότερος ορισμός ορίζει την ποιότητα ως αντιστρόφως ανάλογη της μεταβλητότητας των χαρακτηριστικών της παραγωγικής διαδικασίας που προσδιορίζουν το προϊόν. Ο τελευταίος ορισμός αποσκοπεί στην επικέντρωση στις διεργασίες σχεδιασμού και κατασκευής για την ελαχιστοποίηση των μεταβολών των τεχνικών χαρακτηριστικών ενός προϊόντος ασχέτως των υποκειμενικών χαρακτηριστικών που οδήγησαν στην διαμόρφωση, επιλογή και συμπερίληψη τους στο προϊόν.

1.1.2. Ιστορική Αναδρομή της Ποιότητας

Ο ποιοτικός έλεγχος, όπως προαναφέρθηκε είναι μια διαδικασία κατά την οποία καταγράφονται οι αποκλίσεις των προϊόντων, υπηρεσιών από δεδομένες προδιαγραφές. Για να εξασφαλισθεί όμως ότι το τελικό προϊόν, θα είναι σύμφωνο με τις συγκεκριμένες προδιαγραφές, γίνεται χρήση ενός συστήματος διασφάλισης ποιότητας. Όταν οι εφαρμοζόμενοι έλεγχοι στα προϊόντα ή στις υπηρεσίες, είναι περιοδικοί, τότε μειώνεται η πιθανότητα να εμφανιστούν συστηματικές παρεκκλίσεις ή ελαττώματα από το μέσο επίπεδο της εκάστοτε διεργασίας στην πορεία του χρόνου. Όταν ελέγχονται, για παράδειγμα όλα τα Εργαστήρια παραγωγής οπλισμένου σκυροδέματος (plants) ενός Τομέα Δομοστατικής, εκμηδενίζεται ή τουλάχιστον ελαττώνεται σημαντικά η πιθανότητα εμφάνισης σφαλμάτων ή αστοχιών στην σύνθεση και κατασκευή του σκυροδέματος. Από την έγκαιρη διάγνωση ενδεχόμενων αστοχιών μειώνεται το τελικό κόστος κατασκευής του ίδιου του προϊόντος (σκυροδέματος) αλλά και η ενδεχόμενη πιθανή αστοχία μιας κατασκευής που θα κάνει χρήση αυτού του προϊόντος ως δομικό στοιχείο της. Τελικά, αποδεικνύεται ότι γενικότερα μέσω του ελέγχου διεργασιών μειώνεται το αντίστοιχο κόστος παραγωγής ή προώθησης προϊόντων - υπηρεσιών.

Αντιθέτως, αν οι ποιοτικοί έλεγχοι είναι ελάχιστοι, ή στην χειρότερη περίπτωση δε συντελούνται καθόλου, τότε το συνολικό κόστος επαυξάνεται από τα ελαττωματικά Οι εκτεταμένες χρήσεις του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών στον τομέα της Δομοστατικής

προϊόντα τα οποία θα τύχουν αντικείμενα πώλησης και στην συνέχεια επιστροφής προς την κατασκευάστρια εταιρεία (εφόσον κάτι τέτοιο είναι δυνατόν). Η τελευταία φάση «τραυματίζει» σημαντικά την εμπορική αξιοπιστία μιας εταιρείας κατά την παραγωγή ενός προϊόντος ή την παροχή μιας υπηρεσίας. Στην παραγωγή σκυροδέματος μία ενδεχόμενη αστοχία έχει πολλαπλάσιο κόστος δημιουργώντας επιπλέον μία «αποθετική ζημιά» στον αποδέκτη του προϊόντος δεδομένου ότι αυτό έχει ήδη χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή έτερου προϊόντος (π.χ. κτιριακή κατασκευή, γεφυροποιία, οδοποιία, κλπ).

Ο μη περιοδικός λοιπόν έλεγχος είναι αυτός που συντελεί τελικά στην αύξηση της τιμής ενός προϊόντος (συνυπολογίζοντας τις προκύπτουσες αποθετικές ζημιές) και όχι ο περιοδικός ποιοτικούς ελέγχους (όπως ίσως λανθασμένα πιστεύεται). Επομένως, ο καθορισμός ενός κατάλληλου αριθμού ελέγχων ποιότητας, δίνει τα καλύτερα αποτελέσματα στην ελαχιστοποίηση του επιπλέον κόστους που πηγάζει από την διαδικασία του ποιοτικού ελέγχου όπως αυτή η τιμή επιμερίζεται ανά μονάδα προϊόντος στον αποδέκτη (πελάτη/καταναλωτή).

Ο Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας (Statistical Quality Control) είναι ένα κρίσιμο εργαλείο της επιχείρησης που επηρεάζει αποφάσεις σχετικές με τις προδιαγραφές, την παραγωγική διαδικασία και τον έλεγχο των παραγόμενων προϊόντων. Για την αποτελεσματική χρήση του Στατιστικού Ελέγχου Ποιότητας απαιτείται η ενσωμάτωσή του σε ένα πλαίσιο λειτουργίας και διοίκησης της επιχείρησης που έχει ως στόχο τη διαρκή βελτίωση της ποιότητας σε όλα τα επίπεδα της επιχείρησης, γνωστού ως Διοίκησης Ολικής Ποιότητας (Total Quality Management ή Total Quality Assurance). Θα μπορούσαμε να πούμε ότι ο Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας αποτέλεσε τον προάγγελο της Διοίκησης Ολικής Ποιότητας. Η ιστορία της ποιότητας ξεκινά στις αρχές του 20ου αιώνα με τη δημιουργία των πρώτων εργαστηρίων για πρότυπα στη Μεγάλη Βρετανία και με τη γραμμή παραγωγής στην αυτοκινητοβιομηχανία Ford στο Highland Park στις ΗΠΑ (1905). Τα βήματα στη συνέχεια ήταν αλματώδη και σήμερα η ποιότητα έχει αναδειχθεί σε κύριο μέλημα τόσο της βιομηχανίας όσο και των υπηρεσιών.

Στον πίνακα της επόμενης σελίδας, παρουσιάζονται τα κυριότερα ιστορικά σημεία στην ανάπτυξη της ποιότητας από το 1900 μέχρι σήμερα.

Πίνακας 1.2. Ιστορική αναδρομή της ποιότητας

1901	Τα πρώτα εργαστήρια προτύπων (standards) ιδρύονται στη Μ. Βρετανία
1907	Η AT&T Bell Laboratories αρχίζει τη συστηματική επιθεώρηση και έλεγχο προϊόντων και υλικών
1919	Η Ένωση Τεχνικών Επιθεωρητών ιδρύεται στην Αγγλία η οποία αργότερα μετονομάζεται σε Ινστιτούτο Διασφάλισης της Ποιότητας
1920	Στα εργαστήρια της AT&T Bell Laboratories ιδρύεται τμήμα ποιότητας
1924	Ο W. A. Shewhart εισάγει τα διαγράμματα ελέγχου σε ένα Technical Report στην AT&T Bell
1928	Το δειγματοληπτικό σχέδιο αποδοχής σωρού αναπτύσσεται από τους Dodge και Romig
1931	Ο W.A. Shewhart εκδίδει το περιοδικό Economic Control of Quality of Manufactured Product
1932	Ο W.A. Shewhart δίνει διαλέξεις σε στατιστικές μεθόδους στην παραγωγή και στα διαγράμματα ελέγχου στο Πανεπιστήμιο του Λονδίνου
1938	Ο W.E. Deming προσκαλεί τον Shewhart για σεμινάρια στα διαγράμματα ελέγχου στο U.S. Department of Agriculture Graduate School
1940	Το Υπουργείο Πολέμου των Η.Π.Α. εκδίδει ένα οδηγό για την ανάλυση δεδομένων με χρήση διαγραμμάτων ελέγχου
1946	Ιδρύεται η American Society for Quality Control (ASQC)
1946	Ο W.E. Deming προσκαλείται στην Ιαπωνία για να δώσει σεμινάρια Στατιστικού Ποιοτικού Ελέγχου
1948	Ο Καθηγητής G. Taguchi αρχίζει τη μελέτη των πειραματικών σχεδιασμών
1950	Ο W.E. Deming αρχίζει την εκπαίδευση ανώτατων στελεχών βιομηχανιών της Ιαπωνίας
1950	Ο K. Ishikawa εισάγει το διάγραμμα αιτίου-αποτελέσματος (cause and effect diagram)
1954	Ο J. M. Juran προσκαλείται από την Ιαπωνία για να δώσει διαλέξεις σε θέματα διοίκησης και βελτίωσης της ποιότητας. Ο E.S. Page εισάγει το διάγραμμα ελέγχου CUSUM
1959	Ο S. Roberts εισάγει το διάγραμμα ελέγχου EWMA. Ξεκινά η έκδοση του επιστημονικού περιοδικού Technometrics
1960	Η ιδέα των κύκλων ποιότητας εισάγεται από τον K. Ishikawa
1969	Τα περιοδικά Quality Progress και Journal of Quality Technology αρχίζουν να εκδίδονται
1975	Εμφανίζονται τα πρώτα βιβλία σε σχεδιασμό πειραμάτων
1989	Αρχίζει να εκδίδεται το περιοδικό Quality Engineering. Η Motorola εισάγει την έννοια six-sigma.
1990	Σταδιακή αύξηση της ζήτησης στην βιομηχανία για πιστοποίηση κατά ISO 9000
1997	Η προσέγγιση six-sigma της Motorola υιοθετείται και από άλλες βιομηχανίες

Ειδικότερα, στην Ιαπωνία, μετά το τέλος του πολέμου όπου οι επιχειρήσεις άρχισαν να επαναλειτουργούν μετά την καταστροφή, η ανέλιξη νεαρών ατόμων στην ιεραρχία των επιχειρήσεων που ήταν δεκτικά σε νέες ιδέες, οδήγησε διακεκριμένους Αμερικανούς επιστήμονες να επισκεφθούν τότε την Ιαπωνία, αφού οι ιδέες τους ήταν πιθανό να βρουν πρόσφορο έδαφος αποδοχής και εφαρμογής.

Ένας από αυτούς ήταν ο *Edward Deming*, ο οποίος ήταν υπεύθυνος για την ποιοτική επανάσταση που επιτεύχθηκε εκεί και κατέληξε στη διεθνή κυριαρχία της Ιαπωνικής βιομηχανίας. Το κεντρικό σημείο της φιλοσοφίας του *Deming* ήταν η μείωση της μεταβλητότητας στην παραγωγική διαδικασία με ιδιαίτερη έμφαση στη στατιστική επιμέλεια και έλεγχο.

Τα 14 βασικά σημεία της φιλοσοφίας του *Deming* παρουσιάζονται στον πίνακα:

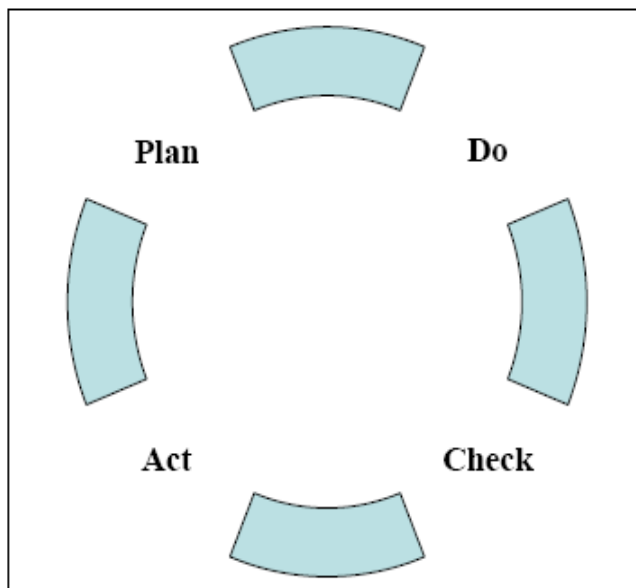
Πίνακας 1.3. Οι 14 κανόνες του *Deming*

Κανόνας 1:	Δημιούργησε το κλίμα για ένα σταθερό πρόγραμμα που να αποβλέπει στη συνεχή βελτίωση των προϊόντων και των υπηρεσιών
Κανόνας 2:	Υιοθέτησε τη νέα φιλοσοφία της απόρριψης της κακής δουλειάς, των ελαττωματικών και των μη ικανοποιητικών υπηρεσιών
Κανόνας 3:	Μην βασίζεστε στον τελικό έλεγχο όλης της παραγωγής για την επίτευξη υψηλής ποιότητας
Κανόνας 4:	Σταματήστε τη συνήθεια αγοράς προμηθειών με τη χαμηλότερη τιμή
Κανόνας 5:	Προσπαθήστε να βελτιώνεται χωρίς διακοπή όλα τα συστήματα παραγωγής και υπηρεσιών
Κανόνας 6:	Θεσπίστε ένα πρόγραμμα σύγχρονης εκπαίδευσης και εφαρμόστε το σε όλους τους εργαζόμενους
Κανόνας 7:	Υιοθετήστε σύγχρονους τρόπους ελίβλεψης
Κανόνας 8:	Εξαλείψτε το φόβο. Μη διστάζετε να ρωτάτε και να αναφέρετε προβλήματα
Κανόνας 9:	Εξαφανίστε τα εμπόδια μεταξύ των τμημάτων της επιχείρησης. Η από κοινού δουλειά μεταξύ των διαφόρων τμημάτων της επιχείρησης είναι απαραίτητο στοιχείο για την ανάπτυξη της ποιότητας
Κανόνας 10:	Εξαλείψτε τους στόχους και τα συνθήματα για μηδέν ελαττωματικά προϊόντα
Κανόνας 11:	Εξαφανίστε τους αριθμητικούς στόχους
Κανόνας 12:	Εξαλείψτε τα εμπόδια που αφαιρούν από τον εργαζόμενο το δικαίωμα να νιώθει υπερήφανος για την δουλειά του
Κανόνας 13:	Εφαρμόστε ένα πρόγραμμα συνεχούς ενημέρωσης και εκπαίδευσης για όλους τους εργαζομένους
Κανόνας 14:	Δημιουργήστε ένα ανώτατο κλιμάκιο διοίκησης το οποίο θα εργαστεί σθεναρά για την επίτευξη των πρώτων 13 κανόνων

Στόχος λοιπόν, της Διοίκησης Ολικής Ποιότητας είναι η συνεχής βελτίωση στην ποιότητα εκτέλεσης όλων των διεργασιών, προϊόντων και υπηρεσιών, σε μια επιχείρηση.

Αν προσεγγίσουμε το θέμα αλγοριθμικά, αυτό επιτυγχάνεται με τέσσερα βήματα τα οποία επαναλαμβάνονται το ένα μετά το άλλο και όταν ολοκληρωθεί το τελευταίο βήμα η διαδικασία ξεκινά πάλι από την αρχή.

Τα βήματα αυτά φαίνονται στον τροχό του Deming:



Σχήμα 1.1. Ο τροχός του Deming

Ένας δεύτερος ακαδημαϊκός, εξίσου γνωστός για τη συμβολή του στην παραγωγή προϊόντων υψηλής ποιότητας στην Ιαπωνία, ήταν ο Joseph Juran. Όπως και ο *Deming*, υποστήριξε τη μείωση της μεταβλητότητας στις διαδικασίες ως τον πιο ενδεδειγμένο τρόπο για τη βελτίωση της ποιότητας. Κεντρική αρχή της φιλοσοφίας του είναι η έμφαση που δίνει στις δράσεις της διοίκησης για την βελτίωση της ποιότητας. Υποστήριξε ότι τα συστήματα που ελέγχονται από τη διεύθυνση είναι κυρίως υπεύθυνα (80%) για τη βελτίωση της ποιότητας ενώ ένα μικρό μέρος (20%) οφείλεται στην απόδοση του εργατικού δυναμικού.

Ο Philip Crosby θεωρείται ως ο τρίτος μεγάλος θεωρητικός της Διοίκησης Ολικής Ποιότητας αν και η επιρροή του δεν ήταν τόσο μεγάλη, όσο αντίστοιχα των *Deming* και *Juran*. Το κεντρικό σημείο της φιλοσοφίας του ήταν ότι η ποιότητα πρέπει να κτίζεται και όχι να επιθεωρείται. Η εφαρμογή των ιδεών του *Crosby* βασίζεται κυρίως σε αλλαγές στη συμπεριφορά και νοοτροπία του εργατικού δυναμικού της επιχείρησης παρά στη χρήση του Στατιστικού Ελέγχου Ποιότητας. Αναγνώρισε την τεράστια σπατάλη που παρουσιαζόταν κατά τις διαδικασίες επιθεώρησης και επιδιόρθωσης ελαττωματικών προϊόντων και την

ανάγκη για μείωση των δαπανών αυτών. Ο *Crosby* ήταν υπέρμαχος του προγράμματος *Μηδέν Ελαττωματικά (Zero Defects Program)*, το οποίο έχει δημιουργήσει πολλές παρανοήσεις και διαφωνίες. Ο *Crosby* πίστευε ότι η αποδοχή ορισμένου ποσοστού ελαττωματικών στην παραγωγή είναι απαράδεκτη και ότι κάθε εργαζόμενος έχει την ευθύνη να κάνει την οποιαδήποτε δουλειά σωστά από την αρχή, να προλαμβάνει λάθη, σε αντίθεση με τους *Deming* και *Juran* που πίστευαν ότι οποιεσδήποτε ατέλειες οφείλονται στο σχεδιασμό των συστημάτων παραγωγής και όχι στους εργαζομένους.

Αξίζει να σημειωθεί ότι παρά τις διαφορές στην προσέγγιση του θέματος μεταξύ των τριών (*Deming*, *Juran*, *Crosby*), εντούτοις προκύπτουν και αρκετά κοινά σημεία στις θεωρίες τους όπως: (α) η επιθεώρηση δεν αποτελεί την απάντηση στη βελτίωση της ποιότητας, (β) η ανάμειξη και καθοδήγηση από την ανώτερη διεύθυνση είναι ζωτικής σημασίας για τη δημιουργία της απαραίτητης κουλτούρας αφοσιωμένης στην ποιότητα, και (γ) ένα πρόγραμμα για ποιότητα απαιτεί προσπάθειες από ολόκληρο τον οργανισμό και μακροπρόθεσμη δέσμευση καθώς επίσης και την απαραίτητη επένδυση για επιμόρφωση.

1.1.3. Συνιστώσες του Στατιστικού Ελέγχου Ποιότητας

Ο Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας αποτελείται από ένα σύνολο μεθόδων στατιστικής ανάλυσης δεδομένων. Το σύνολο αυτό μπορεί να χωριστεί σε τρία βασικά υποσύνολα που το καθένα περιέχει στατιστικές μεθόδους προσανατολισμένες σε διαφορετικές φάσεις της παραγωγικής διαδικασίας.

Τα τρία υποσύνολα είναι τα ακόλουθα:

- Σχεδιασμός και Ανάλυση Πειραμάτων (*Design of Experiments*)
- Στατιστικός Έλεγχος Διεργασιών (*Statistical Process Control*)
- Δειγματοληψία Αποδοχής (*Acceptance Sampling*)

Ο Σχεδιασμός και η Ανάλυση Πειραμάτων περιέχει όλες εκείνες τις στατιστικές τεχνικές οι οποίες μας βοηθούν στην ανακάλυψη της επίδρασης που έχουν τα διάφορα επίπεδα των παραγόντων (μεταβλητών) που επηρεάζουν τις ποιοτικές παραμέτρους του τελικού προϊόντος και συνεπώς διαδραματίζει σημαντικό ρόλο στη βέλτιστη σχεδίαση της παραγωγικής διεργασίας. Ο Στατιστικός Έλεγχος Διεργασιών περιέχει στατιστικές τεχνικές

που είναι απαραίτητες για τον έλεγχο της παραγωγικής διεργασίας κατά την διάρκεια της παραγωγής των προϊόντων. Η Δειγματοληψία Αποδοχής περιέχει στατιστικές τεχνικές (δειγματοληπτικές) που είναι απαραίτητες για να αποφασίσουμε αν μια συγκεκριμένη παρτίδα (σωρός) προϊόντων θα γίνει δεκτή ή θα απορριφθεί.

1.2. Το πρόβλημα του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών

Σε κάθε παραγωγική διεργασία, ανεξάρτητα από το πόσο καλά σχεδιασμένη είναι και το πόσο προσεκτικά επιβλέπεται και συντηρείται, θα υπάρχει πάντα μια μορφή φυσικής μεταβλητότητας που θα τη συνοδεύει. Δηλαδή, όσο καλά ρυθμισμένα και να είναι τα μηχανήματα, όσο ικανοί και να είναι οι χειριστές των μηχανημάτων, όσο ικανοποιητική και να είναι η πρώτη ύλη, ποτέ δύο παραγόμενα προϊόντα δεν θα είναι τα ίδια (θα υπάρχει κάποιο μετρήσιμο μέγεθος του προϊόντος του οποίου η τιμή θα είναι διαφορετική ανάμεσα σε δύο προϊόντα). Αυτή η φυσική μεταβλητότητα είναι το αθροιστικό αποτέλεσμα πολλών μικρών αιτιών οι οποίες αναφέρονται ως *κοινές ή συνήθεις ή τυχαίες αιτίες μεταβλητότητας* (common or chance causes of variation). Η φυσική μεταβλητότητα είναι συνήθως μικρή σε μέγεθος και δεν μπορεί να αποδοθεί σε ελέγξιμους παράγοντες. Μια διεργασία (σύστημα) η οποία λειτουργεί μόνο με την παρουσία φυσικής μεταβλητότητας λέμε ότι είναι *εντός (στατιστικού) ελέγχου* διεργασία (in – statistical- control process), ή ότι λειτουργεί σε **ευσταθή** κατάσταση (stable state).

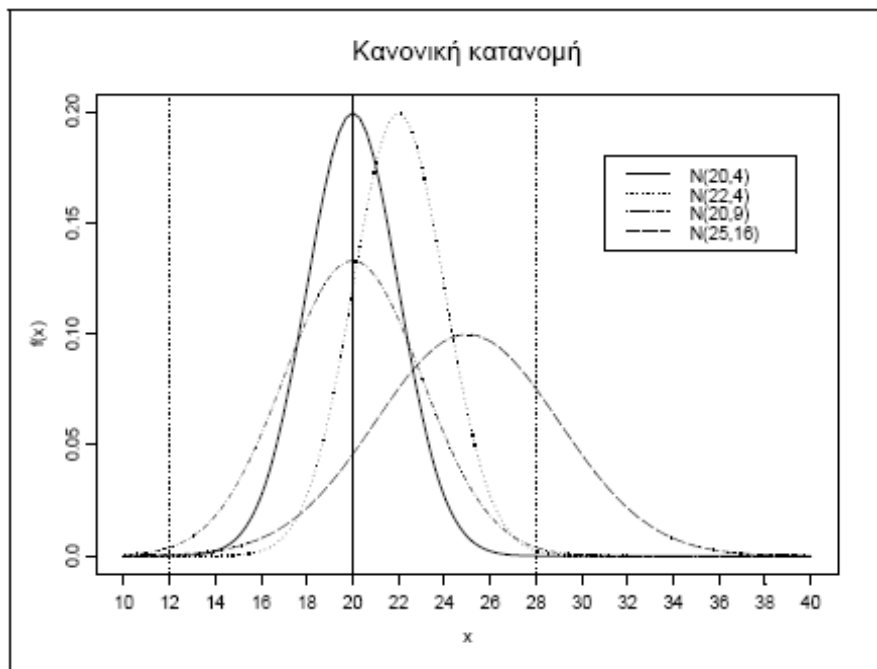
Όμως σε μια διεργασία μπορεί να εμφανίζονται περιστασιακά και άλλες μορφές μεταβλητότητας οι οποίες δεν οφείλονται σε τυχαίες αιτίες αλλά αφορούν τη συστηματική αλλαγή στο επίπεδο κάποιου ή κάποιων παραγόντων που καθορίζουν την ποιότητα του προϊόντος. Αυτές οι μορφές μεταβλητότητας οφείλονται συνήθως στους ακόλουθους λόγους: (α) λανθασμένα ρυθμισμένες μηχανές, (β) λάθη των χειριστών των μηχανημάτων, και (γ) κακής ποιότητας ή ελαττωματική πρώτη ύλη. Η μεταβλητότητα που οφείλεται στους παραπάνω λόγους είναι σε μέγεθος πολύ μεγαλύτερη της φυσικής μεταβλητότητας και η παρουσία της οδηγεί συνήθως σε μη αποδεκτά επίπεδα λειτουργίας της παραγωγικής διεργασίας. Αυτή η μεταβλητο-τητα αναφέρεται ως ειδική μεταβλητότητα και οι αιτίες που οδηγούν σε αυτή ονομάζονται ειδικές ή προσδιορισμένες αιτίες μεταβλητότητας (special or assignable causes of variation).

Μια διεργασία (σύστημα) η οποία λειτουργεί με την παρουσία ειδικής μεταβλητότητας λέμε ότι είναι εκτός – στατιστικού - ελέγχου διεργασία (out of (statistical) control process) ή ότι λειτουργεί σε *ασταθή κατάσταση* (unstable state). Άμεσα συνδεδεμένη έννοια με την παραγωγή ενός προϊόντος είναι τα *όρια προδιαγραφών των ποιοτικών χαρακτηριστικών* του προϊόντος τα οποία καθορίζονται στη φάση σχεδιασμού του. Αυτά είναι το *κάτω και το άνω όριο προδιαγραφών* (lower and upper specification limits, LSL and USL) και εντός αυτών των ορίων πρέπει να βρίσκονται οι τιμές του

ποιοτικού χαρακτηριστικού για κάθε παραγόμενο προϊόν προκειμένου να είναι ποιοτικά αποδεκτό.

Επίσης, στη φάση σχεδιασμού του προϊόντος ορίζεται και μια επιθυμητή τιμή για το ποιοτικό χαρακτηριστικό που ονομάζεται *τιμή στόχος* T που είναι συνήθως το μέσο του διαστήματος $[LSL, USL]$. Κάτω από συνθήκες φυσικής μεταβλητότητας η συντριπτική πλειοψηφία των τιμών του ποιοτικού χαρακτηριστικού στα παραγόμενα προϊόντα βρίσκεται εντός των ορίων των προδιαγραφών. Όμως κάτω από συνθήκες ειδικής μεταβλητότητας δεν ισχύει το ίδιο. Για παράδειγμα ας υποθέσουμε ότι η ποιότητα ενός προϊόντος εκφράζεται με την τιμή ενός μετρήσιμου ποιοτικού χαρακτηριστικού του για το οποίο $T = 20$, $LSL = 12$, $USL = 28$, και ότι κάτω από συνθήκες φυσικής μεταβλητότητας (εντός ελέγχου διεργασία) οι τιμές του ποιοτικού χαρακτηριστικού στα παραγόμενα προϊόντα περιγράφονται από την κατανομή $N(20, 4)$.

Το αποτέλεσμα που επιφέρουν οι κοινές και οι ειδικές αιτίες μεταβλητότητας στην παραγωγική διεργασία περιγράφεται στο ακόλουθο σχήμα:



Υπό συνθήκες φυσικής μεταβλητότητας σχεδόν όλα τα παραγόμενα προϊόντα πληρούν τις προδιαγραφές. Η εμφάνιση ειδικής μεταβλητότητας μπορεί να επιφέρει αλλαγή στην κατανομή των τιμών του ποιοτικού χαρακτηριστικού, είτε αλλάζοντας (μετατοπίζοντας, *shift*) μόνο το μέσο της κατανομής ($N(22,4)$), είτε αλλάζοντας μόνο τη διακύμανση της κατανομής ($N(20,9)$), είτε αλλάζοντας το μέσο και τη διακύμανση της κατανομής ταυτόχρονα ($N(25,16)$). Σε κάθε περίπτωση, η επίδραση της ειδικής

μεταβλητότητας μεταφράζεται σε αύξηση των παραγόμενων προϊόντων που έχουν τιμές ποιοτικού χαρακτηριστικού εκτός των ορίων προδιαγραφών.

Το κύριο αντικείμενο του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών είναι η έγκαιρη ανίχνευση της εμφάνισης ειδικών αιτιών μεταβλητότητας σε μια διεργασία έτσι ώστε να προχωρήσουμε σε έρευνα και να προβούμε στις απαραίτητες διορθωτικές ενέργειες προτού κατασκευαστούν αρκετά προϊόντα μη συμμορφωμένα με τις προδιαγραφές. Τα *διαγράμματα ελέγχου (control charts)* είναι μια τεχνική που χρησιμοποιείται ευρέως για την ανίχνευση σε πραγματικό χρόνο της εμφάνισης ειδικών αιτιών μεταβλητότητας σε μια διεργασία (*on-line process-monitoring*).

Ειδικά για το προηγούμενο παράδειγμα θα μας ενδιέφερε η κατασκευή διαγραμμάτων ελέγχου για την παρακολούθηση της μέσης τιμής και της διακύμανσης (ή της τυπικής απόκλισης) του ποιοτικού χαρακτηριστικού μέσω τυχαίων δειγμάτων από τα παραγόμενα προϊόντα. Για να είναι αποτελεσματικός ο Στατιστικός Έλεγχος Διεργασιών θα πρέπει να συνοδεύεται απαραίτητα με ένα *εκτός ελέγχου πρόγραμμα δράσης (out-of-control action plan, OCAP)* το οποίο θα πρέπει να ενεργοποιείται κάθε φορά που το διάγραμμα ελέγχου παρέχει ενδείξεις εμφάνισης ειδικών αιτιών μεταβλητότητας στη διεργασία. Το *OCAP* περιγράφει την ακολουθία των ενεργειών που πρέπει να γίνουν με σκοπό την εξάλειψη των ειδικών αιτιών μεταβλητότητας σε μια διεργασία και ο σχεδιασμός του απαιτεί τη συνεργασία ατόμων από διάφορα τμήματα της επιχείρησης.

Οι γενικές αρχές κατασκευής και χρήσης των διαγραμμάτων ελέγχου θα παρουσιαστούν σε επόμενες παραγράφους. Ωστόσο πριν κλείσουμε την παρούσα παράγραφο κρίνεται σκόπιμο να αναφερθούμε στις έννοιες *μη συμμορφωμένο ή ελαττωματικό προϊόν (nonconforming or defective product)* και *αριθμός ελαττωμάτων ή ατελειών (defects or nonconformities)* ενός προϊόντος προκειμένου να αποφύγουμε τη συσχέτιση των διαγραμμάτων ελέγχου μόνο με την περίπτωση που οι τιμές του ποιοτικού χαρακτηριστικού του προϊόντος περιγράφονται από μια *συνεχή τυχαία μεταβλητή (variable)*, δηλαδή από μια μεταβλητή που παίρνει τιμές σε μια συνεχή κλίμακα (όπως το παράδειγμα που εξετάσαμε προηγουμένως).

Με τον όρο *μη συμμορφωμένο ή ελαττωματικό προϊόν* ονομάζουμε το προϊόν για το οποίο τουλάχιστον ένα ποιοτικό χαρακτηριστικό του έχει τιμή η οποία βρίσκεται εκτός των ορίων προδιαγραφών, δηλαδή παρουσιάζει τουλάχιστον ένα ελάττωμα ή ατέλεια. Όμως σε πολλές περιπτώσεις ανάλογα με τον αριθμό και τη σοβαρότητα των ελαττωμάτων (ατελειών) που παρουσιάζει ένα προϊόν μπορεί να χαρακτηριστεί συμμορφωμένο ή μη ελαττωματικό προϊόν, και να προωθηθεί προς πώληση στην αγορά. Για παράδειγμα, ένα ρούχο μπορεί να χαρακτηριστεί ελαττωματικό εάν το τελικό προϊόν έχει ελαττώματα στις

ραφές, ή ελαττώματα στο χρώμα, ή ελαττώματα στο ύφασμα, κτλ. Όμως αρκετές φορές το ρούχο δε θα χαρακτηριστεί (πρακτικά) ελαττωματικό αν παρουσιάζει μόνο ένα από τα παραπάνω ελαττώματα, ή ακόμα και αν παρουσιάζει περισσότερα ελαττώματα, αλλά σε μικρότερο βαθμό.

Σε τέτοιες περιπτώσεις κατασκευάζονται διαγράμματα ελέγχου για τον αριθμό των ελαττωματικών προϊόντων ή ακόμα και για τον αριθμό των ελαττωμάτων ενός προϊόντος που ως ποιοτικά χαρακτηριστικά ενός προϊόντος δεν μετρώνται σε μια συνεχή κλίμακα αλλά παίρνουν αριθμήσιμο πλήθος τιμών και περιγράφονται με *διακριτές τυχαίες μεταβλητές (attributes)*.

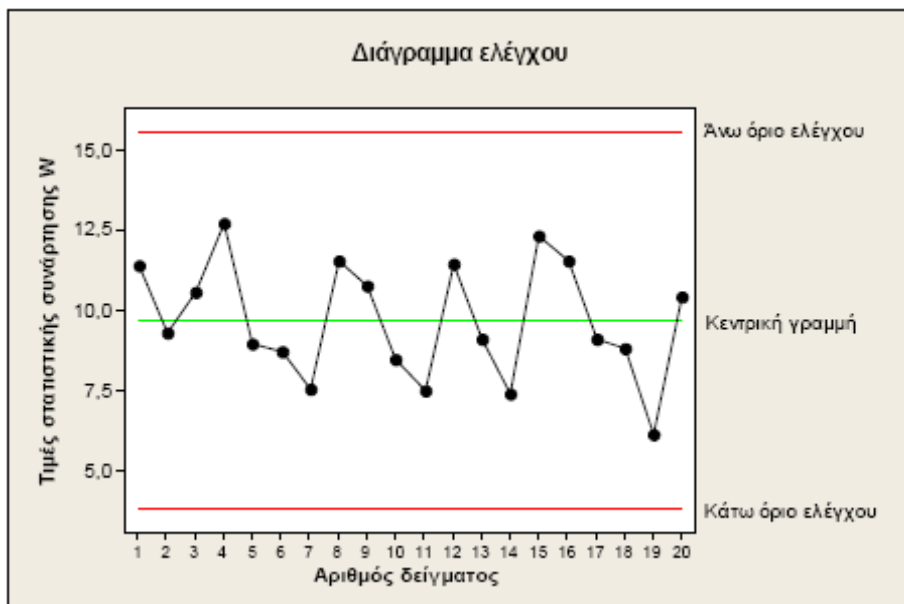
Τέτοια διαγράμματα χρησιμοποιούνται και στην περίπτωση που η προς πώληση μονάδα είναι μια συσκευασία η οποία περιέχει έναν αριθμό προϊόντων και η οποία μπορεί να χαρακτηριστεί ως ελαττωματική ή μη, βάσει του αριθμού των ελαττωματικών προϊόντων που περιέχει. Σύμφωνα με τα όσα προαναφέρθηκαν, στα διαγράμματα ελέγχου μπορούμε να διακρίνουμε δύο βασικές κατηγορίες ανάλογα με το είδος της μεταβλητής που περιγράφει το ποιοτικό χαρακτηριστικό του προϊόντος:

- διαγράμματα ελέγχου για *συνεχή* χαρακτηριστικά – μεταβλητές (charts for variables)
- διαγράμματα ελέγχου για *διακριτά* χαρακτηριστικά – ιδιότητες (charts for attributes).

1.2.1. Περιγραφή και Χρήση ενός Διαγράμματος Ελέγχου

Στις παραγωγικές διεργασίες μας ενδιαφέρει η παρακολούθηση της συμπεριφοράς μιας κρίσιμης ποσότητας ενός (μετρήσιμου) χαρακτηριστικού X (τυχαία μεταβλητή) των προϊόντων που παράγονται (για παράδειγμα το χαρακτηριστικό X μπορεί να είναι μήκος, βάρος, όγκος προϊόντων). Η παρακολούθηση της κρίσιμης ποσότητας βασίζεται σε μετρήσεις του χαρακτηριστικού X (τυχαία μεταβλητή), που προκύπτουν από την επιλογή τυχαίων δειγμάτων προϊόντων από την παραγωγή σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, έστω τα $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots$. Χρησιμοποιώντας τα τυχαία δείγματα $\mathbf{X}_1, \mathbf{X}_2, \dots$ υπολογίζουμε την τιμή $W_i = g(\mathbf{X}_i)$, $i=1,2,\dots$, μιας κατάλληλης στατιστικής συνάρτησης (τυχαίας μεταβλητής) που εκτιμά (συνήθως αμερόληπτη εκτιμήτρια) την κρίσιμη ποσότητα που μας ενδιαφέρει (π.χ. μέση τιμή ή διακύμανση της X). Έτσι η (διαχρονική) παρακολούθηση της συμπεριφοράς της κρίσιμης ποσότητας επιτυγχάνεται με την παρακολούθηση των τιμών που λαμβάνει η στατιστική συνάρτηση W στα διάφορα δείγματα.

Για παράδειγμα ας υποθέσουμε ότι ενδιαφερόμαστε να παρακολουθήσουμε τη συμπεριφορά της μέσης τιμής της διαμέτρου X των κυλίνδρων που παράγει μια μηχανή. Για το σκοπό μπορούμε να επιλέξουμε τυχαία δείγματα μεγέθους n ($n \geq 1$) κυλίνδρων από την παραγωγή της μηχανής σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα και να χρησιμοποιήσουμε τη στατιστική συνάρτηση $W_i = g(\mathbf{X}_i) = (X_{i1} + X_{i2} + \dots + X_{in}) / n$ (η οποία είναι αμερόληπτη εκτιμήτρια του μέσου της X) για την παρακολούθηση της συμπεριφοράς της μέσης τιμής. Ένα τυπικό διάγραμμα ελέγχου Shewhart (τα διαγράμματα αυτά τα εισήγαγε το 1924 ο W.A. Shewhart) είναι μία γραφική παράσταση με την ακόλουθη μορφή:

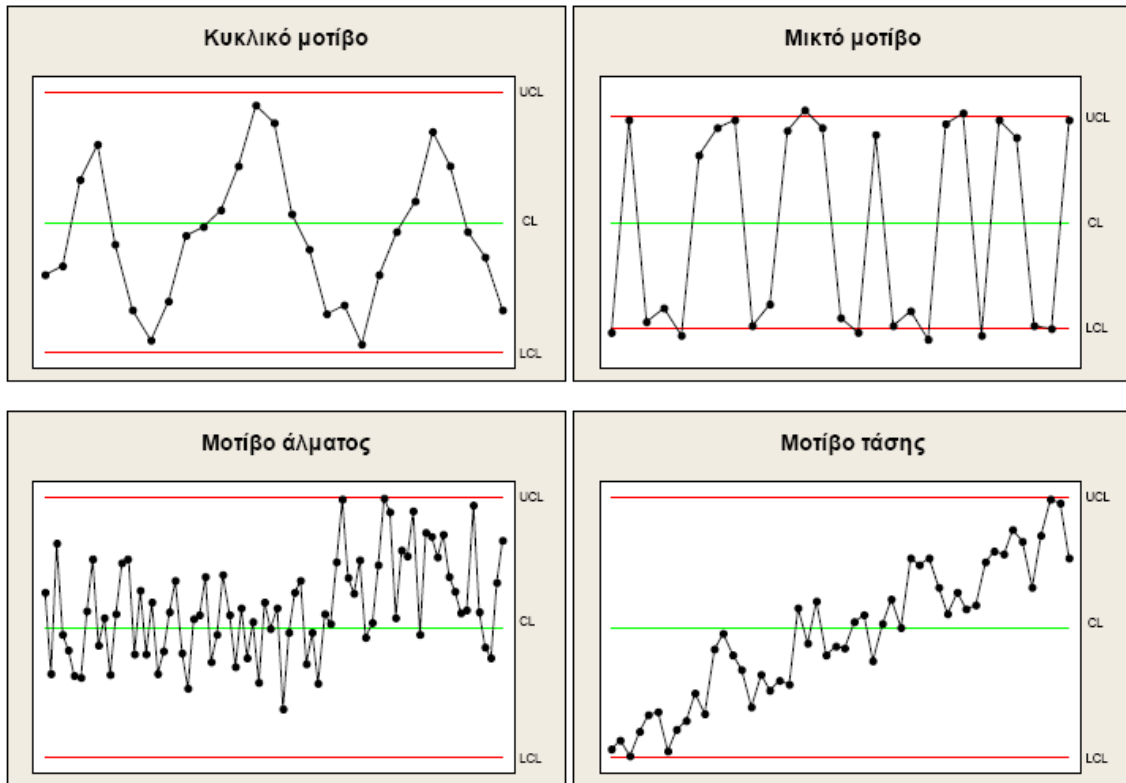


Στο παραπάνω σχήμα, εκτός από τις παρατηρούμενες τιμές της W που έχουν παρασταθεί με σημεία (κουκκίδες) τα οποία έχουν συνδεθεί με μια τεθλασμένη γραμμή, έχουν σχεδιαστεί και άλλες τρεις γραμμές. Η *κεντρική γραμμή* (*center line, CL*) ή *μέσο επίπεδο* της διεργασίας παριστάνει συνήθως τη μέση τιμή (*mean value*) της W όπως αυτή προκύπτει από τη λειτουργία μιας εντός ελέγχου διεργασίας ή την τιμή στόχο του προϊόντος. Οι δύο ακραίες γραμμές που εμφανίζονται ονομάζονται *άνω και κάτω όρια ελέγχου* (*upper and lower control limits, UCL and LCL*). Όσο οι τιμές (σημεία, δεδομένα) της W εμφανίζονται εντός των ορίων ελέγχου και η συμπεριφορά τους είναι «τυχαία» μπορούμε να υποθέσουμε ότι η διεργασία παραμένει εντός ελέγχου (για την ακρίβεια εντός στατιστικού ελέγχου) και δεν χρειάζεται να προβούμε σε κάποια διορθωτική ενέργεια.

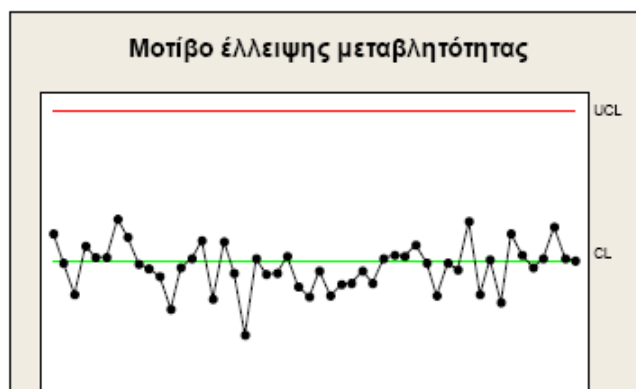
Αν όμως κάποιο σημείο βρεθεί εκτός των ορίων ελέγχου λέμε ότι υπάρχει *ένδειξη* ότι η διεργασία είναι εκτός ελέγχου οπότε αντιμετωπίζουμε κατάσταση *συναγερμού* (*alarm*) και πρέπει να προχωρήσουμε σε έρευνα για να ανακαλύψουμε τις ειδικές αιτίες

μεταβλητότητας που είναι υπεύθυνες για αυτή τη συμπεριφορά και αν κριθεί απαραίτητο να προβούμε σε διορθωτικές ενέργειες.

Θα πρέπει να σημειώσουμε ότι ακόμη και στην περίπτωση που όλα τα σημεία βρίσκονται εντός των ορίων ελέγχου αλλά συμπεριφέρονται με ένα *συστηματικό ή μη τυχαίο τρόπο* τότε και αυτό αποτελεί ένδειξη ότι η διεργασία είναι εκτός ελέγχου. Οι βασικότερες μορφές *προτύπων ή μοτίβων (patterns)* μη τυχαίου τρόπου συμπεριφοράς μιας χρονοσειράς σημείων είναι τα πρότυπα κύκλων (*cycles*), τα μικτά πρότυπα (*mixtures*), τα



πρότυπα αλμάτων (*shifts in the process level*), τα πρότυπα τάσεων (*trends*), και τα πρότυπα έλλειψης μεταβλητότητας (*stratification*) τα οποία περιγράφονται οπτικά στο ακόλουθο σχήμα:



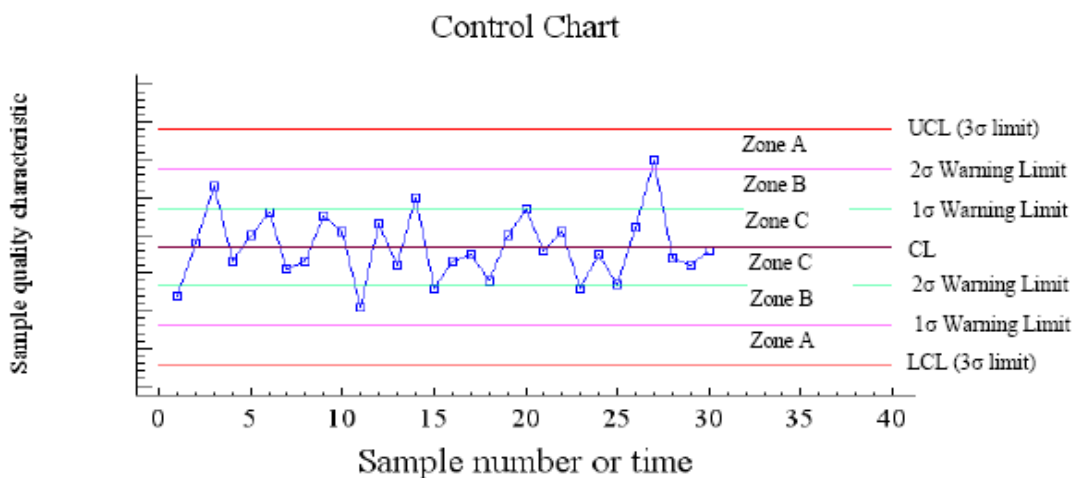
Σχήμα: Τα κυριότερα μη τυχαία μοτίβα

Στα κυκλικά ή περιοδικά πρότυπα (*cycles*) εμφανίζεται μια περιοδικότητα στη διάταξη των σημείων με αποτέλεσμα να σχηματίζονται επαναλαμβανόμενοι κύκλοι. Πιθανές αιτίες είναι οι περιοδικές διακυμάνσεις των περιβαλλοντικών συνθηκών και συνθηκών παραγωγής όπως η θερμοκρασία, η ηλεκτρική τάση, εναλλαγή εργατοτεχνιτών, εναλλαγή μηχανών, κτλ. Τα μικτά πρότυπα (*mixture*) φαίνεται να προκύπτουν από δύο διαφορετικές κατανομές του χαρακτηριστικού X μεταξύ των οποίων παλινδρομεί η διεργασία.

Τα πρότυπα αλμάτων (*shift in the process level*) οφείλονται συνήθως σε νέους εργαζόμενους, νέες μεθόδους παραγωγής, νέες μηχανές, διαδοχική επεξεργασία παρτίδων πρώτων υλών διαφορετικής ποιότητας, κτλ. Τα πρότυπα τάσεων (*trend*) οφείλονται συνήθως σε παράγοντες όπως η σταδιακή φθορά εργαλείων, η κόπωση των εργαζομένων, η παρουσία επιθεωρητή, κτλ.

Στα πρότυπα έλλειψης μεταβλητότητας (*stratification*) τα σημεία του διαγράμματος κινούνται με τεχνητό τρόπο γύρω από την κεντρική γραμμή χωρίς να υπάρχει κάποια αξιοσημείωτη μεταβλητότητα. Οφείλονται συνήθως σε εσφαλμένη σχεδίαση των ορίων ελέγχου.

Σε πολλές περιπτώσεις για να κάνουμε περισσότερο ευαίσθητο ένα διάγραμμα ελέγχου ως προς την ικανότητά του να ανιχνεύει πιο γρήγορα εκτός ελέγχου διεργασίες, εκτός από τη σχεδίαση των ορίων ελέγχου, σχεδιάζουμε επίσης και προειδοποιητικά όρια (*warning limits*) εσωτερικά των ορίων ελέγχου όπως δείχνει το παρακάτω σχήμα (η σχεδίαση των προειδοποιητικών ορίων προϋποθέτει την ανάπτυξη διαγραμμάτων ελέγχου χρησιμοποιώντας το μοντέλο των ορίων τριών σίγμα (3σ)).

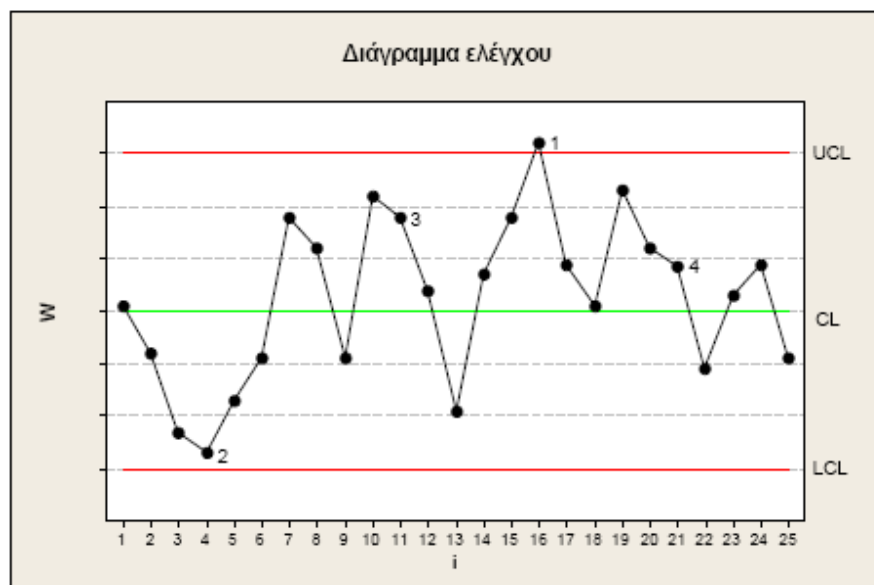


Σχήμα 1: Ζώνες Α , Β και C σε ένα διάγραμμα ελέγχου

Τα προειδοποιητικά όρια χρησιμοποιούνται μαζί με κάποιους “κανόνες” που περιγράφουν την εμφάνιση ειδικών μοτίβων σε ένα διάγραμμα ελέγχου. Στην περίπτωση που εμφανιστεί το μοτίβο που περιγράφει ο κανόνας τότε θεωρούμε ότι η διεργασία είναι εκτός ελέγχου χωρίς απαραίτητα να έχουμε κάποιο σημείο του διαγράμματος εκτός των ορίων ελέγχου (*UCL* και *LCL*). Οι σημαντικότεροι κανόνες που χρησιμοποιούνται για την ευαισθητοποίηση ενός διαγράμματος ελέγχου είναι οι ακόλουθοι:

1. Ένα ή περισσότερα σημεία εκτός των ορίων ελέγχου.
2. Δύο από τρία συνεχόμενα σημεία στην Ζώνη A (σε μια από τις δύο ζώνες A).
3. Τέσσερα από πέντε συνεχόμενα σημεία πέραν της Ζώνης C (σε μια από τις δύο περιοχές).
4. Οκτώ συνεχόμενα σημεία στην ίδια μεριά (επάνω ή κάτω) της κεντρικής γραμμής.
5. Έξι συνεχόμενα σημεία σε αύξουσα ή φθίνουσα διάταξη.
6. Δεκαπέντε συνεχόμενα σημεία στην ολική Ζώνη C.
7. Δεκατέσσερα συνεχόμενα σημεία σε εναλλασσόμενη μορφή «πάνω-κάτω».
8. Οκτώ συνεχόμενα σημεία εκτός της ολικής Ζώνης C.
9. Οποιαδήποτε ασυνήθιστη ή μη τυχαία ακολουθία σημείων.
10. Ένα ή περισσότερα σημεία κοντά στα προειδοποιητικά όρια ή τα όρια ελέγχου.

Οι πρώτοι τέσσερις κανόνες είναι γνωστοί ως *Western Electric Rules*. Στο ακόλουθο διάγραμμα ελέγχου έχουν σημειωθεί τα σημεία που «χτυπούν» για πρώτη φορά ο καθένας από τους *Western Electric Rules*.



Έτσι, στο σημείο 4 «χτύπησε» ο Κανόνας 2, στο σημείο 11 «χτύπησε» ο Κανόνας 3, στο σημείο 16 «χτύπησε» ο Κανόνας 1 και στο σημείο 21 «χτύπησε» ο Κανόνας 4.

1.3. Ο Σ.Ε.Δ στον τομέα της Σύνθεσης Σκυροδέματος και της Δομοστατικής. Αξιολόγηση στατικών και εδαφομηχανικών εφαρμογών

Όπως αναφέρθηκε και στην προηγούμενη ενότητα, ο Στατιστικός Έλεγχος Διεργασιών (SPC) είναι ένα πολύτιμο εργαλείο που χρησιμεύει στον έλεγχο και την παρακολούθηση της μεταβλητότητας των κρίσιμων παραμέτρων μίας διεργασίας. Αρχικά ο SPC εφαρμόστηκε σε βιομηχανικές και παραγωγικές διεργασίες, αλλά κατά τις τελευταίες δεκαετίες η χρήση του έχει εξαπλωθεί και σε άλλους τομείς όπως ο τομέας των κατασκευών (δομοστατική) και σύνθεσης σκυροδέματος. Βασικοί λόγοι για την εφαρμογή του Σ.Ε.Δ. στην σύνθεση αλλά και στην κατασκευή με χρήση σκυροδέματος είναι:

- Η διασφάλιση των μικροσκοπικών τεχνικών χαρακτηριστικών και παραμέτρων σύνθεσης του σκυροδέματος (ηλεκτρική αγωγιμότητα και ομοιογένεια κονιάματος, παραγωγή κονιάματος ειδικού τύπου όπως οπτικά διαφανές υλικό, ειδικής σκληρότητας, ειδικής πήξεως κλπ)
- Εντοπισμός, καθορισμός, ποσόστωση και επίδραση των υλικών προσμίξεων σύνθεσης (άλλα εκ των οποίων είναι επιθυμητά και άλλα μη) π.χ. προσμίξεις οξειδίων νατρίου – Na_2O , οξειδίων πυριτίου – SiO_2 , αλουμίνας Al_2O_3 , οξειδίου ασβεστίου CaO κ.ο.κ.
- Η διασφάλιση των μακροσκοπικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος ως δομικό υλικό κατασκευής π.χ. αντοχή υλικού, αναλογία κονιάματος νερού/τσιμέντου (water/cement ratio), ποσόστωση εγκλωβισμένου αέρα στο μίγμα, ελαστικότητα, όρια θλίψεως και θραύσεως, κλπ.
- Χαρακτηρισμός και τυποποίηση σκυροδέματος για εύκολη αναζήτηση και εξακρίβωση ιδιοτήτων π.χ. C25/30

Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζουμε και δίνουμε έμφαση στις εφαρμογές του SPC και ειδικότερα των διαγραμμάτων ελέγχου, στην αξιολόγηση των στατικών εφαρμογών. Τα διαγράμματα καθώς και οι τεχνικές ελέγχου αναφέρονται στις παρακάτω μεθοδολογίες αξιολόγησης και ανάλυσης των αποτελεσμάτων:

- Απλά διαγράμματα (π.χ. διαγράμματα μέσων τιμών, αποκλίσεων τάσεων θραύσεως, υγρασίας, θερμοκρασίας κατά την πήξη, κλπ)
- Διαγράμματα Shewart

- Τροποποιημένα διαγράμματα Shewart
- Διαγράμματα CUSUM
 - Διαγράμματα μέσης τιμής
 - Διάγραμμα απόκλισης
 - Διαγράμματα συσχέτισης
 - EWMA CUSUM Διαγράμματα
- Πολυμεταβλητά και πολυσυνθετικά διαγράμματα (multivariable and multigrade diagrams)

Τα παραπάνω διαγράμματα αναφέρονται κατά κύριο λόγο στην μετρούμενη τάση θραύσεως των προκυπτόντων δοκιμίων (δειγμάτων) σκυροδέματος που λαμβάνονται από τον χώρο παραγωγής του σκυροδέματος (plant). Αυτό δεν σημαίνει ότι τα διαγράμματα αναφέρονται αποκλειστικά και μόνο στην παράμετρο θραύσης αλλά και σε άλλες παραμέτρους όπως είναι ο λόγος της περιεκτικότητας νερού/τσιμέντου, παράγοντες απορρόφησης νερού στο μίγμα, προσμίξεις και οξείδια κατά την διαδικασία σύνθεσης του κονιάματος, κλπ.

Επιπλέον όμως των μελετών μέσω των διαγραμμάτων εξαιρετικό ενδιαφέρον παρουσιάζει η αντιστοίχιση των φυσικών ιδιοτήτων του σκυροδέματος σε σχέση με τα υλικά πρόσμιξης καθώς και η μεταβολή των ιδιοτήτων και των μακροσκοπικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος συναρτήσει των ποσοστιαίων (και συνήθως μικρών) μεταβολών των προσμίξεων αυτών.

Το τελευταίο γεγονός είναι ιδιαίτερα σημαντικό στον καθορισμό των ενεργειών για το πλάνο «δράσης» (OCAP) στην περίπτωση μιας αστοχίας του συστήματος παραγωγής σκυροδέματος με στόχο την επαναφορά της διεργασίας εντός των προδιαγραφών λειτουργίας.

Βέβαια πρέπει να γίνει αντιληπτό ότι λόγω της πολυ-παραμετρικότητας και της ιδιαίτερης φύσης του προβλήματος και των οργανωτικών θεμάτων που εμπλέκονται στο σύστημα της στατικής, είναι απαραίτητο να γίνει συστηματική αξιολόγηση της διεργασίας, εφαρμόζοντας απλά και κατανοητά κριτήρια για την λήψη έγκυρων και έγκαιρων (ακόμη και αν είναι δυνατόν αυτοματοποιημένων) αποφάσεων. Μόνο με αυτόν τον τρόπο θα μπορέσουν να τεθούν προτεραιότητες στην παρακολούθηση και βελτίωση της αντοχής του σκυροδεματος, που θα επιφέρουν ορατό και άμεσο αποτέλεσμα στη βελτίωση της τελικής ποιότητας κατασκευών.

Για παράδειγμα, υπάρχουν ορισμένα κριτήρια για την επιλογή του στοιχείου - παραμέτρου που είναι προτιμότερο να μελετηθεί ως προς συγκεκριμένα χαρακτηριστικά

(π.χ. ο ρυθμός αύξησης της αστοχίας), σε σχέση με άλλες. Τα κριτήρια αυτά μπορεί να είναι με βάση το επαγόμενο κόστος που προκύπτει κατά την εκτέλεση των πειραμάτων ελέγχου, ο αριθμός των μετρήσεων που αφορούν στην χρήση δοκιμίων, ή άλλα αναγνωρισμένα προβλήματα σχετικά με την ποιότητα κατασκευής του σκυροδέματος. Τέλος, η ύπαρξη καλά καθορισμένης μεθόδου για κάποιο πείραμα αποτελεί σημαντικό κριτήριο επιλογής, αφού κατ' αυτόν τον τρόπο διευκολύνεται η μελέτη και κατά συνέπεια και η ερευνητική διαδικασία (εξισορρόπηση πλήθους δοκιμίων, διακοπής λειτουργίας της παραγωγικής μονάδας σκυροδέματος, χρόνου αποκτάστασης και επαναφοράς της διεργασίας εντός ορίων, κλπ).

Εφόσον επιλεγεί η παράμετρος πάνω στην οποία θα επικεντρωθεί η ανάλυση συγκεντρώνεται η σχετική βιβλιογραφία, καθώς και η γνώμη των ειδικών για τη εφαρμογή και την εκτέλεσή της. Δημιουργείται έτσι ένας οδηγός στατικής μελέτης (πρωτόκολλο χειρισμού των ιδιαίτερων συνθηκών της διεργασίας) ανάλογα με το πείραμα. Τα τελευταία χρόνια έχουν αναπτυχθεί οδηγοί στατικής μελέτης σχεδόν για κάθε μέθοδο η οποία για τους χώρους παραγωγής σκυροδέματος φτάνει μέχρι και σε αυτοματοποιημένο βαθμό για την παρακολούθηση της διεργασίας και την λήψη αποφάσεων.

1.3.1. Ειδικότερα θέματα του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών στην σύνθεση σκυροδέματος

Αν και σε αρκετές περιπτώσεις υπάρχουν δεδομένα για τις διεργασίες στο χώρο των εργαστηρίων, των ερευνητικών ιδρυμάτων και όχι μόνο, το σύνηθες πρόβλημα είναι η δύσκολη επεξεργασία τους με αποτέλεσμα αυτά να παραμένουν ανεκμετάλλευτα. Για την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων χρησιμοποιούνται διάφορα εργαλεία στατιστικού ελέγχου, όπως τα ιστογράμματα, τα διαγράμματα ροής και τα διαγράμματα ελέγχου. Το ιστόγραμμα μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα στιγμιότυπο που αποτυπώνει την εικόνα των δεδομένων σε μία δεδομένη χρονική στιγμή, ενώ τα διαγράμματα ελέγχου προσομοιάζουν σε ένα φιλμ που αποτυπώνει την εικόνα των δεδομένων με την πάροδο του χρόνου.

Στα επιπρόσθετα και ιδιαίτερα χαρακτηριστικά όσον αφορά στην ανάλυση των ιδιοτήτων του σκυροδέματος, που επιβαρύνει ακόμα περισσότερο την επεξεργασία των αποτελεσμάτων των μετρήσεων για τις παραμέτρους, θα πρέπει να αναφερθούμε στο γεγονός ότι η εκτίμηση των πιέσεων (τάσεων) θραύσεως των δοκιμίων αφορά πάντα σε

δοκίμια που έχουν στερεοποιηθεί μετά από 28 ημέρες και όχι αργότερα του ενός έτους από την χρονική στιγμή παραγωγής του σκυροδέματος.

Από μόνο του το γεγονός αυτό συνιστά έναν επιπρόσθετο παράγοντα δυσκολίας στην επεξεργασία των αποτελεσμάτων μετρήσεων σκυροδέματος, εισάγοντας ένα «παράθυρο» σημαντικής «υστέρησης» για την λήψη έγκαιρων αποφάσεων με στόχο την διασφάλιση εντός των ορίων μίας διεργασίας παραγωγής. Για τον λόγο αυτό και θέλοντας να γίνει η χρήση των ανωτέρω μεθόδων εφαρμόσιμη και αποτελεσματική το Ευρωπαϊκό μοντέλο αξιολόγησης παραγωγής σκυροδέματος (EN 206-1) προβλέπει την εξαγωγή μετρήσεων σε δοκίμια των 14 ή ακόμη και 7 ημερών και χρήση ενός προβλεπτικού μοντέλου για την αξιολόγηση των αντιστοιχών τιμών θραύσεως καθώς αυτές αναγάζονται για σύγκριση με τις αναμενόμενες για την 28 ημέρα.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί ότι τα δεδομένα που συλλέγονται στον τομέα της Δομοστατικής, είναι κυρίως συνεχή και ότι στις περισσότερες περιπτώσεις κρίνεται σκόπιμη η προσαρμογή των δεδομένων με βάση παράγοντες, που επηρεάζουν το αποτέλεσμα της διεργασίας (*risk – adjustment*). Για παράδειγμα, το ποσοστό αντοχής ενός σκυροδέματος από μία δοκιμή σε εργαστήριο, μπορεί να διαφέρει ανάλογα με την θλίψη, τη στρέψη του κ.λ.π. Επίσης, πολύ συχνά στον τομέα της Δομοστατικής χρησιμοποιείται το 100% των παρατηρήσεων, όπως συμβαίνει σε περιπτώσεις μελέτης των ποσοστών αντοχής υλικών, μετρήσεων δονήσεων, ελέγχου ελαστικότητας κ.λ.π. Αξίζει επίσης να σημειωθεί ότι (α) τα δοκίμια σκυροδέματος είναι σε μορφή κυλίνδρων ή κύβων καθορισμένων διαστάσεων και (β) η διαδικασία μετρήσεων στα δοκίμια σκυροδέματος οδηγεί στην καταστροφή τους, επομένως δεν αποτελεί μία διαδικασία μέτρησης που δεν επηρεάζει τα δοκίμια και για τον λόγο αυτό δύναται να εφαρμοσθεί μόνο σε αυτά και όχι σε τμήματα κατασκευών (*in-site*).

Επιπλέον των προηγούμενων παραγόντων για την αξιολόγηση των δοκιμίων, είναι και η εγγενής ανάγκη για αξιολόγηση και κατηγοριοποίηση των ιδιοτήτων σε πολυσύνθετα μίγματα (*multigrade mixtures*) τσιμέντου που στην σύνθεση τους χρησιμοποιούν περισσότερα του ενός τυποποιημένα κονιάματα με στόχο την επίτευξη ενδιάμεσων ή ειδικών επιπρόσθετων τεχνικών χαρακτηριστικών και ιδιοτήτων.

Η επαναφορά μίας διεργασίας παραγωγής σκυροδέματος εντός ελέγχου, εφόσον σε αυτήν έχει εμφανιστεί κάποια συστηματική αιτία μεταβλητότητας, είναι πιο δύσκολη και απαιτεί διεξοδικό έλεγχο και μελέτη.

Το βασικό ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της συνεισφοράς του Σ.Ε.Δ στον τομέα της Δομοστατικής, σε σχέση με τις κλασικές στατιστικές μεθόδους που εφαρμόζονται σε άλλους τομείς της Βιομηχανίας καθώς και άλλων παραγωγικών διαδικασιών, είναι ο

έγκαιρος εντοπισμός της μεταβλητότητας στο δείγμα που μελετούμε. Δηλαδή μέσω του διαγράμματος ελέγχου, καθίσταται δυνατή η ανίχνευση μετατοπίσεων στη διεργασία και των εμφανιζόμενων τάσεων στα αρχικά στάδια συγκεράζοντας τον παράγοντα αξιοπιστίας του δοκιμίου όσον αφορά στα όρια θραύσεως που απαιτούν κατ'ελάχιστο παρέλευση 28 ημερών από την ημερομηνία παραγωγής τους. Το τελευταίο έχει οδηγήσει, όπως επισημάναμε, είτε (α) στην υιοθέτηση επεξεργαστικών μοντέλων ανάλυσης που βασίζονται σε λήψη δοκιμίων 7 και 14 ημερών και αντίστοιχη αναγωγή στην ισοδύναμη χρονική βάση είτε εναλλακτικά (β) βασιμμένοι στο εμπειρικό γεγονός ότι τα προκύπτοντα όρια θραύσης για τα δοκίμια των 7 ή 14 ημερών είναι σφαιρώς χαμηλότερα των αντίστοιχων που θα επιτευχθούν μετά την 28 ημέρα, γνωρίζοντας έτσι εκ των προτέρων ότι τα μετρούμενα όρια από την διεργασία είναι τα ελάχιστα δυνατά. Επομένως πολλές εταιρείες παραγωγής δοκιμίων χρησιμοποιούν ενδεχόμενα δύο εφαρμογές μοντέλων ελέγχοντας την αξιοπιστία των διαγραμμάτων των 7 ή 14 ημερών με τα αντίστοιχα προκύπτοντα αποτελέσματα από τα δοκίμια των 28 ημερών.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, εκτός από τα διαγράμματα Shewhart, υπάρχει μία εναλλακτική ομάδα διαγραμμάτων, που ανιχνεύουν έγκαιρα μικρότερες μεταβολές στη διεργασία. Με τον τρόπο αυτόν μειώνονται οι λάθος συναγερμοί σε ένα αποδεκτό επίπεδο, ενώ ταυτόχρονα γίνεται πιο έγκαιρος εντοπισμός της αιτίας ενός προβλήματος. Υπενθυμίζεται ότι τέτοιου είδους διαγράμματα είναι τα CUSUM (Cumulative Sum) και τα EWMA (Geometric Exponentially Weighted Moving Average) τα οποία είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα, καθώς ανταποκρίνονται σε μικρές μόνο αλλαγές του μέσου (κυρίως σε μικρές, συγκριτικά με τα Shewhart που δίνουν σήμα κυρίως για μεγάλες, αν και δεν ισχύει πάντα). Με τα διαγράμματα αυτά μπορούν να εντοπιστούν διεργασίες που δεν έχουν σχεδιαστεί σωστά και οι οποίες, ενώ είναι εντός ελέγχου, ανταποκρίνονται σε χαμηλά επίπεδα ποιότητας, δηλαδή εμφανίζουν πολύ μεγάλη ενδογενή μεταβλητότητα. Και οι δύο αυτές μέθοδοι τυγχάνουν εφαρμογής στην σύνθεση και παραγωγή σκυροδέματος και αναλυτικότερα, θα συζητήσουμε για τα διαγράμματα αυτά και τις αντίστοιχες εφαρμογές τους στον Τομέα της Δομοστατικής, σε επόμενα κεφάλαια.

Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα των EWMA είναι ότι είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά στις αποκλίσεις της κατανομής του ποιοτικού χαρακτηριστικού που μελετάται, από την κανονική, γεγονός ιδιαίτερα σημαντικό, καθώς τα δεδομένα από το χώρο των επιστημών Μηχανικού συνήθως δεν είναι κανονικά κατανομημένα.

Όλες οι παραπάνω μεθοδολογίες ανάλυσης χρησιμοποιούνται για την διασφάλιση και πιστοποίηση της αξιοπιστίας στην παραγωγή σκυροδέματος, που λόγω της σύνθετης

και πολυπαραμετρικής υφής του αποτελεί έναν εξαιρετικά ενδιαφέροντα χώρο για την εξάντληση των αναωτέρω μεθόδων.

1.3.2. Εφαρμογές του Σ.Ε.Δ στις Δομοστατικές Μελέτες.

Σήμερα, αρκετές εφαρμογές του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών και συγκεκριμένα των διαγραμμάτων ελέγχου λαμβάνουν χώρα στις Δομοστατικές Μελέτες και σε αρκετά εργαστήρια Δομοστατικής και εταιρίες κατασκευής σκυροδέματος, τόσο στην Ελλάδα, όσο και στο εξωτερικό. Τμήματα του Σ.Ε.Δ που εφαρμόστηκαν στους προαναφερθέντες τομείς, συντελέστηκαν ανεξάρτητα από τις κλασικές μεθόδους του Ποιοτικού Ελέγχου, όπως αυτές εφαρμόζονται στο βιομηχανικό και τον παραγωγικό κλάδο. Τα διαγράμματα ελέγχου (*control charts*), προτάθηκαν κυρίως, με στόχο να χρησιμοποιηθούν στην παρακολούθηση και την εξέλιξη της αποδοτικότητας του σκυροδέματος. Παραδείγματος χάριν, ένα διάγραμμα ελέγχου θα μπορούσε να καταγράψει με απόλυτη ακρίβεια τον ρυθμό με τον οποίον αστοχεί η παραγωγή σκυροδέματος και ενδεχόμενα να προλάβει την αστοχία μίας κατασκευής με βάση το υλικό και τον τύπο κονιάματος.

Η χρήση των διαγραμμάτων ελέγχου σε σχετικές με την Στατική εφαρμογές, όπως σημειώθηκε προηγουμένως, διαφέρει σημαντικά από την αντίστοιχη χρήση τους στον τομέα της βιομηχανίας και της παραγωγικής διαδικασίας. Καταρχήν, η χρήση των δεδομένων κυριαρχεί σε μεγαλύτερο βαθμό σε μηχανικές και στατικές εφαρμογές, όπως για παράδειγμα η καταγραφή αστοχίας των υλικών ενός συγκεκριμένου τύπου κονιάματος, παρά σε βιομηχανικές πρακτικές. Ασφαλώς, το πεδίο των μηχανικών και δομικών εφαρμογών καθιστά αναγκαία τη συνεχή χρήση των διαγραμμάτων ελέγχου, καθώς σημαντικό ρόλο διαδραματίζει ο παράγοντας του κινδύνου και ο χρόνος που μεσολαβεί μεταξύ διαδοχικών αποτυχιών μίας εφαρμογής (π.χ. η αποτυχία προσαρμογής ενός δομικού υλικού σε ένα σκυροκονίαμα). Συγκεκριμένα, σε αυτήν την περίπτωση, τα διαγράμματα ελέγχου εφαρμόζονται με ένα υφιστάμενο γεωμετρικό ή εκθετικό μοντέλο.

Ο Woodall (Woodall *et al.*, 1989) παρείχε μάλιστα μία λίστα με δημοσιεύσεις, αναφορικά με αυτό το θέμα, ωστόσο πραγματοποιήθηκε και σχετικά πρόσφατη έρευνα από τον Yang, τον Xie και πολλούς ακόμη. Ωστόσο, οι μέθοδοι και οι εφαρμογές των γεωμετρικών διαγραμμάτων ελέγχου δεν έχουν ακόμη χρησιμοποιηθεί σε δημοφιλή συγγράμματα, ή σε λογισμικό.

Επιπλέον, διαγράμματα ελέγχου έχουν χρησιμοποιηθεί για να διερευνηθεί η αποτελεσματικότητα των μέτρων για τη βελτίωση της ποιότητας των πειραμάτων ενός εργαστηρίου δομοστατικής, η αποτελεσματικότητα μεθόδων κατασκευής τσιμέντου, η αποτελεσματικότητα ενός νέου δομικού υλικού, η αποτελεσματικότητα του οπλισμένου σκυροδέματος.

1.4. Κριτήρια αξιολόγησης διαγραμμάτων ελέγχου:

ARL, ATS, ANOS

Μέσο Μήκος Ροής: ARL

Μια σημαντική έννοια που σχετίζεται με τα διαγράμματα ελέγχου είναι το μέσο μήκο ροής (ή μέσο μήκος διαδρομής) του διαγράμματος (average run length, ARL) που ορίζεται με τη σχέση:

$$ARL = \frac{1}{p} \quad (\text{εξ. 1.4.1})$$

όπου p συμβολίζει την πιθανότητα να βρεθεί ένα σημείο του διαγράμματος ελέγχου εκτός των ορίων ελέγχου. Είναι προφανές ότι το ARL δηλώνει τον αναμενόμενο αριθμό σημείων (δειγμάτων) που πρέπει να σχεδιαστούν σε ένα διάγραμμα ελέγχου, για να εμφανιστεί ένα σημείο εκτός των ορίων ελέγχου αφού το μήκος ροής ή διαδρομής (*run length*) ακολουθεί την κατανομή $G(p)$. Αν η τυχαία μεταβλητή X ακολουθεί τη γεωμετρική κατανομή με πιθανότητα επιτυχίας p ($X \sim G(p)$), δηλαδή:

$$P(X = x) = p(1 - p)^{x-1}, \quad x = 1, 2, 3, \dots, n, \quad \text{τότε: } E(X) = \frac{1}{p} \quad \text{και} \quad V(x) = \frac{1}{p^2} \quad (\text{εξ. 1.4.2})$$

Για μια διεργασία που βρίσκεται εντός ελέγχου και στην περίπτωση που χρησιμοποιούμε 3σ όρια ελέγχου με κανονική κατανομή για την απεικονιζόμενη στατιστική συνάρτηση W , έχουμε ότι το εντός ελέγχου μέσο μήκος ροής ARL_{in} (in-control average run length) είναι ίσο με:

$$ARL_{in} = \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{0,0027} \approx 370,4 \quad (\text{εξ. 1.4.3})$$

όπου α είναι η πιθανότητα να βρεθεί ένα σημείο εκτός των ορίων ελέγχου ενώ η διεργασία βρίσκεται εντός ελέγχου και το χαρακτηριστικό X του προϊόντος ακολουθεί κανονική κατανομή με - εντός ελέγχου - μέση τιμή μ και διασπορά σ^2 .

Για μια διεργασία που βρίσκεται εκτός ελέγχου λόγω μετατόπισης του μέσου επιπέδου της διεργασίας, το εκτός ελέγχου μέσο μήκος ροής ARL_{out} (out-of-control average run length) είναι ίσο με:

$$ARL_{out} = \frac{1}{1 - \beta} \quad (\text{εξ. 1.4.4})$$

αφού η πιθανότητα να βρεθεί σε αυτήν την περίπτωση ένα σημείο του διαγράμματος ελέγχου, εντός των ορίων ελέγχου, είναι ίσο με β , οπότε βρίσκεται εκτός των ορίων ελέγχου, με πιθανότητα $1 - \beta$. Στην πράξη είναι επιθυμητή μία μικρή τιμή του ARL_{out} , αφού το ARL_{out} δηλώνει τον αναμενόμενο αριθμό δειγμάτων που πρέπει να ληφθούν, για να εντοπιστεί η αλλαγή στο μέσο επίπεδο της διεργασίας, από την στιγμή που θα συμβεί αυτή η μετατόπιση.

Σημαντικό είναι να αναφερθεί πως αυξάνοντας το μέγεθος του δείγματος n , η πιθανότητα β μειώνεται και συνεπώς βελτιώνεται η ικανότητα του διαγράμματος ελέγχου να ανιχνεύει εγκαίρως τις μετατοπίσεις του μέσου επιπέδου της διεργασίας. Με βάση τη μετατόπιση που θέλουμε να ανιχνεύσουμε, είναι δυνατό να επιλέξουμε το κατάλληλο μέγεθος δείγματος, έτσι ώστε να έχουμε συγκεκριμένη τιμή για το ARL_{out} . Αν αντί των 3σ ορίων είχαμε επιλέξει L όρια, τότε θα βλέπαμε πως καθώς αυξάνει η τιμή του L , μειώνεται η πιθανότητα εσφαλμένης ένδειξης εκτός ελέγχου διεργασίας. Ενώ αντίθετα αυξάνεται η πιθανότητα λανθασμένης ένδειξης ότι η διεργασία βρίσκεται εντός ελέγχου ενώ στην πραγματικότητα βρίσκεται εκτός ελέγχου λόγω μετατόπισης του μέσου της διεργασίας.

Τα τελευταία χρόνια ωστόσο η χρήση του ARL ως μέτρου για την περιγραφή της απόδοσης μιας διεργασίας έχει υποστεί κριτική, αφού το ARL που παρατηρείται στην πράξη διαφέρει συνήθως αρκετά από το θεωρητικό ARL λόγω του ότι η κατανομή του μήκους ροής είναι μη-συμμετρική (παρουσιάζει δεξιά ουρά) και συνεπώς η μέση τιμή δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως αντιπροσωπευτικό μέτρο κεντρικής τάσης της κατανομής (ιδιαίτερα για μικρές τιμές του p).

Μια συνήθης πρακτική είναι να συνοδεύεται η τιμή του ARL με την τυπική απόκλιση της κατανομής του μήκους ροής $SDRL$ (standard deviation run length). Στην περίπτωση που η κατανομή του μήκους ροής του διαγράμματος είναι γεωμετρική η τιμή του $SDRL$ ταυτίζεται με την τιμή του ARL . Επιπλέον η γνώση της κατανομής του μήκους ροής, η οποία με βάση τα όσα έχουμε δει έως τώρα είναι γεωμετρική κατανομή, μας επιτρέπει τον υπολογισμό και τη χρήση ποσοστιαίων σημείων προκειμένου να έχουμε περισσότερη πληροφορία σχετικά με την απόδοση του διαγράμματος.

Θεωρώντας ένα μοντέλο ορίων 3σ που η κατανομή της W είναι κανονική με γνωστές παραμέτρους έχουμε τον ακόλουθο πίνακα για μια εντός ελέγχου διεργασία.

Πίνακας 1.4: Πίνακας στατιστικών μέτρων για την κατανομή του μήκους ροής

α	ARL	SDRL	Q_1	M	Q_3
0,0027	370,4	370,4	107	257	513

Από τον πίνακα προκύπτει ότι κατά μέσο όρο αναμένονται περίπου 370 δείγματα, μέχρι να βρεθεί σημείο εκτός των ορίων ελέγχου όταν η διεργασία είναι εντός ελέγχου. Από την τιμή της διαμέσου M ο διαχειριστής του διαγράμματος γνωρίζει ότι η πιθανότητα να περιμένω περίπου 257 δείγματα μέχρι να βρεθεί ένα σημείο εκτός των ορίων ελέγχου είναι τουλάχιστον 50%. Επιπλέον από την τιμή Q_3 έχουμε ότι η πιθανότητα να μη δώσει σημείο το διάγραμμα ένδειξη εκτός ελέγχου διεργασίας μετά το 513 απεικονιζόμενο σημείο είναι το πολύ 25%. Έτσι λοιπόν σε πρακτικές εφαρμογές η χρήση των ποσοστιαίων σημείων της κατανομής του μήκους ροής μας παρέχει περισσότερες πληροφορίες σχετικά με την απόδοση του διαγράμματος ελέγχου.

Μέσος Χρόνος Σήματος (ATS) και Μέσο Πλήθος Παρατηρήσεων (ANOS)

Στην προηγούμενη υποενότητα αναφερθήκαμε στο βασικότερο μέτρο απόδοσης ενός διαγράμματος ελέγχου και είδαμε τα κύρια χαρακτηριστικά του. Στην παρούσα υποενότητα, θα αναφερθούμε σε εναλλακτικά μέτρα απόδοσης και αξιολόγησης ενός διαγράμματος ελέγχου.

Ένα μέτρο που χρησιμοποιείται συχνά είναι ο μέσος χρόνος σήματος *ATS* (average time to signal) που ορίζεται από τη σχέση:

$$ATS = ARL * \tau \quad (\text{εξ. 1.4.5})$$

όπου τ συμβολίζει το χρόνο που μεσολαβεί για τη λήψη δυο διαδοχικών δειγμάτων.

Έτσι η ποσότητα *ATS* δηλώνει το μέσο χρόνο που απαιτείται για να δώσει το διάγραμμα ελέγχου ένδειξη εκτός ελέγχου διεργασίας. Αν ο ρυθμός δειγματοληψίας είναι μεταβλητός τότε ορίζεται μια νέα κατηγορία διαγραμμάτων ελέγχου, τα διαγράμματα με μεταβλητό ρυθμό δειγματοληψίας (*adaptive sampling rate control charts*).

Σε αυτήν την περίπτωση το τ δεν είναι σταθερό, αλλά τυχαία μεταβλητή και ο μέσος χρόνος σήματος δίνεται από τη σχέση:

$$ATS = ARL * E(\tau) \quad (\text{εξ. 1.4.6})$$

Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι τα ARL, ATS που έχουμε αναφέρει έως τώρα υπολογίζουν την απόδοση του διαγράμματος θεωρώντας ότι η μεταβολή στην εντός ελέγχου τιμή της παραμέτρου συμβαίνει ακριβώς τη χρονική στιγμή που αρχίζει η παρακολούθηση της διεργασίας. Σε αυτή την περίπτωση μιλάμε για μέτρα ARL και ATS αρχικής κατάστασης.

Σε πολλές περιπτώσεις όμως η διεργασία ξεκινάει ευρισκόμενη εντός ελέγχου και η μεταβολή στην τιμή της υπό παρακολούθηση παραμέτρου συμβαίνει σε κάποιο τυχαίο χρονικό σημείο μεταξύ της λήψης δυο διαδοχικών δειγμάτων. Σε αυτή την περίπτωση για τον υπολογισμό της απόδοσης ενός διαγράμματος με μεταβλητό ρυθμό δειγματοληψίας χρησιμοποιείται το μέτρο ATS σταθερής κατάστασης το οποίο στην βιβλιογραφία αναφέρεται ως προσαρμοσμένος μέσος χρόνος σήματος (*adjusted average time to signal AATS*). Αναλόγως στην περίπτωση των διαγραμμάτων με σταθερό ρυθμό δειγματοληψίας χρησιμοποιείται το μέτρο ARL σταθερής κατάστασης.

Γενικότερα συγκρίσεις μεταξύ των διαφορετικών διαγραμμάτων ελέγχου χωρίς μεταβλητό ρυθμό δειγματοληψίας έχει επικρατήσει να γίνονται χρησιμοποιώντας το ARL αρχικής κατάστασης, ενώ για τα διαγράμματα με μεταβλητό ρυθμό δειγματοληψίας χρησιμοποιείται το AATS. Ωστόσο, το ATS είναι χρήσιμο, όταν ο χρόνος μεταξύ των δειγμάτων, ή μεταξύ των σημείων ενός διαγράμματος ελέγχου, ποικίλει, όπως για παράδειγμα συμβαίνει όταν έχουμε εκθετικά δεδομένα.

Μία άλλη χρήσιμη μεταβλητή που χρησιμοποιείται ως μέτρο καταλληλότητας ενός διαγράμματος ελέγχου, είναι το αναμενόμενο πλήθος των παρατηρήσεων (*average number of observations to signal – ANOS*) που καταγράφονται σε ένα πείραμα, μέχρι να σημάνει «συναγερμός» για ένδειξη εκτός ελέγχου διεργασίας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Η μεθοδολογία του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών (Σ.Ε.Δ.) στην παρασκευή Σκυροδέματος

2.1. Εισαγωγή

Από τότε που ξεκίνησε η σύγχρονη κατασκευαστική επιστήμη να χρησιμοποιεί το σκυρόδεμα ως βασικό της υλικό, έχουν καταβληθεί πολλές προσπάθειες για να ελεγχθεί η διαδικασία παραγωγής του, προκειμένου να βελτιωθεί η ποιότητα του και περαιτέρω στοχεύοντας στο να μειωθεί το κόστος παραγωγής του. Η εφαρμογή των στατιστικών τεχνικών στην κατασκευαστική επιστήμη ήταν αποτέλεσμα των εργασιών, πρωταρχικά του φυσικού Walter A. Shewhart της Bell Telephone Laboratories, βασισμένες σε μία αρχική ιδέα του το 1924, η οποία το 1931 κατέληξε στην δημοσίευση ενός βιβλίου σχετικά με τις στατιστικές τεχνικές ελέγχου της ποιότητας .

Ο Shewhart αναγνώρισε ότι μέσα σε μια διαδικασία παρασκευής δεν υπήρχαν μόνον φυσικές διακυμάνσεις, οι οποίες ενυπάρχουν εγγενώς στην ίδια την διαδικασία και επηρεάζουν την ποιότητα παραγωγής, αλλά και διακυμάνσεις που ξεφεύγουν των φυσικών, εκδηλώνονταν στην φάση παραγωγής και που αρχικά δεν μπορούσαν να εξηγηθούν. Ο Shewhart αναγνώρισε ότι είναι δυνατόν να θέσει όρια στη φυσική διακύμανση κάθε διαδικασίας, έτσι ώστε οι διακυμάνσεις εντός αυτών των ορίων να μπορούν να εξηγηθούν από διάφορες αιτίες , αλλά και κάθε διακύμανση εκτός αυτών των ορίων (ειδικές παραλλαγές), να αντιπροσωπεύει μια ουσιαστική αλλαγή, άξια προσοχής στην υποκείμενη διαδικασία.

Η γενική ιδέα του Shewhart, δηλ. της διάκρισης μεταξύ των φυσικών και ειδικών παραλλαγών διακύμανσης της διεργασίας, καθώς και οι γενικές αρχές του Σ.Ε.Δ, είναι σαφώς επεκτάσιμες και στην παραγωγή σκυροδέματος σε ένα εργοστάσιο (plant), επικεντρώνοντας αρχικά σε συγκεκριμένες παραμέτρους της διεργασίας όπως π.χ. καθορισμένη αντοχή σε θλίψη (αντοχή θραύσεως μέσω ελέγχου δοκιμίων). Η τελευταία

παράμετρος αποτελεί ίσως και την σημαντικότερη παράμετρο κατηγοριοποίησης και κατάταξης της παραγωγής του σκυροδέματος, όσον αφορά την χρησιμοποίηση του σε κατασκευές που απαιτούν ειδικά χαρακτηριστικά. Οι προκύπτουσες διακυμάνσεις που υφίσταται η διαδικασία παραγωγής, οφείλονται αρχικά σε ένα σύνολο παραγόντων όπως: στη διακύμανση της ποιότητας των πρώτων υλών (ταξινόμηση ποιότητας πρώτων υλών, την χημική σύνθεση και καθαρότητα τους, κ.λπ.), την ακρίβεια ζυγίσεως των συστατικών στην ανάμιξη, την απόδοση και την ακρίβεια των εργοστάσιων παραγωγής πρώτων υλών, τη δειγματοληψία και τις δοκιμες ελέγχου στα παραγόμενα προϊόντα, κλπ. Ως ειδικές αιτίες της διακύμανσης, θα μπορούσαμε να χαρακτηρίσουμε την αλλαγή των συστατικών υλικών που χρησιμοποιούνται, την ακρίβεια σύνθεσης των ποσοτήτων (σε βάρος/όγκο ανάμιξης), προβλήματα με τους χώρους φύλαξης των πρώτων υλών (π.χ. υγρασία και ανεπιθύμητες προσμίξεις), καθώς και τον εξοπλισμό δοκιμών κ.α.

Τα διαγράμματα ελέγχου έχουν βρει ευρεία χρήση στη βιομηχανία σκυροδέματος τόσο στο έτοιμο σκυρόδεμα όσο και στο κατά ειδική παραγγελία συντιθέμενο (σκυρόδεμα ειδικού τύπου - ειδικών χρήσεων π.χ. ταχείας πήξεως για κατασκευές σε νερό), ως ένα εργαλείο για τον έλεγχο ποιότητας.

Όπως αναφέραμα και προηγουμένως η αντοχή θραύσεως ενός σκυροδέματος αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παραμέτρους κατάταξης και κατηγοριοποίησης του τύπου του σκυροδέματος, επομένως πολύ μεγάλο ενδιαφέρον έχει αποδοθεί στην παρακολούθηση της εν λόγω παραμέτρου, μέσω των τεχνικών Σ.Ε.Δ. Θα πρέπει να τονισθεί όμως, ότι η εν λόγω παράμετρος δεν αποτελεί το μοναδικό κριτήριο διαφοροποίησης των τύπων σκυροδέματος που παράγεται στα σύγχρονα εργοστάσια. Διαγράμματα ελέγχου μπορούν να εφαρμοστούν για την παρακολούθηση μιας πληθώρας ιδιοτήτων του σκυροδέματος (όπως η αντοχή θραύσεως βασισμένη σε κυλινδρικά ή κυβικού σχήματος δοκίμια, ο λόγος νερού/τσιμέντο κατά την μίξη – water/cement ratio - w/c ratio, κλπ.), καθώς και διαγράμματα καθορισμού των συστατικών και ειδικών υλικών συνθέσεως (αφυγραντικά – απορροφητικά υλικά συγκράτησης νερού, υλικά για αντιστάθμιση της γήρανσης των φυσικών ιδιοτήτων, κλπ).

2.1.1. Διαγράμματα Ελέγχου και παράμετροι ελέγχου των διεργασιών παραγωγής σκυροδέματος

Η πιο κοινή εφαρμογή των διαγραμμάτων ελέγχου, ως μέσα συνεχούς εκτίμησης των αποτελεσμάτων αντοχής σε θλίψη, αφορά σε ένα σύνολο ιδιοτήτων, προκειμένου:

- Να ελεγχθεί εάν η επιθυμητή αντοχή (αντοχή θραύσεως) της παραγωγής έχει επτευχθεί
- Να μετρηθούν οι αποκλίσεις από τα επιθυμητά επίπεδα προδιαγραφών (σημειωτέον ότι όλα τα προϊόντα εμφανίζουν διακυμάνσεις)
- Να προσδιορισθεί το μέγεθος της κάθε παραλλαγής
- Να καθορίσουν, αντικειμενικά, την απαιτούμενη δράση συστατικών (π.χ. την αλλαγή του λόγου w/c) για την επίτευξη του στόχου
- Να εντοπίσουν τις χρονικές περιόδους παραγωγής καθώς και τα σκυροδέματα όπου η αντοχή ήταν μικρότερη της επιθυμητής, έτσι ώστε να χαρακτηριστεί αυτή η παρτίδα καθώς και να ληφθούν πρόσθετα διορθωτικά μέτρα για την αποκατάσταση των επιθυμητών ιδιοτήτων της.

Η χρήση των διαγραμμάτων ελέγχου δεν θα πρέπει να αντιμετωπίζεται αποσπασματικά και χωριστά από τις υπόλοιπες μεθοδολογίες, ενδεχόμενα άλλου τύπου συμπληρωματικών διεργασιών, που χρησιμοποιούνται για τον έλεγχο της παραγωγής. Για παράδειγμα ένας τυπικός και χρονικά περιοδικός έλεγχος των μηχανών ζυγίσεως βάρους (ζυγαριών προσδιορισμού ποσοτήτων υλικών), που χρησιμοποιούνται για τον καθορισμό των αναλογιών βάρους των υλικών στο μίγμα, θα ελαχιστοποιήσει τον κίνδυνο μιας αποτυχίας σύνθεσης σκυροδέματος. Επιπλέον τα διαγράμματα ελέγχου, παρέχουν πληροφορίες σχετικά με τη διαδικασία, αλλά και με την ερμηνεία των αποκομιζόμενων πληροφοριών δηλ. σε καμμία περίπτωση τα αποτελέσματα αυτά δεν αποτελούν μία μηχανική διαδικασία (η οποία απλά θα μπορούσε να αυτοματοποιηθεί και οι χειρισμοί της να εκδηλωθούν, χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση).

2.1.2. Παράμετροι Ελέγχου και Ενέργειες για την Αποκατάσταση της διεργασίας

Όλες οι διαθέσιμες πληροφορίες για την παραγωγή σκυροδέματος, θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν για να ερμηνεύσουν τις αποκομιζόμενες πληροφορίες, με στόχο να ληφθούν εμπειριστατωμένες αποφάσεις αλλαγών των συνθηκών παραγωγής.

Για την εξεύρεση του μηχανισμού ανάληψης δράσης για την διόρθωση της παραγωγής (Out Of Control Action Plan - OCAP) έχει σημασία να καθορισθούν ακόμα και φαινομενικά μικρές λεπτομέρειες. Επίσης, ειδικού τύπου παρατηρήσεις θα πρέπει να

εξακριβωθούν, δεδομένου ότι μπορεί να συντελούν σημαντικά στην παρούσα κατάσταση (εκτός ελέγχου ή οριακά εντός ελέγχου) που βρίσκεται η παραγωγή ενός εργοστασίου (π.χ. μια ενδεχόμενη μεταβολή στην ποιότητα, η οποία συμβαίνει όταν μια νέα παρτίδα απο συστατικά χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά, να ελεγχθεί εάν όλη η οικογένεια παρουσιάζει την ίδια τάση μεταβολής των χαρακτηριστικών της, να εξετασθεί εάν υπάρχουν άλλες εγκαταστάσεις που χρησιμοποιούν παρόμοια υλικά και οι οποίες εμφανίζουν παρόμοια τάση επομένως θα μπορούσαμε να κάνουμε χρήση ανάλογων ενεργειών αποκτάστασης που ήδη έχουν χρησιμοποιηθεί και εφαρμοστεί σε αυτές σε άλλες χρονικές στιγμές, κλπ).

Οι πληροφορίες που θα συλλεχθούν οδηγούν στον εντοπισμό της αιτίας της αλλαγής της ποιότητας που έχει προσδιοριστεί, με στόχο να ληφθούν οι κατάλληλες ενέργειες δράσης. Για παράδειγμα, η μη ορθή λειτουργία των ζυγών για τον καθορισμό της αναλογίας βάρους των συστατικών του μίγματος, θα πρέπει να οδηγήσει σε ενέργεια επισκευής, συντήρησης και εκ νέου βαθμονόμηση τους και όχι σε αλλαγή στις αναλογίες του μίγματος (αφού αυτές είναι σωστές και δεν οφείλεται σε αυτές το πρόβλημα ελέγχου). Ενδεχόμενα λοιπόν όλες οι καταστάσεις που θα κληθεί να αντιμετωπίσει μία διεργασία παραγωγής σκυροδέματος δεν οδηγούν αποκλειστικά και μόνο σε μεταβολή των στοιχείων σύνθεσης του σκυροδέματος.

Όταν όμως απαιτείται μια μεταβολή στις αναλογίες μίγματος, η χρήση των διαγραμμάτων ελέγχου μπορεί οδηγήσει σε αντικειμενικώς καθορισμένες μεταβολές στις αναλογίες.

Ο αποτελεσματικός έλεγχος της παραγωγής σκυροδέματος επιτυγχάνεται ευκολότερα όταν υπάρχουν καλές σχέσεις και με τους προμηθευτές των συστατικών σύνθεσης του μίγματος, ιδιαίτερα τους προμηθευτές υλικών κονιάματος. Έγκαιρη προειδοποίηση από μια αλλαγή στην απόδοση από τον προμηθευτή συστατικών υλικού μίγματος θα πρέπει να είναι μέρος της συμφωνίας προμήθειας, π.χ. το απόθεμα του καθορισμένου υλικού που χρησιμοποιείται κατά τη διάρκεια της περιόδου παραγωγής μιας παρτίδας σκυροδέματος συγκεκριμένου τύπου, καθώς και τον καθορισμό της βάσης της προειδοποίησης. Ορισμένοι παραγωγοί σκυροδέματος χρησιμοποιούν επίσης αλλαγές στη «χημεία» του τσιμέντου, για να προβλέψουν τις αλλαγές στην αντοχή του σκυροδέματος.

Ο έλεγχος των διεργασιών παραγωγής σκυροδέματος χρησιμοποιεί όλα αυτά τα στοιχεία, ακόμα και αν φαίνονται ετερογενή και ασύνδετα ως αντικείμενα μεταξύ τους, ως πληροφορίες για την παραγωγή σκυροδέματος σύμφωνα με τις προδιαγραφές.

Ο αποτελεσματικός έλεγχος της παραγωγής, η οποία περιλαμβάνει τη χρήση των διαγραμμάτων ελέγχου, μειώνει σημαντικά τον κίνδυνο της μη συμμόρφωσης με τις προδιαγραφές παραγωγής του, προς όφελος τόσο των χρηστών όσο και των παραγωγών του σκυροδέματος.

2.1.3. Η αξιολόγηση της παραγωγής σκυροδέματος και τα πρότυπα προδιαγραφών

Ακόμα και αν θεωρήσουμε ότι το σκυρόδεμα αποτελεί ένα ομογενές υλικό που παράγεται σύμφωνα με καθορισμένες προδιαγραφές μέσω διαδικασιών προτυποποίησης (standardization processes), έχει αποδειχθεί ότι υπάρχουν μειονεκτήματα στην υπάρχουσα μέθοδο της αξιολόγησης των προτύπων (της συμμόρφωσης του σκυροδέματος ως προς την μεση αντοχή θραύσεως του όπως αυτή έχει εγκριθεί από το πρότυπο EN 206-1 παραγωγής σκυροδέματος).

Γενικά οι σύγχρονες τεχνικές ελέγχου της παραγωγής τείνουν να θεωρούν ότι τα διαγράμματα ελέγχου, (ήδη χρησιμοποιούμενα ευρέως) ως ένα εργαλείο για τη διασφάλιση της ποιότητας στον έλεγχο της παραγωγής στο εργοστάσιο, παρέχουν μια εναλλακτική θεώρηση και το καλύτερο δυνατόν μέσο για τη διασφάλιση των χαρακτηριστικών αντοχής (ως μια μέθοδος που ακολουθεί την Καθοδήγηση της CEN).

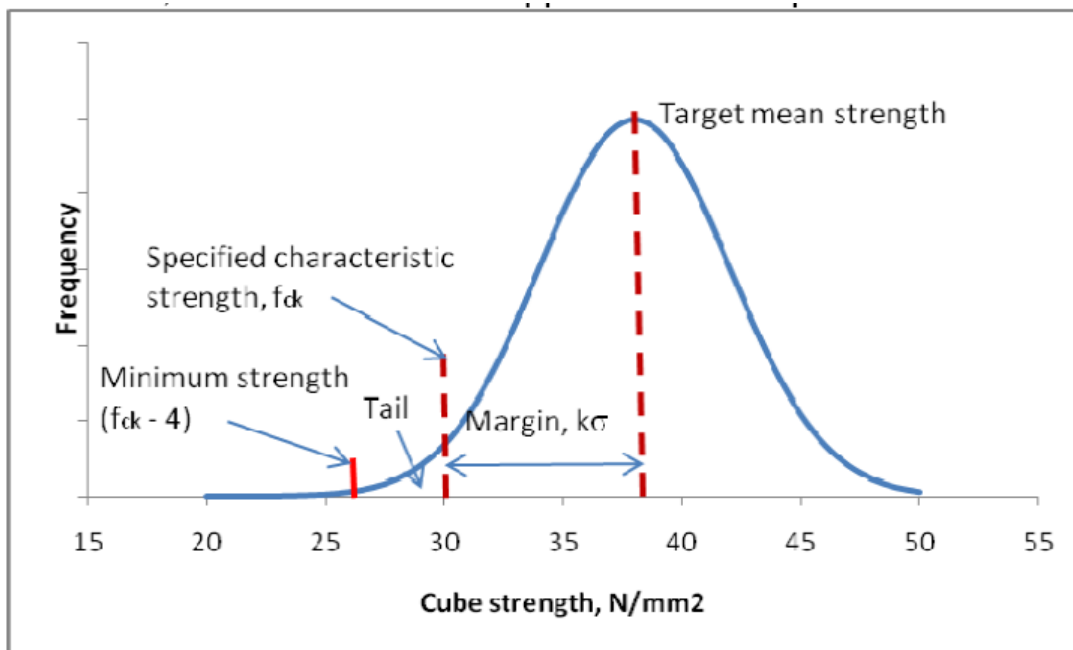
Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιάσουμε διάφορες μεθοδολογίες και συστήματα ελέγχου που χρησιμοποιούνται σήμερα στη βιομηχανία σκυροδέματος ως εφαρμοσμένα παραδείγματα των αρχών για τον έλεγχο της παραγωγής του.

2.2. Στατιστικά Στοιχεία για την παραγωγή σκυροδέματος

2.2.1. Η Κανονική Κατανομή και ο ρόλος της στην εκτίμηση της αντοχής θραύσεως των δοκιμίων σκυροδέματος

Τα αποτελέσματα των δοκιμών της αντοχής θραύσεως μέσω δοκιμίων σκυροδέματος (compressive strength), τείνουν να ακολουθούν μια κανονική κατανομή όπως απεικονίζεται στο Σχήμα .

Μια κανονική κατανομή ορίζεται από δύο παραμέτρους, την μέση τιμή της κατανομής και την τυπική απόκλιση της (σ), η οποία είναι ένα μέτρο της εξάπλωσης των μετρούμενων αποτελεσμάτων γύρω από τη μέση τιμή. Ένα χαμηλό επίπεδο απόκλισης σημαίνει ότι τα περισσότερα αποτελέσματα αντοχής θα είναι κοντά στην μέση τιμή. Από την άλλη μια υψηλή τυπική απόκλιση σημαίνει ότι τα αποτελέσματα αντοχής διασκορπίζονται προς το κάτω και το άνω όριο της μέσης τιμής. Η περιοχή κάτω από την κανονική κατανομή μεταξύ δύο τιμών της «τετμημένης-χ» του διαγράμματος, αντιπροσωπεύει την πιθανότητα ότι ένα αποτέλεσμα θα εμπίπτει εντός αυτού του εύρους τιμών. Ο όρος «ουρά» (tail) χρησιμοποιείται για να υποδηλώσει το εμβαδόν κάτω από την κανονική κατανομή η οποία ορίζει μια περιοχή που ξεκινά από μία τιμή, π.χ. ορισμός μιας περιοχής όπου η συχνότητα εμφάνισης παρατηρούμενων μετρήσεων είναι ουσιαστικά μηδέν. Για την επίτευξη όσον το δυνατόν πιο σταθερής συμπεριφοράς δοκιμίων, είναι σημαντικό οι παρατηρούμενες ουρές της κατανομής να πέφτουν σημαντικά και αρκετά γρήγορα γύρω από την μέση τιμή (καλά ελεγχόμενη παραγωγή).



Σχήμα 2: Απεικόνιση της κατανομής που διέπει την αντοχή σκυροδέματος

Στα άκρα των περιοχών αντοχής σε θραύση του δοκιμίου για ένα δεδομένο σύνολο των συστατικών-υλικών συνθέσεως του σκυροδέματος (ingredients), η υπόθεση ενός κανονικά κατανεμημένου συνόλου των δεδομένων μπορεί σε ορισμένες περιπτώσεις να αποτελεί μια παραδοχή που δεν είναι έγκυρη (δηλ. τα προκύπτοντα δείγματα εμφανώς παρεκκλίνουν και δεν ακολουθούν την κανονική κατανομή). Στο συγκεκριμένο μετρούμενο χαρακτηριστικό (αντοχή θραύσεως) δεν είναι δυνατόν να μην συνυπολογίσουμε ότι δεν προκύπτουν αντοχές μικρότερες από το μηδέν (κάτω άκρο της κατανομής) καθώς επίσης ότι τα περισσότερα σκυροδέματα εμφανίζουν ένα ανώτατο όριο αντοχής (όριο θραύσης που διαμορφώνει το άνω όριο της διεργασίας). Σε αυτές τις περιπτώσεις το σύνολο δεδομένων εμφανίζει χαρακτηριστικά μιας κατανομής με πεπλάτυνση.

Ωστόσο, θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι τα χαμηλά όρια θραύσεων είναι αυτά τα οποία θα μας απασχολήσουν για τον προσδιορισμό και τον χαρακτηρισμό της αντοχής ενός τύπου σκυροδέματος. Επομένως η υπόθεση των κανονικά κατανεμημένων δεδομένων είναι επαρκώς αποδεκτή και δεν οδηγεί σε προβλήματα στην πράξη.

2.2.2. Χαρακτηριστικά και Επιθυμητά όρια αντοχής θραύσεως δοκιμίων

Όπως αναφέραμε και προηγουμένως, η διαδικασία παραγωγής σκυροδέματος αποτελεί μία προτυποποιημένη διεργασία, τα χαρακτηριστικά της οποίας, καθορίζονται από τον Ευρωπαϊκό Κανονισμό EN 206-1. Το πρότυπο EN 206-1, καθορίζει τη χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή ενός δοκιμίου σκυροδέματος σε όρους ενός προτύπου κυλίνδρου δοκιμής ή εναλλακτικά ενός προτύπου σε μορφή κύβου. Οι δοκιμές θραύσεως διεξάγονται σε δοκίμια ηλικίας 28 ημερών (δηλ. σε δοκίμια που έχουν στερεοποιηθεί τουλάχιστον 28 ημέρες από την σύνθεση του σκυροδέματος και σίγουρα όχι περισσότερο από ένα χρόνο από την παραγωγή του).

Η χαρακτηριστική αντοχή ορίζεται στο πρότυπο EN 206-1, ως η «τιμή της αντοχής (πίεσης μετρούμενης σε N/mm^2) κάτω από την οποία το 5% του πληθυσμού όλων των δοκιμίων σκυροδέματος υπό εξέταση, θα απορριφθεί».

Με απλά λόγια αυτό σημαίνει ότι αν όλα τα δοκίμια μιας παρτίδας εξετασθούν, μόλις το 5% των αποτελεσμάτων θραύσεως θα εμπίπτουν στη χαμηλότερη «ουρά» της κανονικής κατανομής και ως συνέπεια θα απορρίπτονται. Θα πρέπει να παρατηρηθεί ότι η χαμηλή ουρά ξεκινά $1.64 \times \sigma$ κάτω από την πραγματική μέση αντοχή θραύσεως της παρτίδας των δοκιμίων. Ωστόσο, η πραγματική μέση αντοχή θραύσεως δεν είναι γνωστή μέχρις ότου το σκυρόδεμα που έχει παραχθεί να ελεγχθεί όλο, και κατά συνέπεια, η επιθυμητή μέση αντοχή (Target Mean Strength - TMS) συνήθως ορίζεται σε κάποια ανώτερη τιμή για να εξασφαλίσει ότι το σκυρόδεμα επιτυγχάνει τουλάχιστον μία καθορισμένη χαρακτηριστική αντοχή.

Η μέση προσδοκώμενη αντοχή στόχου (TMS) δίνεται στην Εξίσωση 1.

$$TMS = f_{ck} + k \times \sigma \quad (\text{εξ. 2.2.1})$$

Όπου:

TMS = μέσο όριο θραύσης (αντοχή – στόχος)

f_{ck} = χαρακτηριστική θλιπτική αντοχή

σ = εκτίμηση για την τυπική απόκλιση του πληθυσμού

k = στατιστική σταθερά

$k \times \sigma$ = το περιθώριο διακύμανσης του πληθυσμού

Το σταθερό σημείο στην κατανομή είναι η καθορισμένη χαρακτηριστική αντοχή – όριο θραύσεως (το οποίο στο τέλος ορίζει και τον τύπο του σκυροδέματος). Αξίζει να παρατηρήσουμε ότι αυτό το σημείο αυξάνεται καθώς αυξάνεται το περιθώριο ή/και η τυπική απόκλιση (αυτό γίνεται σαφέστερο στον πίνακα που ακολουθεί).

2.3. Το πρότυπο EN 206-1 και οι εμπλοκές που αυτό δημιουργεί στην αξιολόγηση των δοκιμών σκυροδέματος

Ενδεικτικά η μέση αντοχή (προσδοκούμενος στόχος) για ένα τύπο σκυροδέματος C25/30 δίνεται στον Πίνακα 1. Μια τυπική απόκλιση (σ) της τάξης των 3 N/mm² είναι ενδεικτική ενός σκυροδέματος με χαμηλή μεταβλητότητα ενώ μία τιμή της υάξης των 6 N/mm² αντιστοιχίζεται σε υψηλή μεταβλητότητα.

Table 1: Target mean strength for specified characteristic strength of 30N/mm² (cube)

Margin	Area in lower tail (i.e. percentage below characteristic strength)	Target mean strength (cube), N/mm ²	
		$\sigma = 3 \text{ N/mm}^2$	$\sigma = 6 \text{ N/mm}^2$
1.64 σ	5%	35	40
1.96 σ	2.5%	36	42
2.00 σ	2.28%	36	42
2.33 σ	1.0%	37	44
3.0 σ	0.13%	39	48

The numbers in this table have been rounded.

Η αντοχή του σκυροδέματος κάτω από τη χαρακτηριστική αντοχή δεν θα πρέπει να θεωρείται ως μια αποτυχία της διεργασίας παραγωγής, καθώς στατιστικά το 5% των αποτελεσμάτων της αναμένονται (και είναι αποδεκτό), να εκπέσουν κάτω από την τιμή αυτή.

Για διαρθρωτικούς λόγους ασφαλείας, μια παρτίδα με μια συγκεκριμένη αντοχή σημαντικά κάτω από τη χαρακτηριστική αντοχή, αποκλείεται, ακόμη και αν αποτελεί αναμενόμενο μέρος ενός πληθυσμού. Κατά συνέπεια, η προδιαγραφή EN 206-1 καθορίζει μια ελάχιστη απαίτηση αντοχής για μεμονωμένα αποτελέσματα (f_{ci}) του ($f_{ck} - 4$).

Κάθε παρτίδα κάτω από αυτό το όριο θραύσης θεωρείται ως μια μη συμμορφούμενη παρτίδα.

Ο κίνδυνος της μη συμμόρφωσης μειώνεται, καθώς αυξάνεται το περιθώριο απόκλισης (γεγονός αναμενόμενο με βάση την προηγούμενη φόρμουλα). Οι στατιστικές μέθοδοι χρησιμοποιούνται για την ποσοτικοποίηση του κινδύνου αυτού. Για ένα δεδομένο περιθώριο η πιθανότητα ενός αποτελέσματος δοκιμής πέφτει κάτω από την καθορισμένη χαρακτηριστική αντοχή. Η αποτυχία ενός σκυροδέματος βάσει του κριτηρίου αντοχής, συναρτήσει παραμέτρων τυπικής απόκλισης, δίδεται στον Πίνακα 2.

Table 2: Effect of margin on proportion of concrete below characteristic strength; and risk of failing the strength criterion for individual batches

Margin	Probability of a test result being below the characteristic strength	Risk of failing the strength criterion for individual batches	
		$\sigma = 3 \text{ N/mm}^2$	$\sigma = 6 \text{ N/mm}^2$
1.64 σ	1 in 20 (5%)	0.1%	1%
1.96 σ	1 in 40 (2,5%)	0.05%	0.4%
2.33 σ	1 in 100 (1%)	0.01%	0.1%
3.08 σ	1 in 1000 (0,1%)	0.0005%	0.01%

Ο Πίνακας 2 δείχνει ότι η πιθανότητα εμφάνισης που έχει ένα αποτέλεσμα κάτω από την καθορισμένη χαρακτηριστική τιμή θραύσεως είναι ανεξάρτητη από την τυπική απόκλιση, (καθώς το περιθώριο βασίζεται στην τυπική απόκλιση), αλλά ο κίνδυνος της αποτυχίας του κριτηρίου για μεμονωμένες παρτίδες αυξάνεται καθώς η τυπική απόκλιση αυξάνεται.

Επομένως το ποσοστό της παρτίδας σκυροδέματος το οποίο είναι αποδεκτό ή μη αποδεκτό αποτελεί συνάρτηση των ορίων τυπικής απόκλισης.

Αξίζει να σημειωθεί ότι ο ορισμός της «χαρακτηριστικής αντοχής» στο πρότυπο EN 206-1:2000 δημιουργεί τέτοιου τύπου εξαρτήσεις. Για έναν δομικό μηχανικό, η φράση «ο όγκος του σκυροδέματος υπό εξέταση», μπορεί να εφαρμόζεται σε όλους του τύπους σκυροδέματος, στη δομή τους αλλά και γενικά στο σκυρόδεμα ως ένα ενιαίο στοιχείο της εν λόγω δομής, ακόμη και αν αυτό περιλαμβάνει έστω μια και μόνη παρτίδα.

Για τη συμμόρφωση με το πρότυπο EN 206-1, ο «όγκος υπό εξέταση» είναι όλα το σκυρόδεμα σε μια περίοδο αξιολόγησης.

Καμία από τις ερμηνείες αυτής της φράσης δεν είναι κατάλληλη για χρήση σε συστήματα ελέγχου καθώς σε αυτήν την περίπτωση η διαδικασία παραγωγής είναι συνεχής στον χρόνο με αποτέλεσμα να μην είναι σαφή και διακριτά τα όρια της έννοιας της «παρτίδας σκυροδέματος».

Οι Caspeele και Taerwe έχουν προτείνει ότι, εάν η παραγωγή επιτυγχάνει το όριο μιας μέσης εξερχόμενης ποιότητας (Average Outcome Quality Level - AOQL) της τάξης

του 5%, η παραγωγή μπορεί να θεωρηθεί ως αποδεκτή δηλ. ότι επιτυγχάνει την απαιτούμενη χαρακτηριστική αντοχή του τύπου του σκυροδέματος στον οποίο αναφέρεται.

2.4. Η τυπική απόκλιση ως μέτρο αξιολόγησης των δοκιμίων σκυροδέματος και ο υπολογισμός της

Η τυπική απόκλιση ενός πληθυσμού γίνεται πραγματικά γνωστή μόνο εφόσον κάθε παρτίδα σκυροδέματος ελεγχθεί, θεωρώντας δηλ. ολόκληρη την παρτίδα ως διακριτά δοκίμια προς αξιολόγηση. Όπως είναι εύκολα κατανοητό κάτι τέτοιο στην πράξη δεν είναι ποτέ δυνατόν να εφαρμοσθεί.

Ωστόσο, εάν δεν είναι διαθέσιμα 35 ή περισσότερα δοκίμια προς αξιολόγηση που έχουν δώσει αποτελέσματα αντοχής, η εκτιμώμενη τυπική απόκλιση, είναι πιθανό να είναι πολύ κοντά στην πραγματική τιμή της τυπικής απόκλισης.

Αυτός είναι κυρίως ο λόγος για τον οποίο το πρότυπο EN 206-1 απαιτεί 35 δοκίμια σε κάθε έλεγχο για τον υπολογισμό μας αρχικής τυπικής απόκλισης.

Όταν το πλήθος των υπό εξέταση δοκιμίων είναι $n \geq 35$, η τυπική απόκλιση μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την εξίσωση 2.4.1:

$$s = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}, \quad (\text{εξ. 2.4.1})$$

Εναλλακτικά η τυπική απόκλιση της παρτίδας μπορεί να προσδιοριστεί από τον εμπειρικό τύπο μέσω μιας προσέγγισης της μέσης τιμής διαδοχικών ζευγών

$$\text{Μέση σειρά διαδοχικών ζευγών} = 1,128 \times \sigma \quad (\text{εξ. 2.4.2})$$

ή,

$$\text{Τυπική απόκλιση } (\sigma) = 0,886 \times \text{μέσο εύρος των διαδοχικών ζευγών των αποτελεσμάτων} \quad (\text{εξ. 2.4.3})$$

Η σειρά άθροισης κάνει χρήση αριθμητικών διαφορών μεταξύ των διαδοχικών αποτελεσμάτων και η διαφορά λαμβάνεται πάντοτε ως θετικός αριθμός, π.χ. $|2-3| = 1$.

Η μεθοδος μέσω των ζευγών υπολογισμού της τυπικής απόκλισης είναι ιδιαίτερα κατάλληλη για πληθυσμούς όπου υπάρχει βηματική αλλαγή στην μέση τιμή από το σύνολο

δεδομένων, όπως π.χ. στην περίπτωση παρτίδας σκυροδέματος, όπου η συνεισφορά δειγμάτων παρτίδας περιορίζεται σε ένα μόνο ζεύγος εκτίμησης αποτελεσμάτων. Στην παραγωγή σκυροδέματος μικρές αλλαγές βηματικού τύπου στην μέση εκτίμηση της αντοχής θραύσεως (που συνήθως οφείλονται σε μικρές αλλαγές στην περιεκτικότητα ενός συστατικού στο μίγμα), είναι πιο κοινές (διαδεδομένες) απ'ότι ολισθήσεις σε ολόκληρες περιοχές της μέσης τιμής.

Το γεγονός αυτό επαληθεύεται στην εκτίμηση της τυπικής απόκλισης σε ένα σύνολο πραγματικών δειγμάτων μιας παρτίδας σκυροδέματος.

<i>Result</i>	<i>Transposed cube strength, N/mm²</i>	<i>Range, N/mm²</i>	<i>Calculation of standard deviation</i>
1	54.5		<i>Estimation of the standard deviation</i> = 0.886 x 51 / 14 = 0.886 x 3.64 = 3.0 N/mm ² (rounded to the nearest 0.5 N/mm ²)
2	52.5	2.0	
3	49.5	3.0	
4	47.5	2.0	
5	49.0	1.5	
6	43.5	5.5	
7	54.5	11.0	
8	46.5	8.0	
9	50.0	3.5	
10	50.5	0.5	
11	47.0	3.5	
12	48.5	1.5	
13	53.0	4.5	
14	51.5	1.5	
15	48.5	3.0	
<i>Sum of ranges</i>		51.0	
<i>Mean of ranges</i>		3.64	

Τα δεκαπέντε (15) δεδομένα του πίνακα έχουν μετρηθεί υποθέτοντας μια μέση δύναμη θραύσεως της τάξης των 37.0 N/mm² και μία τυπική απόκλιση της τάξης των 3.5 N/mm² για την παρτίδα σκυροδέματος. Τα δεκαπέντε (15) αυτά δείγματα έχουν επαναληφθεί για να κατασκευάσουν τεχνητά ένα σύνολο 30 στοιχείων (τεχνητή επέκταση του πλήθους των μετρήσεων), βλέπε σχήμα 2α. Η τυπική απόκλιση με χρήση των 30 δεδομένων που δίνονται στο Σχήμα 2α είναι:

3,6 N/mm² όταν προσδιορίζεται με την πρότυπη μέθοδο

3,7 N/mm² όταν καθορίζεται από 0,886 x μεσο ευρος

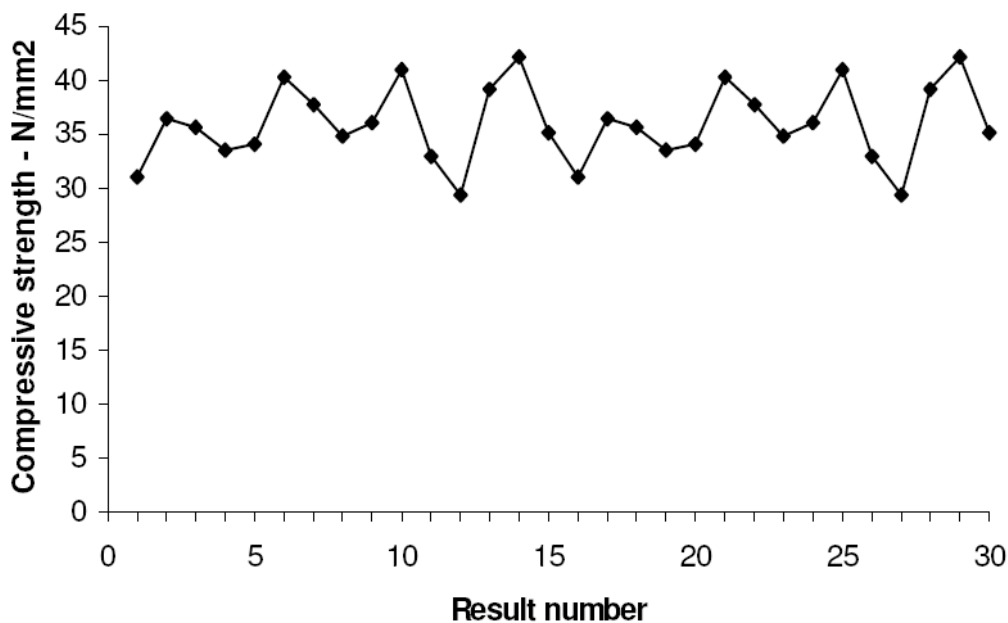
Για να φανεί η ενδεχόμενη επίδραση μιας μεταβολής της μέσης αντοχής θραύσεως στην τυπική απόκλιση, εισάγεται μια ακραία μείωση στην μέση αντοχή κατά 5.0 N/mm² στο αποτέλεσμα 16 και κάτω δηλ. στα στοιχεία 16 έως 30 σε σχέση με τις αρχικές τιμές

στο Σχήμα 2α. Η προκύπτουσα διασπορά των δεδομένων γύρω από αυτές τις μέσες αντοχές είναι αμετάβλητη. Η τυπική απόκλιση των 30 νέων δειγμάτων που δίδονται στο Σχήμα 2b είναι:

4,4 N/mm² όταν προσδιορίζεται με την πρότυπη μέθοδο

3,8 N/mm² όταν καθορίζεται από 0,886 x μέσο εύρος

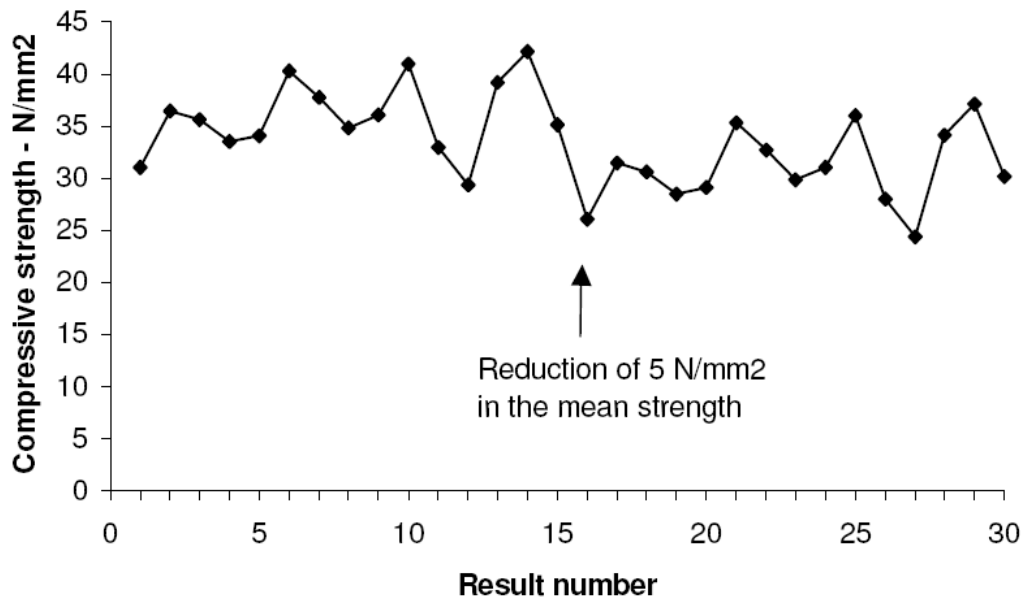
Αυτό δείχνει ότι η τυπική απόκλιση που υπολογίζεται από το μέσο εύρος σαφώς έχει επηρεαστεί λιγότερο από την αλλαγή στη μέση τιμή για την αντοχή θραύσεως.



Σχήμα 2α: 30 δείγματα δεδομένων που προκύπτουν υποθέτοντας μια μέση αντοχή θραύσεως 37.0 N/mm² και μία τυπική απόκλιση 3.5 N/mm² χρησιμοποιώντας μία ομάδα 15 πραγματικών δειγμάτων που επαναλαμβάνεται για δεύτερη φορά.

Η πραγματική τυπική απόκλιση ενός πληθυσμού, σ , μπορεί να καθορισθεί μόνον αφού όλος ο πληθυσμός δειγμάτων έχει ελεγχθεί, γεγονός το οποίο καθίσταται μη εφαρμόσιμο στην περίπτωση μιας παρτίδας δοκιμίων που έχει προκύψει δειγματοληπτικά. Όσο πιο πολλά δείγματα ελεγχθούν, τόσο πιο αξιόπιστη θα είναι η κατ'εκτίμηση τυπική απόκλιση του πληθυσμού. Όπως ήδη έχει αναφερθεί το πρότυπο EN 206-1 απαιτεί τουλάχιστον 35 δείγματα αρχικά για να εκτιμηθεί η τυπική απόκλιση του πληθυσμού.

Πριν την απόκτηση της κατ'εκτίμηση τυπικής απόκλισης του πληθυσμού, το σκυρόδεμα ελέγχεται από πιο συντηρητικούς αρχικούς κανόνες δοκιμής.



Σχήμα 2β: Πλήθος 30 δειγμάτων όπως στο προηγούμενο σχήμα, με μια μείωση στην μέση αντοχή θραύσεως κατά $5,0 \text{ N/mm}^2$ εισηγμένη από το αποτέλεσμα 16 και μετά

Χωρίς μια εκτιμώμενη τυπική απόκλιση του πληθυσμού, δεν είναι δυνατόν να κανουμε χρήση διαγραμμάτων ελέγχου για τον έλεγχο της παραγωγής σκυροδέματος.

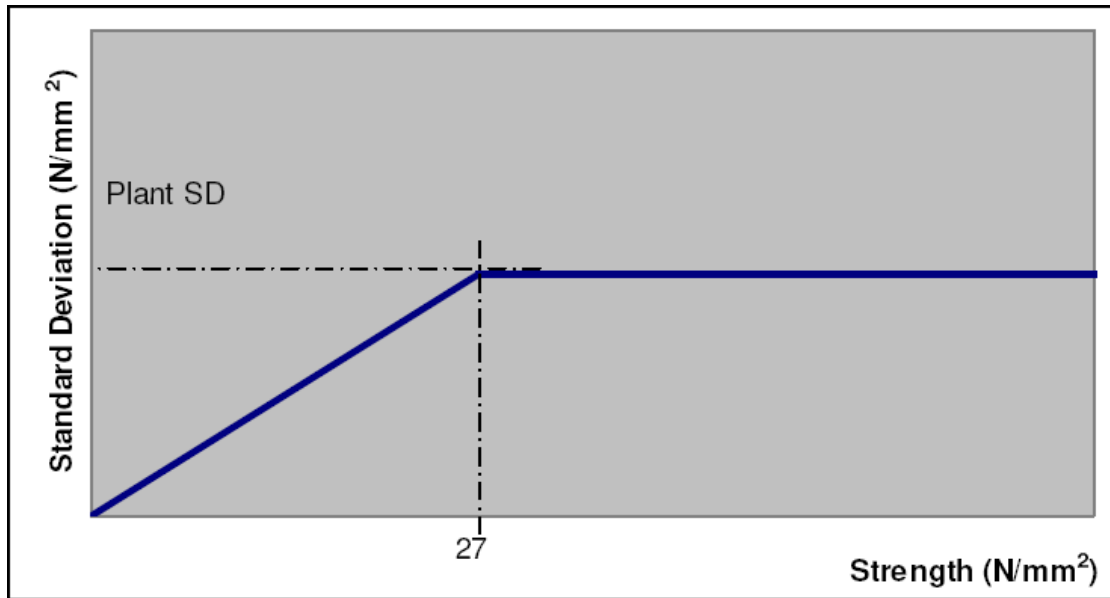
2.4.1. Μεθοδολογίες Επαλήθευσης των αρχικών εκτιμήσεων της τυπικής απόκλισης του σκυροδέματος

Μετά την εκτίμηση της αρχικής τυπικής απόκλισης του πληθυσμού, το πρότυπο EN 206-1 επιτρέπει δύο μεθόδους για την επαλήθευση της αρχικής εκτίμησης:

- Η πρώτη μέθοδος βασίζεται στην υπόθεση ότι η τυπική απόκλιση των πιο πρόσφατων 15 αποτελεσμάτων δεν αποκλίνει σημαντικά από την τιμή που προέκυψε.
- Η δεύτερη μέθοδος περιλαμβάνει τη χρήση συστημάτων συνεχούς ελέγχου στο χρόνο.

Η τυπική απόκλιση για την αντοχή τείνει να είναι σταθερή για μίγματα σκυροδέματος μέσης και υψηλής αντοχής, αλλά για μίγματα χαμηλότερης περιεκτικότητας σε τσιμέντο, αυτή τείνει να αυξηθεί αναλογικά με τη μέση αντοχή θραύσεως.

Η παραπάνω σχέση όπως απεικονίζεται στο σχήμα 3 μπορεί να θεωρηθεί δεδομένη σε αυτήν την προσέγγιση. Στην πράξη αυτό σημαίνει ότι η τυπική απόκλιση για σκυροδέματα που αναφέρονται σε μια χαρακτηριστική αντοχή θραύσεως της τάξης των 20 N/mm² ή περισσότερο, βασίζεται σε δοκιμή και υπολογισμό, ενώ για σκυροδέματα με μικρότερες μέσες τιμές αντοχής θραύσεως μια εκτίμηση της τυπικής απόκλισης μπορεί να βασιστεί σε μεθόδους αριθμητικής παρεμβολής.



Σχήμα 3: απλοποιημένο μοντέλο υπολογισμού τυπικής απόκλισης συναρτήσει της μέσης αντοχής θραύσεως δοκιμίων σκυροδέματος

2.4.2. Καθορισμός των ορίων αντοχής θραύσεως των δοκιμίων σκυροδέματος

Η αντοχή θραύσεως (επιθυμητός στόχος) κατά την παραγωγή ενός τύπου σκυροδέματος, θα πρέπει να επιτευχθεί ως μέτρο ισορροπίας των ακόλουθων απαιτήσεων:

- Υψηλή πιθανότητα επίτευξης ενός πληθυσμού με τουλάχιστον την καθορισμένη χαρακτηριστική αντοχή θραύσεως (σύστημα)
- Χαμηλό κίνδυνο αποτυχίας του κριτηρίου της ελάχιστης αντοχής (σύστημα)
- Ελαχιστοποίηση του καταναλωτικού κινδύνου (καταναλωτής)
- Ελαχιστοποίηση του κινδύνου παραγωγής (παραγωγός)
- Ανταγωνιστικότητα και κόστος παραγωγής για τον παραγωγό σκυροδέματος (καταναλωτής-παραγωγός)

Η αντοχή θραύσεως (επιθυμητός στόχος) επιλέγεται από τον παραγωγό για δεδομένο τύπο σκυροδέματος σύμφωνα όμως με προδιαγραφές οι οποίες τον υποχρεώνουν να συμμορφώνεται με κάποιες ελάχιστες τιμές.

Η αντοχή θραύσεως δεν πρέπει να είναι ποτέ μικρότερη από την τιμή που προκύπτει από την φόρμουλα:

$$(f_{ck} + 1,64 \times \sigma) \quad (\text{εξ. 2.4.4})$$

η οποία είναι συνήθως υψηλότερη από την τιμή που απαιτεί ο τύπος του σκυροδέματος από την πλευρά του καταναλωτή καθώς και του προτύπου, δηλ. η ανωτέρω φόρμουλα διασφαλίζει επιπλέον την ασφάλεια του καταναλωτή σκυροδέματος.

Εκτός από φόρμουλες παραγωγής που κατά ένα μέρος είναι ελεγχόμενες από τον παραγωγό, επιπλέον, εθνικές απαιτήσεις, που μπορεί να προέρχονται από εσωτερικές προδιαγραφές εθνικών φορέων μπορεί να επιβάλουν τους «πρακτικά» ελάχιστους στόχους αντοχής θραύσεως. Εικδότερα, η εμπειρία από την εφαρμογή των μεθοδολογιών και κανόνων για την επιλογή αντοχής θραύσεως σκυροδέματος στο Ηνωμένο Βασίλειο (UK) απαιτεί την εφαρμογή της φόρμουλας:

$$(f_{ck} + 1,96 \times \sigma) \quad (\text{εξ. 2.4.5})$$

διασφαλιζόμενη σε ένα ρυθμό δοκιμής τουλάχιστον 16 δοκιμίων ανά μήνα. Ο ρυθμός ελέγχου για την συμμόρφωση στην παραπάνω προδιαγραφή δίνει μια καλή ισορροπία μεταξύ αυτών των αντικρουόμενων απαιτήσεων. Σε μια συγκεκριμένη οικογένεια σκυροδέματος (τύπου) η εφαρμογή της ανωτέρω φόρμουλας, σε ένα περιθώριο τυπικής απόκλισης περίπου $3 \times \sigma$, καταλήγει σε 1:1000 κίνδυνο αποτυχίας της ελάχιστης απαίτησης αντοχής κλίμακας-τάξης ($f_{ck} - 4$).

Υπό αυτό το πρίσμα, τα δεδομένα που συλλέγονται από ένα φορέα πιστοποίησης στο Ηνωμένο Βασίλειο (UK) για μεμονωμένες παρτίδες μη συμμορφούμενες με τον ανωτέρω κανόνα, δείχνουν ότι το πραγματικό ποσοστό της μη συμμόρφωσης είναι μια τάξη μεγέθους χαμηλότερα από ότι θα προέκυπτε χωρίς την εφαρμογή του κανόνα και σίγουρο αυτό οφείλεται στον δραστικό έλεγχο της παραγωγής που έχει επιτευχθεί.

2.5. Απλοποιημένα Διαγράμματα Δεδομένων και η χρήση τους στην αξιολόγηση της παραγωγής σκυροδέματος

Τα απλα διαγράμματα ελέγχου των δεδομένων δεν θα πρέπει να θεωρούνται ως μη σημαντικά για τον έλεγχο των διεργασιών παραγωγής. Λόγω της απλότητας τους καθώς και ευκολίας στην περιγραφή/χρήση τους, χρησιμοποιούνται ευρύτατα για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της ποιότητας στην παραγωγή σκυροδέματος. Δύο βασικοί τύποι διαγραμμάτων ελέγχου Ελέγχου χρησιμοποιούνται:

- *Μονοπαραγοντικά* διαγράμματα ελέγχου. Είναι ένα διάγραμμα ελέγχου της ποιότητας ενός μόνο χαρακτηριστικού (π.χ. μέση αντοχή θραύσεως)
- *Πολυπαραγοντικά* διαγράμματα ελέγχου. Είναι διαγράμματα ελέγχου μιας στατιστικής που συνοψίζει ή αντιπροσωπεύει περισσότερα από ένα χαρακτηριστικά ποιότητας (π.χ. συντελεστές διακύμανσης ποιότητας)

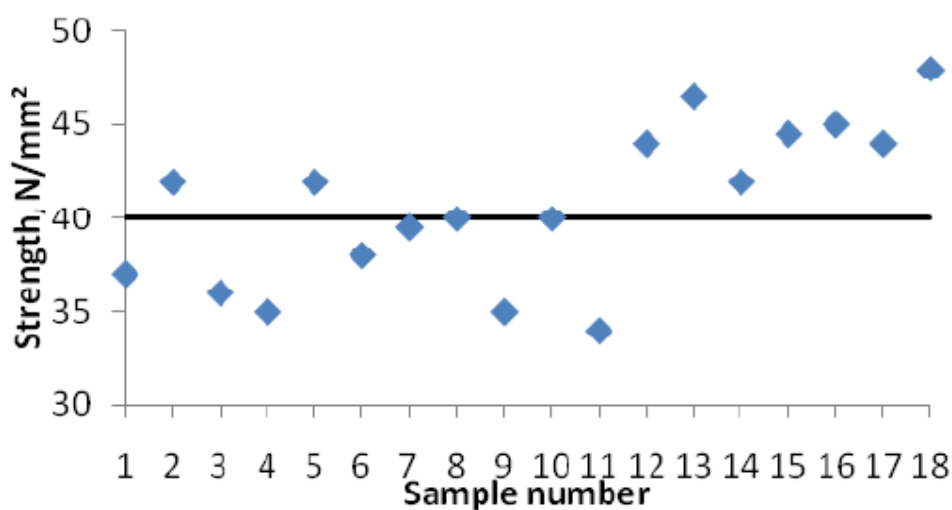
Στα απλά διαγράμματα ελέγχου η τιμή ενός χαρακτηριστικού ποιότητας που έχει μετρηθεί ή υπολογιστεί από ένα δείγμα, αντιστοιχίζεται σε σχέση με τον αριθμό του δείγματος συναρτήσει του χρόνου.

Τα απλα διαγράμματα δεδομένων είναι χρήσιμα στην παροχή μια οπτικής εικόνας της παραγωγής αλλά και στον εντοπισμό «ασυνήθιστων» αποτελέσματος. Απλά διαγράμματα μπορούν επίσης να παρέχουν μια ένδειξη των τάσεων, αλλά μια πιο συγκεκριμένη εικόνα για την γενική διασπορά των δεδομένων μπορεί να προσδιοριστεί μόνο από περισσότερο σε βάθος ανάλυση των δεδομένων.

Υπό το πρίσμα αυτό εξετάζουμε τα δεδομένα του Πίνακα 4 τα οποία απεικονίζονται στο Σχήμα 4. Μια ανασκόπηση των δεδομένων, δείχνει ότι όλα τα αποτελέσματα είναι εντός ενός διαστήματος $\pm 8 \text{ N/mm}^2$ της επιθυμητής τιμής αντοχής θραύσεως. Τα αποτελέσματα είναι αρκετά ομοιόμορφα κατανεμημένα γύρω από τον στόχο (2 στο στόχο, 9 με υψηλότερες τιμές και 7 με χαμηλότερες). Για τον λόγο αυτό και δεδομένου ότι η λειτουργία της παραγωγικής διαδικασίας εμφανίζεται εντός των προδιαγραφών, δεν είναι άμεσα εμφανή τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από τα δεδομένα.

Table 4: Example data for mean strength with a target strength of 40N/mm²

Result	28 day strength, N/mm ²	Result	28 day strength, N/mm ²
1	37	10	40
2	42	11	34
3	36	12	44
4	35	13	46.5
5	42	14	42
6	38	15	44.5
7	39.5	16	45
8	40	17	44
9	35	18	48



Εικόνα 4: Απλό μονοπαραμετρικό διάγραμμα ελέγχου της αντοχής θραύσεως

2.5.1. Διαγράμματα Shewart

Ενώ οι γραφικές παραστάσεις μπορούν να δώσουν χρήσιμες πληροφορίες σχετικά με το πρότυπο μιας παραγωγικής διαδικασίας, το διάγραμμα ελέγχου γίνεται ένα πολύ πιο ισχυρό εργαλείο εάν στατιστικοί κανόνες εφαρμόζονται συστηματικά στα δεδομένα. Τα συστήματα ελέγχου Shewart μετρούν τις μεταβλητές στις διαδικασίες παραγωγής (π.χ. την μέση αντοχή θραύσεως). Μπορούν επιπλέον, να κάνουν χρήση των υπολογισμένων ορίων ελέγχου και να δώσουν συναγερμούς προειδοποίησης (alerts) με βάση τη μετρούμενη μεταβολή στην παραγωγική διαδικασία.

Το πρότυπο ISO 8258 παρέχει γενικές πληροφορίες σχετικά με τα διαγράμματα ελέγχου Shewhart ενώ το πρότυπο ISO 7966 δίνει γενικές πληροφορίες σχετικά με τα διαγράμματα έλεγχου Shewhart για την έλεγχο εκτίμησης των αποτελεσμάτων.

Το διάγραμμα Shewhart κάνει χρήση μιας οριζόντιας κεντρικής γραμμής, η οποία αντιπροσωπεύει την επιθυμητή μέση τιμή των αποτελεσμάτων των δοκιμών επί των δειγμάτων που ελήφθησαν από την παραγωγή σκυροδέματος. Στην περίπτωση του σκυροδέματος, η μέση αντοχή θραύσης για ένα γράφημα ελέγχει την αντοχή σε θλίψη. Επιπλέον γραμμές αντιπροσωπεύουν το ανώτατο όριο ελέγχου (Upper Control Limit - UCL), το κάτω όριο ελέγχου (Lower Control Limit - LCL), το ανώτατο όριο προειδοποίησης (Upper Warning Limit - UWL) και το κατώτερο όριο προειδοποίησης (Lower Warning Limit - LWL). Με βάση αυτά τα όρια στα διαγράμματα, επιτυγχάνονται ενέργειες ρύθμισης της παραγωγής, εάν ένα αποτέλεσμα είναι πέρα από τα όρια ελέγχου ή/και προειδοποίησης.

Τα UWL και LWL καθορίζονται σε ένα επίπεδο, έτσι ώστε τα περισσότερα από τα αποτελέσματα να βρίσκονται εντός της περιοχής που ορίζουν αυτές οι δύο γραμμές, όταν ένα σύστημα λειτουργεί υπό έλεγχο (plant in-control). Τα συγκεκριμένα όρια δεν αποτελούν ορία προδιαγραφών, αλλά όρια «προειδοποίησης» με βάση τη μεταβλητότητα των διαδικασιών παραγωγής. Δεδομένου ότι οι συγκεκριμένες αντοχές θραύσεως ακολουθούν μια κανονική κατανομή (Σχήμα 2), έπεται ότι υπάρχει μια πιθανότητα 50% ένα αποτέλεσμα να είναι πάνω από το TMS ή κάτω από αυτό. Από τις προηγούμενες παραγράφους ήδη φάνηκε ότι ένα περιθώριο με βάση την φόρμουλα $1,96 \times \sigma$ θα οδηγήσει σε 2,5% των αποτελεσμάτων κάτω του χαρακτηριστικού ορίου αντοχής θραύσεως.

Ορισμένες μεταβλητές, (π.χ. ο δείκτης ποιότητας), έχουν ανάγκη χρήσης και των δύο ορίων και σε αυτές τις περιπτώσεις τα διαγράμματα ελέγχου είναι απαραίτητο να έχουν τόσο UWL όσο και LWL.

Για παράδειγμα στην αντοχή θλίψεως μία υψηλή τιμή (η οποία καταφανώς ξεπερνά το ελάχιστο επιτρεπτό όριο) δεν είναι σημαντική από πλευράς καταναλωτή, ενώ από την άποψη της οικονομίας κλίμακας της παραγωγής, αυτό έχει μεγάλη σημασία.

Συνεπώς στην πράξη, τόσο το ανώτερο όσο και τα κατώτερα όρια προειδοποίησης έχουν σημασία ακόμη και για μια μεταβλητή που έχει μια ενιαία οριακή τιμή, όπως π.χ. η αντοχή θλίψεως του σκυροδέματος.

Ρύθμιση των άνω και κάτω ορίων προειδοποίησης με βάση την φόρμουλα $1.96 \times \sigma$ οδηγεί στην προσδοκία ότι το 95% των αποτελεσμάτων θα ευρεθεί εντός των ορίων, ενώ 2,5% ανά πλευρά σε καθεμία από τις «ουρές» εκτός της κανονικής κατανομής. Αν χρησιμοποιηθεί ένα περιθώριο $3,0 \times \sigma$, υπάρχει μία πολύ μικρή πιθανότητα ενός αποτελέσματος να βρίσκεται εκτός αυτού του ορίου λόγω φυσικής μεταβολής (0,3% για το τεστ διπλής-ουράς).

Ένα διάγραμμα ελέγχου Shewhart μπορεί να κατασκευαστεί με βάση την εκλογή των ορίων για τις ανωτέρω γραμμές σύμφωνα με:

$$\begin{aligned} UCL &= TMS + 3 \times \sigma && (\text{εξ. 2.5.1α-δ}) \\ LCL &= TMS - 3 \times \sigma \\ UWL &= TMS + 2 \times \sigma \\ LWL &= TMS - 2 \times \sigma \end{aligned}$$

Η πιθανότητα ενός αποτελέσματος που δεν εμπίπτει είτε στο UWL είτε στο LWL είναι 4,56%, δηλαδή 2,28% πάνω από το UWL και 2,28% κάτω από το LWL (βλ. Πίνακα 2). Η πιθανότητα δύο διαδοχικών αποτελεσμάτων που βρίσκονται έξω απ τα όρια καθαρά απο τυχη είναι $0,0456 \times 0,0456 = 0,002079$ ή 0,21%.

Η πιθανότητα ότι οι δύο αποτελέσματα είναι είτε αμφότερα πάνω ή κάτω από μία γραμμή ορίου (δηλ. στην ίδια διεύθυνση) είναι μόλις 0,05%. Ένα τέτοιο αποτέλεσμα είναι πολύ ισχυρή απόδειξη ότι το αναμενόμενο συμβάν (που αναφέρεται στο όριο αυτής της διεργασίας) έχει πολύ μικρή πιθανότητα να συμβεί και επομένως αν συμβεί αποτελεί μια ένδειξη μη ικανοποιητικής λειτουργίας της μονάδας παραγωγής σκυροδέματος (τάση για λειτουργία εκτός ελέγχου).

2.5.2. Κριτήρια δράσης Shewart

Τα κριτήρια δράσης Shewart αναφέρονται στον καθορισμό των περιθωρίων ασφαλείας για την ανάληψη διενεργειών από το αυτοματοποιημένο σύστημα ή τον χειριστή του συστήματος για επαναφορά εντός των ορίων λειτουργίας της μονάδας παραγωγής.

2.5.2.1 Σημεία πέρα από τα UCL ή LCL

Η παρουσία ενός ή περισσότερων σημείων που βρίσκονται έξω από το UCL ή το LCL είναι πρωτεύουσα απόδειξη ότι το σύστημα είναι εκτός ελέγχου σε εκείνο το σημείο. Δεδομένου ότι υπάρχει μόνο μια 0,3% πιθανότητα ότι αυτό το αποτέλεσμα οφείλεται σε φυσικές μεταβολές της διεργασίας, είναι πιθανό ότι μια ιδιαίτερη μεταβολή θα είναι υπεύθυνη για την προκύπτουσα τιμή η οποία απαιτεί την άμεση έρευνα σχετικά με την αναζήτηση της αιτίας και των διορθωτικών ενεργειών που θα αναληφθούν.

2.5.2.2 Σημεία πέρα από τα UWL ή LWL

Η παρουσία των δύο διαδοχικών, ή περισσότερων από 1 στις 40, σημείων πέραν είτε επί της γραμμής προειδοποίησης αποτελεί απόδειξη ότι η διαδικασία είναι εκτός ελέγχου και χρειάζεται έρευνα των αιτίων και των ενεργειών που θα πρέπει να αναληφθούν.

2.5.2.3 Πρότυπα εντός των ορίων ελέγχου

Είναι επίσης δυνατόν να αναλυθούν τα δεδομένα ακόμα και αν δεν παραβιάζεται ούτε ο έλεγχος ούτε τα προειδοποιητικά όρια της διεργασίας, με στόχο να αξιολογηθεί κατά πόσον οι τάσεις παραγωγής είναι σημαντικές. Η ανάλυση των μετρήσεων μπορεί να δώσει την πρώτη προειδοποίηση ενός συστήματος που είναι επικείμενο να βρεθεί εκτός ελέγχου ακόμα και πριν κανένα σημείο της διεργασίας δεν έχει βρεθεί ακόμη πέρα από τα όρια προειδοποίησης.

Οι παρακάτω απλοί κανόνες έχουν προταθεί για ακολουθίες αποτελεσμάτων που παραμένουν εντός των ορίων προειδοποίησης:

- 1. Επτά ή περισσότερα συνεχόμενα αποτελέσματα βρίσκονται από την ίδια πλευρά της μέσης αντοχής θραύσεως*
- 2. Τουλάχιστον 10 από 11 αποτελέσματα βρίσκονται στην ίδια πλευρά της μέσης αντοχής θραύσεως*
- 3. Τουλάχιστον 12 από 14 αποτελέσματα βρίσκονται στην ίδια πλευρά της μέσης αντοχής θραύσεως*

4. Τουλάχιστον 14 από 17 αποτελέσματα βρίσκονται στην ίδια πλευρά της μέσης αντοχής στόχου

2.5.3. Έλεγχος δράσης βασισμένος στην τυπική απόκλιση

Ο έλεγχος και τα όρια προειδοποίησης που προσδιορίζονται από την τυπική απόκλιση της διεργασίας είναι σημαντικός. Συνεπώς θα πρέπει να παρακολουθείται διαρκώς η τυπική απόκλιση της παραγωγής σκυροδέματος. Καθώς ο υπολογισμός για τον προσδιορισμό της τυπικής απόκλισης είναι σχετικά περίπλοκος, χρησιμοποιείται η εναλλακτική μέθοδος που βασίζεται στην (εξ. 2), συνδέοντας την τυπική απόκλιση με το εύρος των ζευγών των αποτελεσμάτων. Σχεδιάζεται το τρέχον μέσο εύρος των τελευταίων n διαδοχικών αποτελεσμάτων, όπου $n \geq 15$ έναντι του αριθμού αποτελέσματος της δοκιμής. Στην συνέχεια επιλέγουμε την τυπική απόκλιση, η οποία θα ωθήσει σε ενέργειες (δράσεις) (λόγω μεταβολής της $\Delta\sigma$) και θα ορίσει τις γραμμές δράσης σε:

$$1,128 \times (\text{τρέχουσα τυπική απόκλιση}) \pm 1,128 \times \Delta\sigma \quad (\text{εξ. 2.5.2})$$

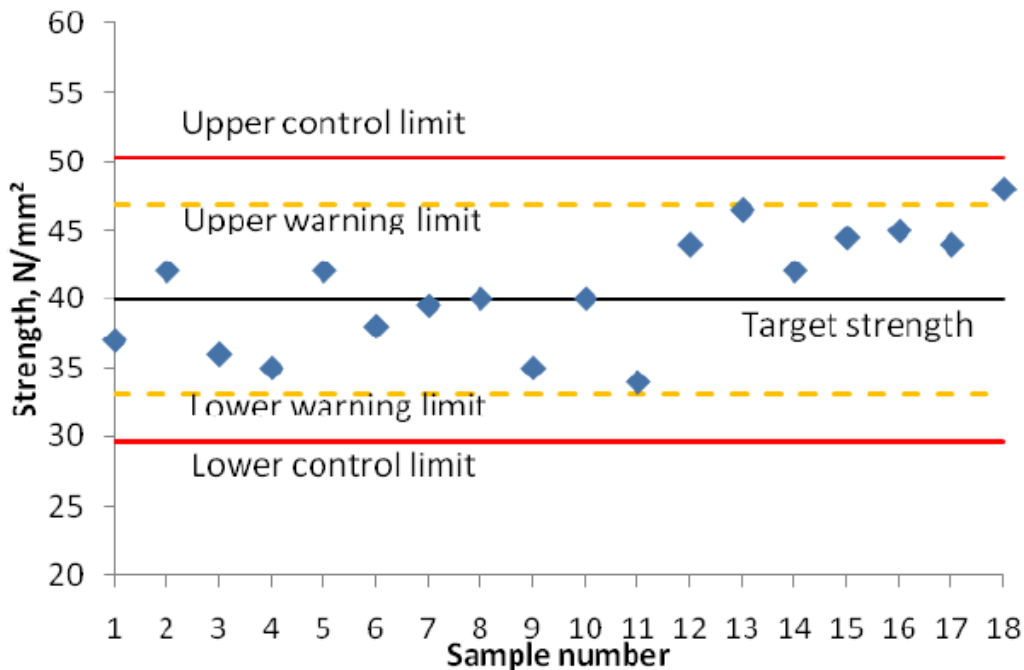
Εφαρμογή της ανωτέρω μεθοδολογίας καθώς και των τεχνικών που περιγράφηκαν δίνονται στην επόμενη παράγραφο.

2.5.4. Εφαρμογή των γραφικών μεθοδολογιών Shewart στην παραγωγή σκυροδέματος

Εξετάζουμε πάλι τα δεδομένα της αντοχής του Πίνακα 4 και υποβάλουμε αυτά σε μια ανάλυση Shewart χρησιμοποιώντας τους κανόνες που προβλέπονται στις προηγούμενες παραγράφους. Το Σχήμα 5 δείχνει τα δεδομένα πλαισιωμένα με κατάλληλα εκλεγμένες γραμμές UCL, LCL, UWL και LWL.

Άμεσα γίνεται εμφανές ότι το σημείο 18 έχει υπερβεί το UWL. Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτό δεν παραβιάζει τον κανόνα που ορίστηκε στην προηγούμενη παράγραφο (που απαιτεί 2 διαδοχικές μονάδες πάνω από τη UWL). Επίσης σε αυτό το σημείο, υπάρχει μια σειρά από 7 σημεία προς την ίδια πλευρά της μέσης αντοχής στόχου.

Το διάγραμμα Shewhart δείχνει ότι η διαδικασία είναι εκτός ελέγχου, δηλαδή η πραγματική μέση αντοχή είναι υψηλότερη από τη μέση αντοχή θραύσεως που απαιτείται.



Σχήμα 5: Εφαρμογή γραφικών διαγραμμάτων Shewart στα δεδομένα

2.5.5. Τροποποιημένη εφαρμογή των διαγραμμάτων ελέγχου Shewart

Εάν στόχος του διαγράμματος Shewart είναι να εκτιμηθεί κατά πόσον το επίπεδο παραγωγής είναι υψηλότερο από μια καθορισμένη χαρακτηριστική τιμή, μια τροποποιημένη εφαρμογή των διαγραμμάτων ελέγχου Shewart μπορεί να χρησιμοποιηθεί, κάνοντας χρήση συγκεκριμένων τροποποιημένων μεταβλητών. Αυτή η ειδική εφαρμογή της μεθόδου βασίζει τον έλεγχο στο ότι ο μέσος όρος των n μετρηθέντων αποτελέσματος αντοχής είναι μεγαλύτερος από μία κάτω γραμμή L_1 που βρίσκεται σε μια δεδομένη απόσταση από το f_{ck} λαμβάνοντας υπόψη την ανισότητα με τις ακόλουθες μεταβλητές:

$$L_1 \geq f_{ck} + (q_n \times s) \quad (\text{εξ. 2.5.3})$$

όπου

- Το q_n εξαρτάται από το n και το επιλεγμένο AOQL,

- Το s αποτελεί μια ενημερωμένη εκτίμηση της τυπικής απόκλισης (σ) της σχετικής παραγωγής.

Στην περίπτωση όπου $n \geq 15$ και $q_n \geq 1.48$, τα διαγράμματα Shewart θα ικανοποιήσουν την απαίτηση για AOQL της τάξης του 5%.

Το κριτήριο αυτό ικανοποιεί επίσης τα κριτήρια συμμόρφωσης για τη μέση αντοχή θραύσεως όπως ορίζεται στο πρότυπο EN 206-1.

Μια γραμμή προειδοποίησης σε κάποια υψηλότερη τιμή μπορεί επίσης να είναι κατάλληλη. Στην συνέχεια παρουσιάζεται η εφαρμογή της παραπάνω μεθόδου στα δεδομένα ενός εργοστασίου παραγωγής σκυροδέματος.

2.5.5.1 Εφαρμογή των τροποποιημένων μεθόδων των διαγραμμάτων Shewart στην διόρθωση της παραγωγής εργοστασίου σκυροδέματος

Ορισμός του προβλήματος: Ένα εργοστάσιο παραγωγής προκατασκευασμένου σκυροδέματος προτίθεται να χρησιμοποιήσει ένα διάγραμμα Shewart για να δείξει την συμμόρφωση της παραγωγής του με το κριτήριο της μέσης αντοχής θραύσεως του προτύπου EN 206-1. Λόγω των προδιαγραφών λειτουργίας των διεραγσιών οι προκύπτουσες αντοχές θραύσεως των δοκιμίων τείνουν να υπερβαίνουν τη χαρακτηριστική αντοχή του τύπου του σκυροδέματος μέσα σε λίγες μέρες μετά την παραγωγή του και ως εκ τούτου, οι υπεύθυνοι παραγωγής του εργοστασίου, επέλεξαν να δοκιμάσουν τα δοκίμια σκυροδέματος σε ηλικία 7 ημερών μετά την παραγωγή τους, για να βεβαιωθούν ότι τα επιθυμητά όρια των 28 ημερών όσον αφορά στην αντοχή, επιτυγχάνονται ήδη εντός 7 ημερών (τα δοκίμια των 7 ημερών εμφανίζουν χαμηλότερα όρια αντοχής θραύσεως σε σχέση με τα ίδια δοκίμια τα οποία θα οδηγούνταν σε έλεγχο αντοχής μετά από 28 ημέρες ωρίμανσης).

Καθώς οι θλιπτικές αντοχές των δοκιμίων αναμένεται να είναι πολύ πάνω από την καθορισμένη αντοχή, επιλέχθηκε η μη εφαρμογή γραμμής προειδοποίησης

Η συγκεκριμένη παραγωγή σκυροδέματος αφορά σε τύπο C25/30 και γίνεται χρήση δοκιμίων σε μορφή δοκιμίων παραγωγής.

Για την επίτευξη των παραπάνω προδιαγραφών παραστάθηκε η τρέχουσα μέση αντοχή των τελευταίων «n» συνεχόμενων αποτελεσμάτων, όπου «n» είναι ένας προκαθορισμένος αριθμός που είναι τουλάχιστον 15, απεικονίσιμη σε ένα διάγραμμα Shewart με μία οριακή γραμμή με τιμή εκλεγμένη σε $(f_{ck} + 1.48s)$.

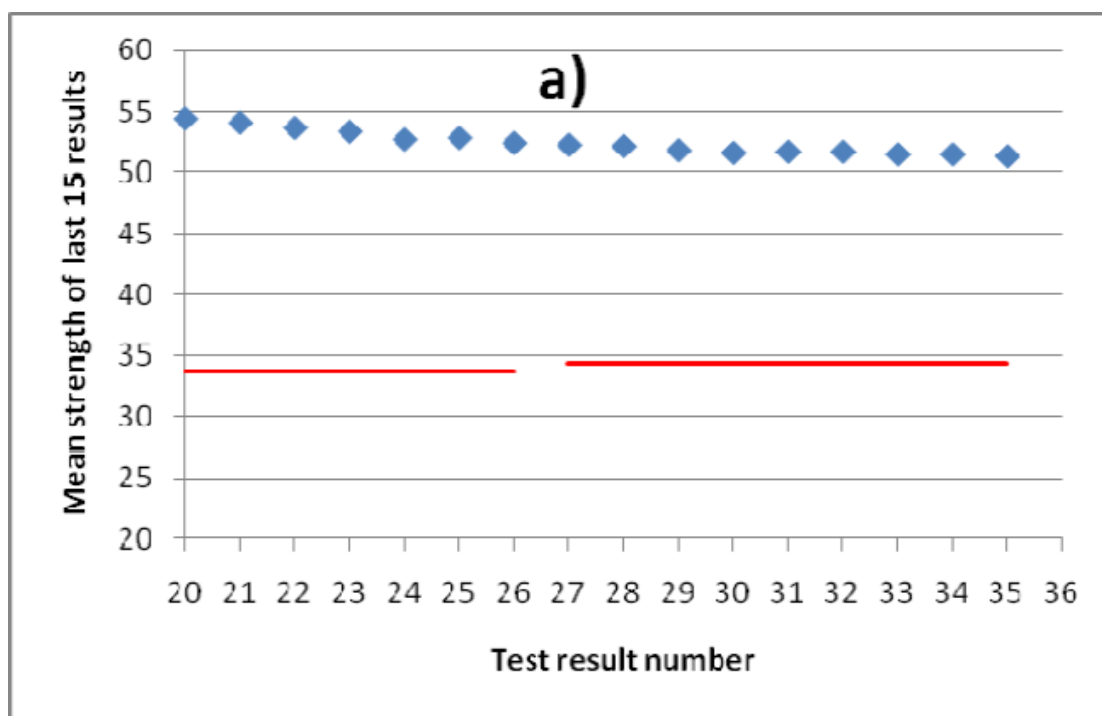
Εάν η τρέχουσα μέση αντοχή είναι κάτω από αυτή τη γραμμή τότε αυτό δείχνει ότι μια AOQL του 5% δεν επιτυγχάνεται. Μια γραμμή προειδοποίηση σε κάποια τιμή υψηλότερη από ό,τι ($f_{ck} + 1.48s$) μπορεί να προστεθεί (αν και εφόσον ο επιθυμητός στόχος δεν επιτυγχάνεται αυτή η ενέργεια δεν έχει να προσδώσει καμμία περαιτέρω πληροφορία).

Η τρέχουσα τυπική απόκλιση για τα δοκίμια είναι 2.5 N/mm^2 .

Η L_1 οριακή τιμή είναι:

$$30 + 1,48 * 2,5 = 33,7 \text{ N/mm}^2$$

Παρατηρούμε από το διάγραμμα ότι για σκοπούς ελέγχου, το εργοστάσιο αντί να χρησιμοποιεί μη-επικαλυπτόμενες ομάδες των αποτελεσμάτων, επιλέγει να χρησιμοποιήσει τον τρέχοντα μέσο όρο των τελευταίων 15 αποτελεσμάτων. Αυτό φαίνεται στο Σχήμα 6α, γεγονός που δείχνει ότι η μέση αντοχή είναι σταθερά πάνω από την οριακή τιμή.



Σχήμα 6α: Έλεγχος συμμόρφωσης της μέσης αντοχής χρησιμοποιώντας τον τρέχοντα μέσο όρο 15 διαδοχικών αποτελεσμάτων

Είναι επίσης αναγκαίο να βεβαιωθεί ότι η τυπική απόκλιση του δείγματος δεν έχει μεταβληθεί σημαντικά.

Από την παράγραφο 8.2.1.3 του προτύπου EN 206-1:2000 αναφέρεται ότι η παρούσα τιμή εξακολουθεί να ισχύει, αν η υπολογιζόμενη τιμή με βάση τα τελευταία 15

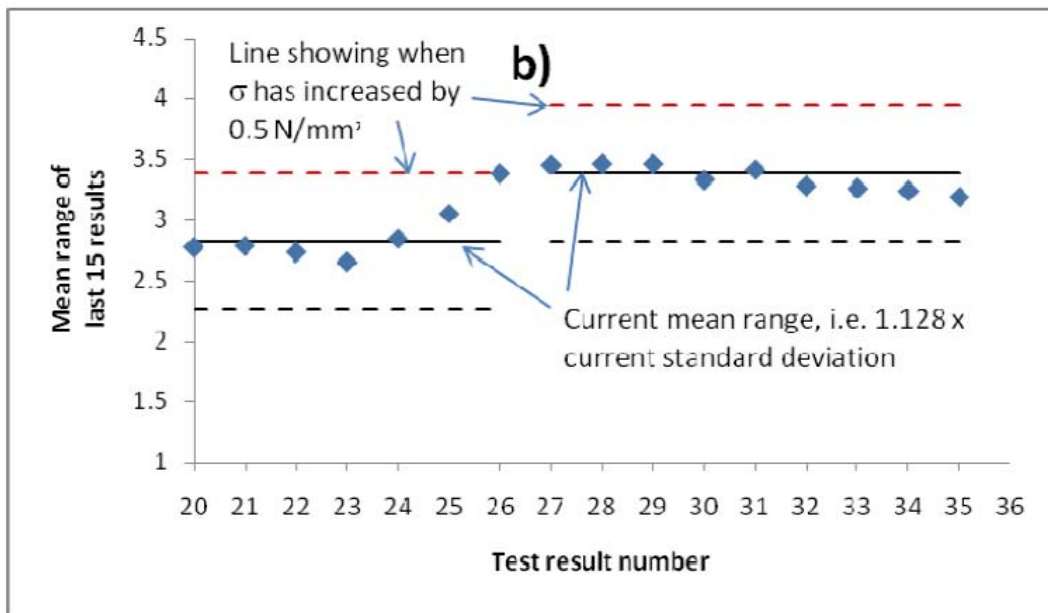
αποτελέσματα είναι εντός περίπου \pm τρέχουσα τιμη/3. Το τελευταίο δεν αποτελεί έναν πολύ ευαίσθητο δείκτη αλλαγής και οι περισσότεροι παραγωγοί σκυροδέματος θεωρούν ένα ποσό της τάξης των $0,5 \text{ N/mm}^2$ ως σημαντική αλλαγή στη τυπική απόκλιση της παραγωγής.

Η τιμή αυτή ελέγχεται και με ένα ακόμα τροποποιημένο διάγραμμα Shewhart. Σε αυτό το διάγραμμα μια οριζόντια γραμμή σχεδιάζεται στην τρέχουσα μέση τιμή εύρους ($1,128 \times \sigma$) και οι γραμμές δράσης προκύπτουν ως $1,128 \times 0,5$ πάνω και κάτω από την τιμή αυτή.

Όταν η τρέχουσα μέση τιμή διασχίζει μία από αυτές τις γραμμές δράσης, αυτό υποδεικνύει ότι η τυπική απόκλιση έχει αλλάξει από $0,5 \text{ N/mm}^2$ και μια νέα τιμή θα πρέπει να εφαρμοστεί. Σε αυτήν την εφαρμογή της μεθόδου, η τρέχουσα τυπική απόκλιση είναι $2,5 \text{ N/mm}^2$ και αυτό ισοδυναμεί σε ένα μέσο εύρος από $1,128 \times 2,5 = 2,82 \text{ N/mm}^2$ και άνω και κάτω γραμμές δράσης σε $3,38 \text{ N/mm}^2$ και $2,26 \text{ N/mm}^2$ ($2,82 \pm 1,128 \times 0,5$) αντίστοιχα. Τα όρια αυτά παρουσιάζονται στο Σχήμα 6β).

Στο αποτέλεσμα της δοκιμής για το δοκίμιο 26, το μέσο εύρος διασχίζει την ανώτερη γραμμή δράσης γεγονός που δείχνει ότι η τυπική απόκλιση έχει αυξηθεί κατά $0,5 \text{ N/mm}^2$. Η οριακή τιμή αυξήθηκε στο Σχήμα 6α σε $34,4 \text{ N/mm}^2$ και στο Σχήμα 6β ένα νέο μέσο εύρος που ορίζεται σε $3,38 \text{ N/mm}^2$ και άνω και κάτω γραμμές δράσης που ορίζονται σε $3,94 \text{ N/mm}^2$ και $2,82 \text{ N/mm}^2$, αντίστοιχως.

Δεδομένου ότι η τρέχουσα μέση τιμή αντοχής θραύσεως εξακολουθεί να είναι αρκετά πάνω από τη γραμμή ορίου, οι αναλογίες της σύνθεσης του μίγματος για την Παρασκευή σκυροδέματος δεν χρειάζεται να αλλάξουν, δηλαδή, η διαδικασία παραγωγής του εργοστασίου αξιολογείται ως εντός ελέγχου και κατά συνέπεια το εργοστάσιο δεν χρειάζεται να προβεί σε καμία διορθωτική ενέργεια.



Σχήμα 6b: Έλεγχος της τυπικής απόκλισης χρησιμοποιώντας το τρέχον μέσο εύρος των τελευταίων 15 διαδοχικών δειγμάτων

2.6. Διαγράμματα CUSUM

2.6.1. Εισαγωγή

Τα συστήματα ελέγχου CUSUM (συντομογραφία για τα συσσωρευμένα αθροίσματα – Cumulative Sums) αναπτύχθηκαν το 1950, αρχικά για τον έλεγχο της ποιότητας των συνεχών διαδικασιών παραγωγής. Τα διαγράμματα αυτά έχουν βρει ευρεία χρήση στη βιομηχανία παραγωγής σκυροδέματος. Στα CUSUM διαγράμματα, η κεντρική γραμμή δεν αντιπροσωπεύει μία σταθερή μέση τιμή, αλλά είναι μία μηδενική γραμμή για τη εκτίμηση της τάσης στα αποτελέσματα.

Στη παραγωγή σκυροδεματος τρία CUSUMs χρησιμοποιούνται στην πράξη:

- *CUSUM-M*, για τον έλεγχο της μέσης αντοχής θραύσης
- *CUSUM-R* (εύρος), για τον έλεγχο της τυπικής απόκλισης
- *CUSUM-C*, για τον έλεγχο της συσχέτισης

Η CUSUM μέθοδος, προκύπτει από την αφαίρεση του αποτελέσματος ελέγχου από την τιμή-στόχο που παράγεται σε ένα συνεχές τρέχον άθροισμα επί των διαφορών. Εάν η διαδικασία είναι εντός ελέγχου, τα σημεία του CUSUM γραφήματος κατανέμονται τυχαία (η εμφάνιση θετικών και αρνητικών διαφορών ακυρώνει η μία την συνεισφορά της άλλης), για να δώσει ένα αθροιστικό σύνολο που είναι κοντά στο μηδέν, αλλά εάν η διαδικασία ξεφεύγει από τον έλεγχο, αυτό θα μπορούσε γρήγορα να φανεί από το διάγραμμα CUSUM μετακινώντας το διάγραμμα προς τις γραμμές UCL ή LCL. Το πρότυπο BS 5700 περιγράφει τα ακόλουθα πλεονεκτήματα για τα συστήματα παραγωγής που επιτηρούνται με CUSUM:

- α) για ίδιο μέγεθος δείγματος αποτελεσμάτων της διεργασίας δίνει μια πιο ζωντανή εικόνα για τυχόν αλλαγές
- β) χρησιμοποιεί τα δεδομένα πιο αποτελεσματικά ως εκ τούτου παράγει εξοικονόμηση κόστους
- γ) δίνει σαφή ένδειξη της θέσης και του μεγέθους της αλλαγής

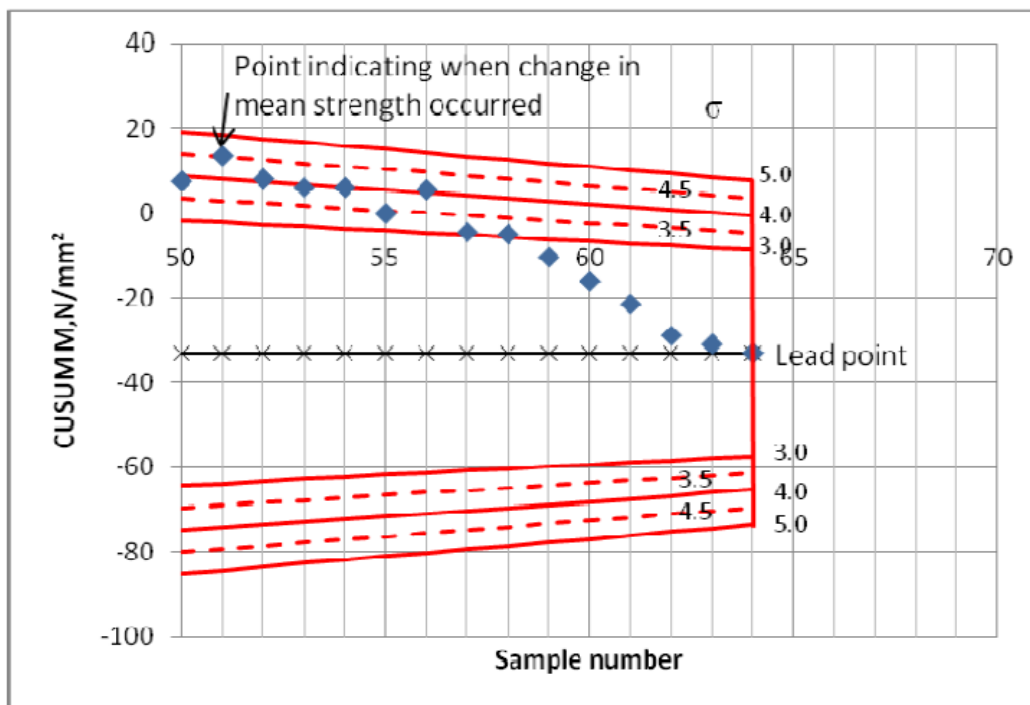
Τα CUSUM διαγράμματα έχει αποδειχθεί στην πράξη ότι είναι πιο «ευαίσθητα» στην ανίχνευση μικρών μετατοπίσεων στη μέση τιμή μιας διαδικασίας από τα Shewhart,

ενώ τα διαγράμματα Shewhart υπερτερούν στην ανίχνευση μεγάλων αλλαγών. Όταν το CUSUM φθάσει τις γραμμές UCL ή LCL, είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί το γράφημα, για να καθορίσει σε ποιο σημείο, η διαδικασία βγήκε από τον έλεγχο και τι κλίμακα διορθωτικής δράσης απαιτείται. Ιστορικά, τα CUSUM διαγράμματα ελέγχου προορίζονταν για σχεδιασμό στο χέρι για να καθορίσουν αν η τάση στο γράφημα ήταν σημαντική ή όχι.

Μια διαφανής μάσκα στο σχήμα ενός κόλουρου (cut-off) V τοποθετείται στην πλευρά της πάνω από το γράφημα, με το οδηγόν σημείο τοποθετημένο στο πιο πρόσφατο αποτέλεσμα (όχι στην κεντρική γραμμή). Η διαφανής V-μάσκα επικάλυψης στο σχ. 7 εμφανίζεται με κόκκινο χρώμα. Κάθε μέλος έχει επισημανθεί με την τυπική απόκλιση και σε αυτό το παράδειγμα, οι τιμές μεταβάλλονται από 3.0 N/mm² με βήματα των 0.5 N/mm² έως 5.0 N/mm². Τα άκρα δεν έχουν περιορισμό όσον αφορά στο μήκος τους.

Οι «βραχίονες» της V-μάσκας αντιπροσωπεύουν τα άνω και κάτω όρια ελέγχου.

Εάν το γραφημα διασχίσει είτε το ανώτερο είτε το κατώτερο βραχίονα της μάσκας V, μια σημαντική αλλαγή θεωρείται ότι έχουν συμβεί (βλ. Σχήμα 7). Αυτοματοποιημένα υπολογιστικά συστήματα έχουν επικεντρωθεί στην ανάλυση των διαγραμμάτων CUSUM (η ιδέα είναι πιο εύκολο κατανοητή χρησιμοποιώντας την περισσότερο οπτική μέθοδο της V-μάσκας).



Σχήμα 7: Απεικόνιση της V-μάσκας τοποθετημένης επί τρέχοντος σημείου, για την ανίχνευση της αλλαγής (η τρέχουσα τυπική απόκλιση είναι 4,5 N/mm²)

2.6.2. Εφαρμογή της μεθόδου CUSUM σε αριθμητικά δεδομένα παραγωγής σκυροδέματος

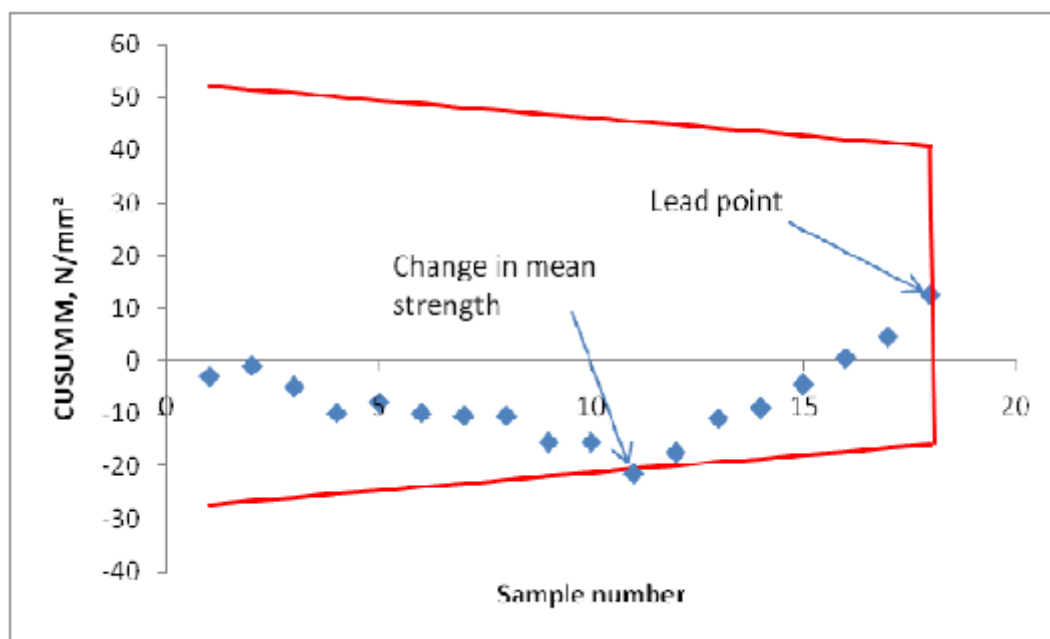
Θεωρούμε τα δεδομένα αντοχής θραύσεως μιας μονάδας παραγωγής σκυροδέματος του Πίνακα 4 για μία εγκατάσταση που λειτουργεί με τυπική απόκλιση 3.5 N/mm^2 και με ένα στόχο μέσης αντοχής θραύσεως δοκιμίου της τάξης των 40 N/mm^2 .

Τα αποτελέσματα της μεθόδου CUSUM έχουν υπολογισθεί και παρουσιάζονται στον Πίνακα 5. Ένα γραφήμα της μεθόδου CUSUM με προκαθορισμένα UCL και LCL φαινεται στο Σχήμα 8.

Πίνακας 5: CUSUM δεδομένων

Result	28 day strength (N/mm^2)	Difference from 40N/mm^2 target (N/mm^2)	CUSUM (N/mm^2)
1	37	-3	-3
2	42	2	-1
3	36	-4	-5
4	35	-5	-10
5	42	2	-8
6	38	-2	-10
7	39.5	-0.5	-10.5
8	40	0	-10.5
9	35	-5	-15.5
10	40	0	-15.5
11	34	-6	-21.5
12	44	4	-17.5
13	46.5	6.5	-11
14	42	2	-9
15	44.5	4.5	-4.5
16	45	5	0.5
17	44	4	4.5
18	48	8	12.5

Όταν η V-μάσκα τοποθετείται στο κύριο σημείο (στο σημείο 18), η CUSUM διασχίζει την γραμμή LCL στο σημείο 11, υποδεικνύοντας ότι μια αλλαγή στη διαδικασία συνέβη ήδη σε αυτό το σημείο. Ενώ η Shewhart ανάλυση των δεδομένων (βλ. προηγούμενες παραγράφους), αναφέρεται επίσης σε μια αλλαγή στο σημείο 18, το γράφημα της μεθόδου CUSUM δίνει μια σαφή οπτική εικόνα της τάσης και δείχνει ότι έχει παρουσιαστεί μία τάση ήδη από το σημείο 11.



Σχήμα 8: Εφαρμογή της μεθόδου CUSUM για δεδομένα στον πίνακα 5 με στόχο την άσκηση ελέγχου μέσης αντοχής θραύσης

Η αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος είναι η πιο απλή παράμετρος για την παρακολούθηση της μέσω της μεθόδου CUSUM. Το αποτέλεσμα της δοκιμής σε σύγκριση με μία μέση αντοχή θραύσεως στόχου, βασίζεται στην καθορισμένη χαρακτηριστική αντοχή συν το περιθώριο.

Τα αποτελέσματα των διαγραμμάτων CUSUM για έλεγχο αντοχής θραύσεως γενικά αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες οικογένειες, συγκρινόμενα με την ισοδύναμη τιμή ενός επιλεγμένου σκυροδέματος αναφοράς, π.χ C32/40. Η ανάλυση βασίζεται σε δοκίμια σκυροδέματος συγκεκριμένων ημερών από την ημερομηνία παραγωγής τους, π.χ. στις 7 ημέρες από την παραγωγή τους, καθώς ο κίνδυνος αναμονής μέχρι την 28^η ημέρα για τον χαρακτηρισμό της απώλειας του ελέγχου μιας διεργασίας παραγωγής, είναι μεγάλος καθιστώντας την άσκηση ελέγχου στο σύστημα αδύνατη. Η προβλεπόμενη σε 28 ημέρες, αντοχή θραύσεως υπολογίζεται από το αποτέλεσμα της δοκιμής πρώιμης ηλικίας (βλέπε 7.1) και αυτό χρησιμοποιείται στην μέθοδο CUSUM μέχρι η πραγματική αντοχή των 28 ημερών να είναι διαθέσιμη.

Μερικά συστήματα αντικαθιστούν την εκτιμώμενη αρχική αντοχή που αναλογούσε σε δοκίμια των 28 ημερών με την αντίστοιχη πραγματική τιμή της και επαναυπολογίζουν εκ νέου το διάγραμμα CUSUM, ενώ άλλα συστήματα συνεχίζουν να χρησιμοποιούν την προβλεπόμενη εκτίμηση για την αντοχή θραύσεως.

Η σύγχρονη τάση τάση είναι να αντικαθιστούν την προβλεπόμενη αντοχή με τη πραγματικά μετρούμενη αντοχή των 28 ημέρων. Από το 2000 και μετά, τα δεδομένα έχουν επίσης χρησιμοποιηθεί για τη συμμόρφωση της παραγωγής (compliance).

2.6.3. CUSUM τυπικής απόκλισης

Τα διαγράμματα CUSUM μπορεί να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της τυπικής απόκλισης της διεργασίας παραγωγής, χρησιμοποιώντας τη σχέση μεταξύ του εύρους των διαδοχικών ζευγών των αποτελεσμάτων που δίνεται στην εξίσωση 2.

Το αναμενόμενο εύρος (τρέχουσα τυπική απόκλιση $\times 1.128$) από ένα ζεύγος αποτελεσμάτων, παρακολουθούνται σε αντιπαραβολή με τις πραγματικές τιμές της απόκλισης, και ένα διαγραμμα CUSUM υπολογίζεται από τις διαφορές. Τα αποτελέσματα αποτυπώνονται και αναλύονται χρησιμοποιώντας την V-μάσκα ή ένα υπολογιστικό μοντέλο.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι το εύρος δεν είναι μια κανονικά κατανομημένη μεταβλητή, επομένως αν μια συμμετρική V-μάσκα έχει χρησιμοποιηθεί για την επεξεργασία, μεγαλύτερα τρεχοντα μήκη τιμών θα πρέπει να χρησιμοποιηθούν για να ανιχνεύσουν μία μείωση της τυπικής απόκλισης. Ωστόσο, αυτή η συντηρητική προσέγγιση - η χρήση μιας συμμετρικής μάσκας - υιοθετείται χάριν απλότητας σε πολλά συστήματα.

Όταν μια σημαντική αλλαγή ανιχνεύεται, η τυπική απόκλιση επανακαθορίζεται στην τρέχουσα τιμή της, τα αποτελέσματα διορθώνονται με τη νέα μέση αντοχή θραύσεως - στόχο, δίνοντας αποτελέσματα υψηλότερα αν η τυπική απόκλιση έχει αυξηθεί, και χαμηλότερα αν η τυπική απόκλιση έχει μειωθεί. Τα αποτελέσματα αμέσως πριν από την αλλαγή της αντοχής θραύσεως - στόχου θα πρέπει επίσης να είναι προσαρμοσμένα στο νέα μέση αντοχή στόχο για να υπολογιστεί το εύρος των ζευγών, άλλως ένα πρόσθετο στοιχείο της διακύμανσης θα «επικαθίσει» στα δεδομένα.

2.6.4. CUSUM και έλεγχος συσχέτισης

Τα συστήματα ελέγχου για την παραγωγή σκυροδέματος που βασίζονται σε πρώιμα δοκίμια των 7 ημερών ως εκτιμητές για την αντοχή θραύσεως που αφορά σε πραγματικά δοκίμια αναφοράς των 28 ημερών, οδηγούν σε ένα μη αποδεκτό επίπεδο κινδύνου.

Αποτελέσματα αντοχής θραύσεως, από δοκίμια 7 ημερών χρησιμοποιούνται από το σύστημα ελέγχου για να προβλεφθεί η αντοχή 28 ημερών χρησιμοποιώντας ένα μοντέλο συσχέτισης. Προκειμένου να επιβεβαιωθεί ότι ο συντελεστής συσχέτισης είναι σωστός, ένα διάγραμμα CUSUM C αντοχής θραύσεως μπορεί να τρέξει σχετικά με τις διαφορές μεταξύ των πραγματικών και των προβλεπόμενων τιμών (για δοκίμια 28 ημερών). Εάν το διάγραμμα CUSUM C είναι θετικό, τότε το σύστημα υποτιμά στην εκτίμηση του την αντοχή θραύσεως για τα δοκίμια 28 ημερών ενώ αν είναι αρνητικό υπερεκτιμά με τις προβλέψεις του τις πραγματικές τιμές.

Όταν μια σημαντική τάση ανιχνεύεται, μια νέα σχέση συσχέτισης καθορίζεται.

Το διάγραμμα CUSUM-M για τη μέση αντοχή θραύσεως, χρησιμοποιώντας προβλέψιμα αποτελέσματα θα πρέπει να υπολογιστεί εκ νέου, καθώς το σύστημα ήταν κάτω ή πάνω από την εκτίμηση για ένα σημαντικό χρονικό διάστημα και τα αποτελέσματα του μπορεί να απέχουν σημαντικά από την πραγματικότητα. Το γράφημα του εύρους δεν χρειάζεται να προσδιοριστεί εκ νέου επειδή η αλλαγή της συσχέτισης θα επηρεάσει όλα τα αποτελέσματα ομοίως (εκτός από την περιοχή που αλληλοεπικαλύπτονται τα σημεία αλλαγής συσχέτισης).

Η σχέση μεταξύ αντοχής θραύσεως 7 και 28 ημερών επηρεάζεται από το ίδιο το σκυροδέμα ή τους τύπους προσθήκης εντός του σκυροδέματος και τις πηγές των συστατικών του, π.χ το κέρδος (διαφορά) αντοχής θραύσεως μεταξύ δοκιμίων 7^{ης} και 28^{ης} ημέρας του σκυροδέματος που παρασκευάζεται με ένα υλικό CEM I θα είναι μικρότερο από ότι για ένα ισοδύναμο με υλικό CEM III / B. Σκυροδέματα που προκύπτουν από διαφορετικούς τύπους ή από προσθήκες/αναμίξεις άλλου τύπου σκυροδεμάτων θα πρέπει να ελέγχονται είτε με χωριστά συστήματα ελέγχου είτε λαμβάνοντας υπόψη την διαφορά στη συσχέτιση μεταξύ διαφορετικών τύπων τσιμέντου/προσθήκης χρησιμοποιώντας τις διορθώσεις που εφαρμόζονται στο πλαίσιο κατηγοριοποίησης σε μια οικογένεια σκυροδεματος. Διαφορετικές πηγές του ίδιου τύπου και κατηγορίας τσιμέντου ή προσθήκης, μπορούν να εμφανίσουν διαφορετικές αναλογίες αντοχής θραύσεως 7:28 ημερών και έτσι εάν μια πηγή τσιμέντου ή προσθήκη αλλάξει, η εγκυρότητα του τρέχοντος λόγου αντοχής 7:28 ημερών θα πρέπει να αναθεωρηθεί. Προσμίξεις καθυστέρησης πήξεως μπορεί επίσης να επηρεάσουν τον τρέχοντα λόγο αντοχής θραύσεως 7:28 ημερών.

Είναι σημαντικό να αντιληφθούμε ότι ο υπολογισμός της συσχέτισης, ως μια απλή ευθεία σχέση διασύνδεσης ή ως μια επί τοις εκατό εκτίμηση, δεν θα προσδώσει περαιτέρω ακρίβεια στην μελέτη των συστατικών του σκυροδέματος. Ο λόγος είναι ότι τα μίγματα

σκυροδέματος έχουν συγκεκριμένα μέγιστων τιμών αντοχής που μπορεί να οφείλονται σε αποτυχία επίτευξης της συνολικής σύστασης, ή αποτυχία συσσωμάτωσης των σωματιδίων τους ή, δεδομένου ότι οι αυξήσεις του περιεχομένου τσιμέντου στο μίγμα αυξάνουν σε ευθεία σχέση το κενό που δημιουργείται στον όγκο του μίγματος, π.χ. (νερό + αέρας) / τσιμέντο αποτελεί μια αναλογία που είναι σταθερή αλλά συντελεί στην μεταβολή. Συνεπώς, όταν έχει επιτευχθεί το μέγιστο της αντοχής θραύσεως, είτε αυξάνοντας το περιεχόμενο τσιμέντο του μίγματος είτε κάνοντας χρήση πλαστικοποιητών για τη μείωση της αναλογίας νερού/τσιμέντο - w/c ratio οποιαδήποτε άλλη μεταβολή θα έχει μικρή επίδραση στην περαιτέρω βελτίωση της αντοχής σε θλίψη. Καθώς η αντοχή θραύσεως σε δοκίμια 28 ημερών προσεγγίζει τη μέγιστη τιμή της, η αναλογία αντοχής θραύσεως δοκιμίων μεταξύ 7:28 ημερών θα έχει μικρή μεταβολή. Ομοίως, σε χαμηλότερες αντοχές, τα αποτελέσματα θα τείνουν να συγκλίνουν προς το μηδέν.

Η αρχική συσχέτιση μπορεί να καθοριστεί με διάφορους τρόπους συμπεριλαμβανομένων:

- Αρχικά δοκιμαστικά μίγματα για μια σειρά επιλογών σκυροδέματος
- Βασισμένοι σε ιστορικά στοιχεία καταγραφών από την παραγωγή του εργοστασίου.

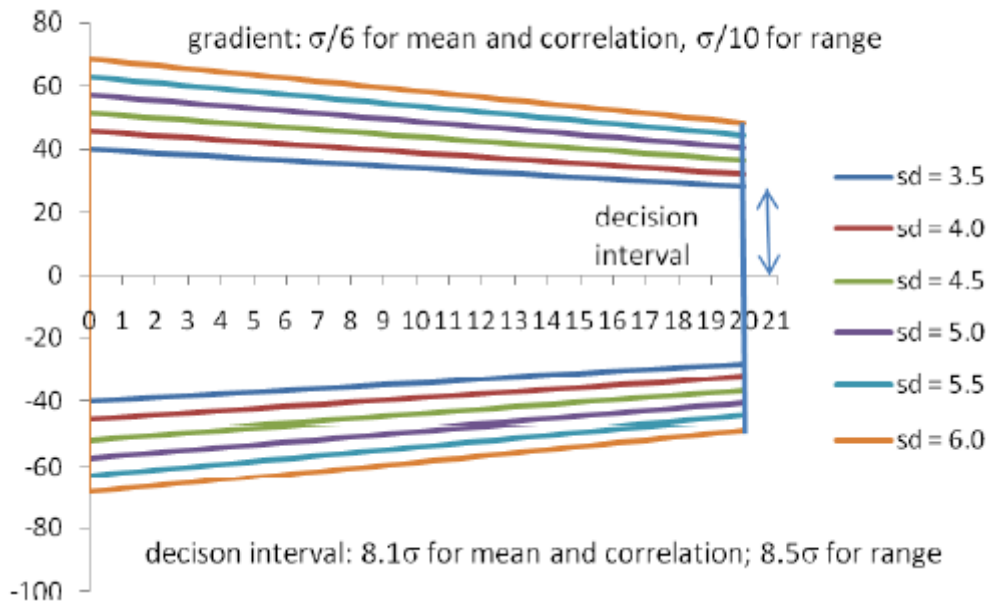
Αφού η αρχική συσχέτιση έχει επιτευχθεί, θα πρέπει να ελέγχονται τακτικά για να βεβαιωθούμε ότι εξακολουθεί να ισχύει. Αυτός είναι ο κύριος σκοπός του διαγράμματος CUSUM C.

Ένα παράδειγμα για το διάγραμμα συσχέτισης CUSUM (CUSUM C) θα παρουσιασθεί σε επόμενες ενότητες. Συγκριτικά υπάρχουν πιο λίγα δεδομένα στο CUSUM συσχέτισης σε σχέση με τα διαγράμματα CUSUM για μέση τιμή και τυπική απόκλιση, λόγω του χάσματος των 21 ημερών μεταξύ των δοκιμίων των 7 και 28 ημερών. Τα αποτελέσματα όμως τείνουν να συμπληρώσουν αυτό το κενό.

Στην επόμενη περίπτωση, τα πραγματικά αποτελέσματα των δοκιμίων 28 ημερών έχουν χρησιμοποιηθεί στη θέση των προβλεπόμενων αντίστοιχων για 28 ημέρες, όταν αυτά θα είναι διαθέσιμα. Μερικά συστήματα χρησιμοποιούν μόνο δεδομένα από πρόβλεψη. Ωστόσο, όλα τα διαγράμματα CUSUM θα υπολογίσουν εκ νέου τα προβλεπόμενα στοιχεία κατά τον έλεγχο CUSUM, δείχνοντας μία αλλαγή της συσχέτισης.

2.6.5. Σχεδιασμός V-μάσκας

Ο σχεδιασμός της V μάσκας (δηλαδή ο καθορισμός των κλίσεων και η επιλογή κατάλληλων διαστημάτων απόφασης) βασίζεται σε στατιστικές τεχνικές οι οποίες συνδέονται άμεσα με την τυπική απόκλιση της διαδικασίας παραγωγής, όπως ενδεικτικά απεικονίζεται στο Σχήμα 9 για ένα τυπικό σύστημα απόφασης CUSUM.



Σχήμα 9: Σχεδιασμός συστήματος απόφασης με χρήση V-μάσκας

Ένας αριθμός παραγωγών σκυροδέματος, έχουν επιλέξει τον έλεγχο της παραγωγής τους, μέσω της ανάλυσης CUSUM έτσι ώστε τα συστήματά τους να ακολουθούν τη «προσέγγιση» ενός διπλού μοντέλου απόφασης», το οποίο επίσης χρησιμοποιείται στα διαγράμματα Shewhart, δηλ. τη χρήση μιας γραμμής προειδοποίησης και μιας γραμμής ελέγχου. Τα συστήματα θα αναλάβουν δράση όταν η γραμμή προειδοποίησης ξεπεραστεί από τις τρέχουσες τιμές της διεργασίας. Στην περίπτωση αυτή, οι γραμμές προειδοποίησης είναι παράλληλες προς τον άξονα X και προβλέπουν συμμετρικό διάστημα επιπέδων αποφάσεως όπως χρησιμοποιείται στην παραδοσιακή τεχνική ελέγχου μέσω V-μάσκας. Μια τέτοια προσέγγιση πδηγεί σε πιο άμεσα αποτελέσματα αποφάσεως από ότι με την παραδοσιακή V-μάσκα καθώς το σύστημα ενεργοποιείται όταν η γραμμή προειδοποίησης διασταυρώνεται με τα τρέχοντα δεδομένα της διεργασίας. Στην περίπτωση αυτή το όριο ελέγχου δεν εξυπηρετεί πρακτικά κάποιο ιδιαίτερο σκοπό και συνήθως δεν χρησιμοποιείται.

2.6.6. Ενέργειες στην CUSUM που απορρέουν από τις αλλαγές της διεργασίας

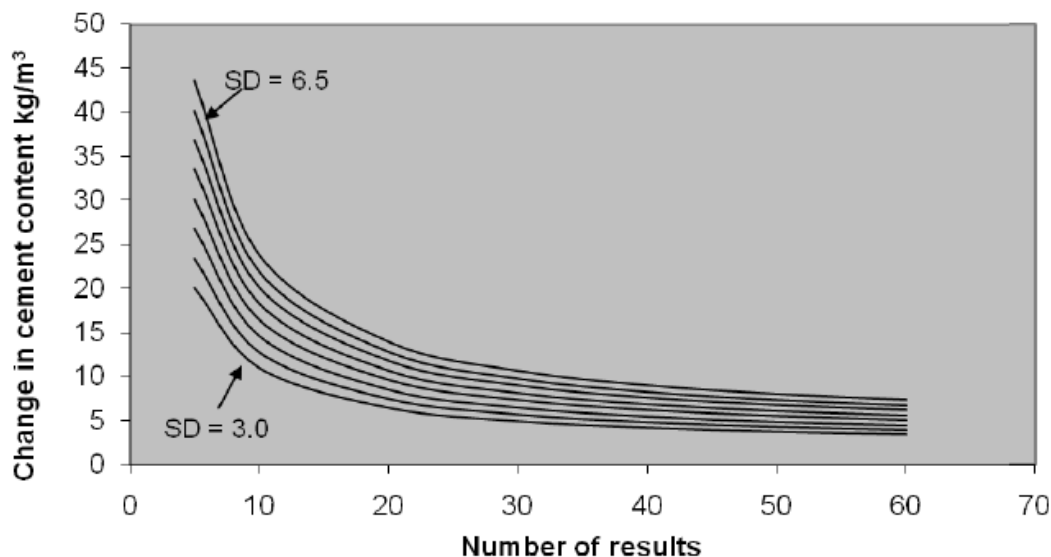
Όταν το διάγραμμα CUSUM δείχνει ότι η μέση αντοχή θραύσεως - στόχος ή η θεωρούμενη τυπική απόκλιση δεν επιτυγχάνεται, τότε προσαρμογές θα πρέπει να γίνουν στην διεργασία παραγωγής σκυροδέματος. Συχνά, αλλά όχι πάντοτε, αυτό απαιτεί μια αλλαγή στην περιεκτικότητα δηλ. στην αναλογία των υλικών που συνιστούν το σκυρόδεμα όπως π.χ. ποσότητα τσιμέντου ή ρύθμιση της αναλογίας w/c. Το μέγεθος της μεταβολής που απαιτείται όταν το διάγραμμα CUSUM M υποδεικνύει την ανάγκη για δράση, καθορίζεται αποτελεσματικά από τον αριθμό των τρέχοντων δειγμάτων της διεργασίας εκεί όπου η διαδικασία έχει βγει εκτός ελέγχου (σε μερικά σημεία θα δώσει μια απότομη κλίση που αντιπροσωπεύει μια μεγάλη αλλαγή τάσης, ενώ αντίθετα πολλά άλλα σημεία θα δείχνουν μια σταδιακή αλλαγή καταλήγοντας σε μια πιο μικρή κλίση).

Η αλλαγή στην περιεκτικότητα σε τσιμέντο του σκυροδέματος μπορεί να υπολογιστεί χρησιμοποιώντας την παραβολική εξίσωση:

$$dc = 0,75 \times C_{mra} \times [(DI / n) + G] \quad (\text{εξ. 2.6.1})$$

οπού:

- dc = αλλαγή στην περιεκτικότητα σε τσιμέντο (σε kg/m^3)
- 0.75 είναι ένας παράγοντας για την πρόληψη της ταλάντωσης και συμπληρωματικών αλλαγών που συμβαίνουν, δηλαδή ελαχιστοποιεί τον κίνδυνο της υπερ-διόρθωσης εφαρμόζοντας μια δεύτερη προσαρμογή προς την αντίθετη κατεύθυνση
- C_{mra} είναι η σχέση μεταξύ της αντοχής και περιεχομένου τσιμέντου από τη κύρια σχέση (συνήθως στην περιοχή περιεκτικότητας 5 έως 6 kg/m^3 η οποία οδηγεί σε μία αύξηση στην αντοχή θραύσεως κατά $1N/mm^2$)
- DI είναι το διάστημα απόφασης της V-μάσκας (βλέπε σχήμα 9)
- G είναι η κλίση της V-μάσκας (βλέπε σχήμα 9).



Σχήμα 10: Ενέργεια παρακολούθησης της αλλαγής του μέσου ορίου αντοχής για διαφορετικές τυπικές αποκλίσεις (SD) και πλήθος δειγμάτων

Τόσο οι παράμετροι DI όσο και G αποτελούν μία συνάρτηση της τυπικής απόκλισης και μετριούνται σε N/mm^2 . Η σχέση αυτή παριστάνεται γραφικά στο Σχήμα 10 και μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αλλαγή της διεργασίας CUSUM M. Παρατηρούμε ότι όσο μικρότερος είναι ο αριθμός των δειγμάτων τόσο μεγαλύτερη είναι η αλλαγή που απαιτείται μέσω των συντελεστών στη περιεκτικότητα του τσιμέντου.

Μια αλλαγή στην τυπική απόκλιση θα οδηγήσει σε μία νέα τιμή μέσης αντοχής θραύσεως - στόχου και συνεπώς μία αντίστοιχη αύξηση ή μείωση της περιεκτικότητας τσιμέντου στο σκυρόδεμα για τον έλεγχο του μίγματος και όλες τις άλλες προσμίξεις στην οικογένεια σκυροδέματος.

Οι πληροφορίες από τα διαγράμματα CUSUM, για την ανίχνευση αλλαγών, είναι μόνο μέρος τις διαθέσιμες πληροφορίες για την σύνθεση του μίγματος που έχει στην διάθεση του ο παραγωγός σκυροδέματος. Ο σκοπός του παραγωγού είναι να προσδιορίσει την αιτία της αλλαγής και να λάβει τα κατάλληλα μέτρα σε όλα τα σχετιζόμενα επίπεδα και σε όλα τα εργοστασια παραγωγής. Για παράδειγμα, εάν η αλλαγή οφείλεται σε μεταβολή ενός συστατικού A του σκυροδέματος, τα διαγράμματα CUSUM όλων των εγκαταστάσεων που κάνουν χρήση του συστατικού A πρέπει να ελεγχθούν για να διασαφηνισθεί αν εμφανίζουν την ίδια τάση. Αν ναι, θα ήταν ορθό το σύστημα να δράσει σε όλα τα σημεία παραγωγής ακόμα και αν τα διαγράμματα CUSUM σε ένα ή περισσότερα από τα σημεία αυτά δεν έχουν ακόμη εκδηλώσει μια αλλαγή παραβίασης των ορίων προειδοποίησης. Μια αλλαγή στην περιεκτικότητα σε τσιμέντο ή στην αναλογία w/c δεν είναι πάντα απαραίτητη. Για παράδειγμα, εάν η αιτία της αλλαγής είναι γνωστή και έχει διορθωθεί, εκ νέου

προσαρμογή των αναλογιών ανάμιξης μπορεί να μην χρειάζεται. Ένα τυπικό παράδειγμα αυτής της περίπτωσης είναι όπου η αντοχή του τσιμέντου είναι γνωστό ότι έχει μειωθεί, αλλά στη συνέχεια ανακαταται.

2.6.7. Πολυμεταβλητή και Πολυσυνθετική Ανάλυση Σκυροδέματος

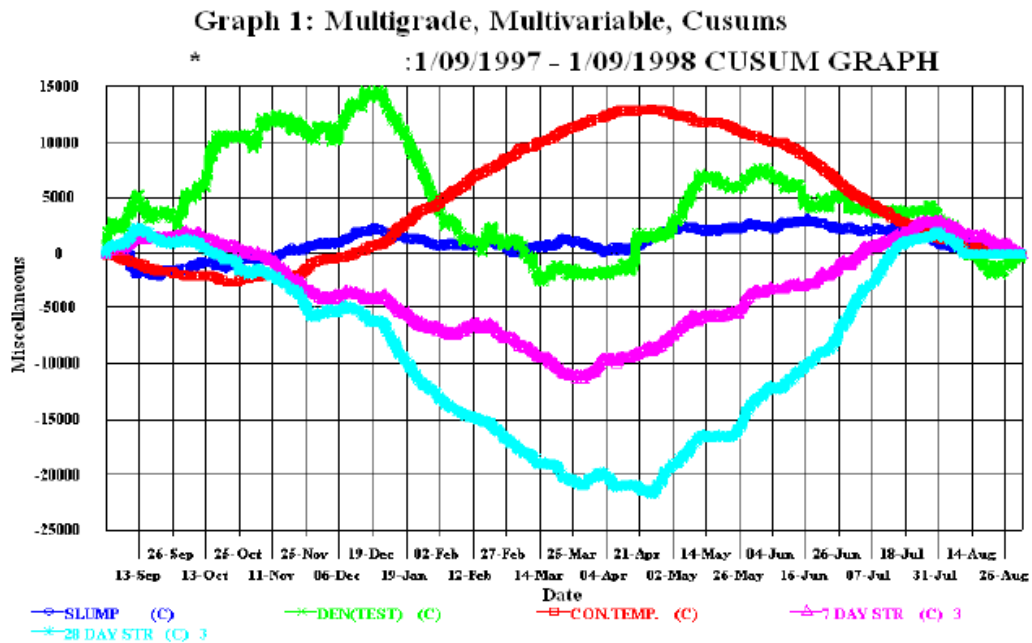
Τα πολυσυνθετικά και τα πολυμεταβλητά διαγράμματα ανάλυσης CUSUM αναπτύχθηκαν από τον Ken Day με εφαρμογή ανάλογη αυτής που τυγχάνουν τα μονοπαραμετρικά διαγράμματα CUSUM.

2.6.7.1 Πολυμεταβλητά

Τα Πολυμεταβλητά συστήματα CUSUM δεν παρακολουθούν μόνο μια ιδιότητα του σκυροδέματος, π.χ. αντοχή σε θλίψη, αλλά αντίθετα παρακολουθούν ταυτόχρονα ένα αριθμό ιδιοτήτων, όπως για παράδειγμα τα προσφερόμενα γραφήματα από τα συστήματα CoNAD, τα οποία συνδιάζουν τις παρακάτω παραμέτρους:

- *Αντοχή σε θλίψη*
- *Πυκνότητα/περιεκτικότητα συστατικών μίγματος*
- *Θερμοκρασία*
- *Παράμετρο κάμψης.*

Στην περίπτωση αυτή έγκαιρη δράση μπορεί να ληφθεί πριν το γράφημα φτάσει στο UCL ή LCL επειδή η πτωτική τάση αντοχής σε θλίψη μπορεί να συνοδεύεται από μια μείωση της πυκνότητας και είτε (ή και τα δύο), μια αύξηση αντοχής σε κάμψη ή της θερμοκρασίας. Εάν αυτό το μοτίβο αφορά δύο ή τρία χαρακτηριστικά τότε σίγουρα δείχνει μια πραγματική αλλαγή σύνθεσης και μια πιθανή αιτία θα πρέπει να αναζητηθεί (π.χ. προσθήκη νερού στο μίγμα). Οι πληροφορίες που αφορούν στην θερμοκρασία, κάμψη και πυκνότητα συστατικών, είναι άμεσα διαθέσιμες και επομένως οι τάσεις του διαγράμματος μπορούν να ανιχνευθούν πριν από την εφαρμογή μεθόδων θραύσεως σε δοκίμια 7 ημερών. Μια γραφική αναπαράσταση (χωρίς να εμφανίζονται όρια ελέγχου) του γραφήματος ενός πολυμεταβλητού συστήματος ανάλυσης δείχνεται στο Σχήμα 11.



Σχήμα 11: Διάγραμμα παραμέτρων από πολυμεταβλητών σύστημα

2.6.7.2 Πολυσυνθετικά

Τα πολυσυνθετικά διαγράμματα CUSUM έχουν σχεδιαστεί για να ενσωματώσουν σκυροδέματα από διαφορετικές θλιπτικές αντοχές στο ίδιο σύστημα CUSUM. Μία προσέγγιση είναι να υιοθετήσουμε την έννοια της «οικογένειας» μιγμάτων (η οποία θα παρουσιασθεί στην συνέχεια). Ωστόσο ο Day et al υποστηρίζουν ότι είναι δυνατόν να αθροίσουμε διαφορές από την τρέχουσα μέση τιμή κάθε μεταβλητής σε κάθε επιμέρους κατηγορία μεταβλητών του σκυροδέματος, σαν να αφορούσαν όλες στην ίδια μέση τιμή. Με την προσέγγιση αυτή τα αποτελέσματα από μίγματα υψηλής ή χαμηλής αντοχής μπορούν να συντεθούν σε κοινό διάγραμμα CUSUM ακόμα και με μίγματα – οικογένειες χαμηλών περιεκτικοτήτων και βάρους. Ο Day υποστηρίζει ότι τα πλεονεκτήματα της τεχνικής αυτής είναι:

1. Δεν υπάρχει ουσιαστικά κανένα όριο στο πλήθος των επιμέρους μιγμάτων που μπορεί να αντιμετωπίζονται ως ενιαία οικογένεια.
2. Δεν υπάρχει καμία απαίτηση για διορθωτικούς τύπους.
3. Δεν υπάρχει καμία απαίτηση για τον έλεγχο των επιμέρους σκυροδεμάτων που συνιστούν το τελικό μίγμα. Όλα τα μέλη παραμένουν ως αποδεκτά το καθένα ανήκοντας στην οικογένεια από την οποία προέρχεται (εκτός αν ένα σημείο αλλαγής του διαγράμματος επιβάλλει κάτι τέτοιο).

4. Ως συνέπεια των ανωτέρω, τα σημεία στα οποία ανιχνεύεται αλλαγή είναι πολύ πιο γρήγορα στα πολυμεταβλητά διαγράμματα CUSUM καθιστώντας τα πιο αποτελεσματικά στην ανίχνευση των αιτίων.

Ένα συνολικό CUSUM μπορεί να σχεδιαστεί ενσωματώνοντας όλα τα αποτελέσματα. Επιπροσθέτως, τα δεδομένα αντοχής σε θλίψη για κάθε κατηγορία, μπορούν να αναλυθούν για να διαπιστωθεί κατά πόσα τα φαινόμενα αντοχής σε θλίψη αφορούν μεταξύ των οικογενειών που απαρτίζουν το μίγμα ή αφορούν συγκεκριμένα σε ένα στέλεχος του μίγματος.

Δεδομένου ότι οι σύγχρονες τεχνικές ανάλυσης έχουν την τάση να κρατήσουν στον υπολογιστή όλες τις πληροφορίες σχετικά με το σύστημα και να αναλύουν και να επεξεργάζονται αυτές μέσω του υπολογιστή χρησιμοποιώντας πολυμεταβλητά και πολυσυνθετικά διαγράμματα CUSUM, αυτά τελικά εμφανίζουν λιγότερη πολυπλοκότητα από ότι στην πραγματικότητα αναμενόταν.

Σε αμφότερα τα συστήματα, το κλειδί της επιτυχούς λειτουργίας τους, είναι ότι ο χειριστής του συστήματος κατανοεί την πληροφορία που του παρουσιάζεται από το σύστημα ελέγχου, αναζητώντας τα κατάλληλα δεδομένα για να προσδιορίσει την αιτία και στην συνέχεια να λάβει τα κατάλληλα μέτρα για την διόρθωση της λειτουργίας.

2.7. Επιτάχυνση της Απόκρισης Επεξεργασίας – Αποφάσεων του Συστήματος Ελέγχου

2.7.1. Εξέταση αντοχής πρώιμων δοκιμίων

Με τη χρήση πρώιμων δεδομένων αντοχής (δηλ. δοκιμίων που δεν αφήνονται σε πλήρη ωρίμανση 28 ημερών) για να προβλέψουμε την αντίστοιχη αντοχή ενός δοκιμίου 28 ημερών, είναι δυνατόν από την αρχή αυτής της προσέγγισης να εντοπιστεί μία δυσμενής κατάσταση προς αντιμετώπιση. Εάν χρησιμοποιηθούν δοκίμια 7 ημερών για τον έλεγχο της αντοχής τους, μια ενδεχόμενη αρνητική κατάσταση θα ανιχνευόταν τρεις εβδομάδες νωρίτερα από το να περιμένουμε τα αντίστοιχα δεδομένα αντοχής των 28 ημερών.

Γενικά τα συστήματα ελέγχου για την μέση αντοχή βασίζονται σε δοκίμια των 7 ημερών καθώς ο κίνδυνος της αναμονής των αποτελεσμάτων των δοκιμών αντοχής για 28 ημέρες, είναι μη αποδεκτός τόσο για τον πελάτη όσο και τον παραγωγό του σκυροδέματος. Ωστόσο, βασιζόμενοι σε πρόβλεψη, οι απαιτήσεις της διαδικασίας οδηγούν σε αντοχές που υπερβαίνουν την καθορισμένη χαρακτηριστική αντοχής θραύσεως μέσα σε λίγες ημέρες και σε αυτή την περίπτωση δοκιμής μπορούμε να εργαστούμε με μια ενιαία ηλικία δοκιμίων μικρότερη των 28 ημερών εφαρμόζοντας διαγράμματα τύπου Shewhart. Στην περίπτωση αυτή δεν χρειάζεται να προβλέψουμε την προκύπτουσα ισοδύναμη αντοχή των 28 ημερών, δεδομένου ότι αυτή που θα προκύψει θα υπερβαίνει την ήδη υπολογιζόμενη ελαφραίνοντας έτσι την πολυπλοκότητα το συστήματος CUSUM.

Συστήματα που χρησιμοποιούν επιταχυνόμενες δοκιμές (π.χ. σε δοκίμια της 1 ή 2 ημερών) έχουν περιορισμένη επιτυχία. Τα συστήματα αυτά συνήθως συνεπάγονται χρήση θέρμανσης στα δείγματα τσιμέντου (δοκίμια), η οποία ως διαδικασία εισάγει μια μεγαλύτερη μεταβλητότητα από ότι βρίσκεται σε δοκίμια 7 ημερών που ωριμάζουν φυσιολογικά.

Δοκιμές δειγμάτων σε φυσιολογικά ωριμαζόμενα δοκίμια των 3 ημερών μπορεί να επιφέρουν μεγαλύτερη μεταβλητότητα από ότι δοκιμές σε φυσιολογικά ωριμαζόμενα δοκίμια 7 ημερών. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα δοκίμια των 3 ημερών των οποίων η θερμοκρασία ελέγχεται από τις συνθήκες του περιβάλλοντος, εμφανίζουν υψηλότερη θερμοκρασία από τα αντίστοιχα των 7 ημερών (τα οποία έχουν προλάβει να «κρυώσουν» την χημική διεργασία πήξεως τους) και αυτό έχει άμεσο και μεγαλύτερο αντίκτυπο στην αντοχή τους.

Σε κλιματολογικές συνθήκες ανάλογες με της Μεγάλης Βρετανίας, η αναλογία αντοχής σε δοκίμια 7:28 ημερών (δηλ. να μετράμε δοκίμια 7 ημερών για να εκτιμούμε την αντοχή για δοκίμια 28 ημερών) είναι πιθανόν πιο σταθερή, από την αντίστοιχη για δοκίμια 3:28 ημερών και για τον λόγο αυτό αποτελεί καλύτερη επιλογή για τον έλεγχο του συστήματος. Τα προσθετικά στοιχεία που εισάγονται στο σύγχρονο σκυρόδεμα και οι επιπλοκές που αυτά εισάγουν στην πρόβλεψη της αντοχής θραύσεως, π.χ. προσθετικά, υγραντικά κλπ., αντιμετωπίζονται καλύτερα με τη χρήση του μοντέλου αντοχής 7:28 ημερών.

Η αναλογία αντοχής μεταξύ των πρώιμων δοκιμίων και των δοκιμίων 28 ημερών για το ίδιο μίγμα παρακολουθείται επίσης από ένα CUSUM ικανό να ανιχνεύσει οποιαδήποτε σημαντική μεταβολή στην σχέση. Αυτό είναι το διάγραμμα CUSUM C που περιγράφεται στις προηγούμενες παραγράφους. Ωστόσο, εάν ένα από τα άλλα συστήματα ελέγχου χρησιμοποιείται με δεδομένα αντοχής από πρώιμα δοκίμια, είναι απαραίτητο να ελέγχεται συνεχώς ότι η συσχέτιση δεν έχει αλλάξει. Αυτό μπορεί να γίνει σε μια συνεχή βάση χρησιμοποιώντας για παράδειγμα, τα τελευταία 10 αποτελέσματα ή περιοδικά, π.χ., κάθε πέμπτο αποτέλεσμα.

Η πολυμεταβλητή προσέγγιση CUSUM χρησιμοποιώντας δεδομένα θερμοκρασίας, πυκνότητας και κάμψης, που αναφέρθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, υποστηρίζει την πρόωρη ερμηνεία των δεδομένων, δηλαδή την ανίχνευση μιας μεταβολής στην ποιότητα, από ότι είναι δυνατόν με την μονοπαραμετρική CUSUM.

Ενώ οι προβλεπόμενες αντοχές θραύσεως που αντιστοιχούν ισοδύναμα σε δοκίμια 28 ημερών χρησιμοποιούνται για να διαπιστωθεί εάν χρειάζεται δράση για να κρατηθεί η διαδικασία υπό έλεγχο, οποιαδήποτε αξιολόγηση για συμμόρφωση του τύπου του σκυροδέματος βασίζεται αποκλειστικά στα πραγματικά δεδομένα αντοχής 28 ημερών και όχι στις ισοδύναμες προβλέψεις των 28 ημερών.

2.7.2. Αντιλήψεις για το σκυρόδεμα μίξεως

Μεταβολές στην απόδοση του σκυροδέματος είναι συνήθως το αποτέλεσμα μιας σταδιακής αλλαγής σε ένα συστατικό υλικό, π.χ. αλλαγή των χαρακτηριστικών των πρώτων υλών που παραδίδονται στο εργοστάσιο παραγωγής. Μια τέτοια αλλαγή προφανώς θα επηρεάσει όλα τα σκυροδέματα που κάνουν χρήση αυτού του συστατικού. Ενδεχόμενα και κατ'επέκταση μια τέτοια αλλαγή στη λειτουργία ενός εργοστασίου θα επηρεάσει όλα
Οι εκτεταμένες χρήσεις του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών στον τομέα της Δομοστατικής - 84 -

τα σκυροδέματα που παράγονται στο εν λόγω εργοστάσιο. Για την ανίχνευση μιας δυσμενούς μεταβολής της ποιότητας απαιτούνται επαρκή δεδομένα, καθώς μια πραγματική αλλαγή πρέπει να διαχωρίζεται από την φυσιολογική μεταβλητότητα. Ελέγχοντας κάθε σκυρόδεμα ξεχωριστά, αυτό θα καθυστερούσε το συνολικό χρόνο που απαιτείται για την ανίχνευση μιας δυσμενούς μεταβολής.

Αξιοποιώντας την οικογένεια των σκυροδεμάτων, αυτή η προσέγγιση επιτρέπει περισσότερα αποτελέσματα δοκιμής για ενσωμάτωση στο σύστημα. Αυτό επιταχύνει το χρόνο που απαιτείται για την ανίχνευση μιας σημαντικής αλλαγής.

Για παράδειγμα στο Σχήμα 5, η Shewhart ανάλυση των δεδομένων του πίνακα 4, δείχνει 7 αποτελέσματα πάνω από την τιμή θραύσεως - στόχο και αυτό δείχνει μια σημαντική τάση. Για τον προσδιορισμό αυτής της τάσης το σύστημα σαφώς χρειάζεται αυτά τα 7 αποτελέσματα. Εάν η ανάλυση αντοχής σε θλίψη παρακολουθούσε χωριστά κάθε ένα από αυτά τα αποτελέσματα, αυτά θα μπορούσαν να ανήκουν σε 7 διαφορετικές κατηγορίες (κλάσεις) και ως εκ τούτου κάθε σύστημα ελέγχου (που μελετά χωριστά την κάθε μία κατηγορία) θα είχε ένα και μόνο αποτέλεσμα προς επεξεργασία, και καμμία εξαγωγή συμπεράσματος - τάση δεν θα ήταν δυνατόν να εντοπιστεί (από αυτό το αποτέλεσμα).

Είναι σαφές ότι όλο το σκυρόδεμα που παράγεται σε ένα εργοστάσιο έτοιμου μίγματος δεν ανήκει στην ίδια κατηγορία αντοχής σε θλίψη. Στην πραγματικότητα μια μονάδα παραγωγής σκυροδέματος μπορεί να παράγει μια τεράστια ποικιλία μιγμάτων. Προφανώς σκυροδέματα μπορούν να παραχθούν για διάφορες κλάσεις θλιπτικών αντοχών, με διαφορετικές συνέχειες παρτίδων στην παραγωγή, με ή χωρίς μία ποικιλία προσμίξεων από μόνα τους ή σε συνδυασμό, με διαφορετικά συνολικά μεγέθη, σε διαφορετικούς τύπους και αναλογίες των λεπτόκοκκων αδρανών, με διαφορετική ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμέντο και προδιαγραφών για τη μέγιστη αναλογία νερού τσιμέντου, με ή χωρίς προσθήκες φωτοευαίσθητων υλικών (ίνες), με διαφορετικές κλάσεις τσιμέντων και προσθήκες κλπ. Βέβαια η ποικιλία των μιγμάτων που παράγονται σε ένα τυποποιημένο εργοστάσιο μικρής κλίμακας θα είναι σημαντικά μικρότερη.

Ακόμη και στην περίπτωση που ένα εργοστάσιο παράγει έστω και δύο μόνο τύπους σκυροδέματος, συνδυάζοντας τα δεδομένα δοκιμών των δύο τύπων σε μια οικογένεια θα μείωνε κατά το ήμισυ τον χρόνο για την ανίχνευση μιας δυσμενούς μεταβολής στην παραγωγή των προϊόντων του.

Κάθε μίγμα μπορεί να ελέγχεται χωριστά (ιδιαίτερα σε εργοστάσια παραγωγής μικρού αριθμού τύπων σκυροδέματος), ή με βάση την συγκεκριμένη κατηγορία αντοχής σε θλίψη. Εναλλακτικά, το πρότυπο EN 206-1 επιτρέπει παρόμοια σκυροδέματα να συνενωθούν σε μια οικογένεια και το σύστημα ελέγχου να μπορεί να εφαρμοστεί αυτοτελώς στην οικογένεια αυτή. Το παράρτημα Κ του προτύπου EN 206-1:2000 συνιστά όπου υπάρχει μικρή εμπειρία στην συγκρότηση οικογενειών από σκυροδέματα, να ακολουθηθούν οι παρακάτω κανόνες στον ορισμό της οικογένειας:

- *τσιμέντο ενός τύπου, όσον αφορά στην κατηγορία αντοχής και προέλευση*
- *εξακριβωμένα προσθετικά και προσθήκες τύπου I*
- *σκυροδέματα με ή χωρίς προσθετικά μείωσης περιεκτικότητας σε νερό / προσθετικών πλαστικοποίησης*
- *όλο το εύρος των κατηγοριών να εμπίπτει στην διαδικασία συμμόρφωσης της παραγωγής*
- *χρήση σκυροδεμάτων που ανήκουν σε ένα περιορισμένο εύρος κατηγοριών αντοχής θραύσεως.*

Κατά αυτήν την προσέγγιση θα προκύψουν έγκυροι συντελεστές διορθώσεως που προβλέπονται για αυτές τις μεταβλητές και για τα διάφορα μέλη της οικογένειας, έτσι ώστε να καταστήσουν τα αποτελέσματα συγκρίσιμα, και να μπορέσουν όλα να χρησιμοποιηθούν σε ένα ενιαίο σύστημα ελέγχου CUSUM.

Το σημείο εκκίνησης για κάθε οικογένεια είναι η επιλογή ενός συνεπούς, μέγιστου συνολικού πλήθους καθώς και ένα σύνολο συνιστώντων υλικών παρασκευής της οικογένειας.

Γι' αυτήν την επιλογή η σχέση αντοχής θραύσεως και περιεκτικότητας σε τσιμέντο (ή αναλογίας νερού / τσιμέντου) καθορίζεται και αποτελεί την κύρια σχέση ορισμού της επιλογής. Η κύρια σχέση καθορίζεται συνήθως μετά από μια σειρά δοκιμών σε διάφορα μίγματα περιεκτικότητας τσιμέντου, με χρήση υπολογιστικής μοντελοποίησης βασισμένη σε ένα περιορισμένο αριθμό των μιγμάτων δοκιμής ή μετά από ανάλυση των δεδομένων παραγωγής.

Μετά από την εξαγωγή της παραπάνω σχέσης, η αναλογία ενός μίγματος για την επίτευξη οποιαδήποτε αντοχής θραύσεως - στόχου μπορεί να προκύψει με μεθόδους παρεμβολής για αυτό το σύνολο των υλικών, δεδομένης της ομοιομορφίας της παραγωγής και για καθορισμένο μέγιστο μέγεθος αδρανών υλικών του μίγματος. Απλές αριθμητικές

προσαρμογές στην περιεκτικότητα τσιμέντου και στα πρόσθετα υλικά (οι οποίες καλούνται δευτερογενείς σχέσεις) γίνονται για να μετατρέψουν σκυροδέματα που καλύπτονται από την κύρια σχέση σε άλλες παραλλαγές (δευτερευόντων τύπων) σκυροδεμάτων ή αντίστροφα. το σκυρόδεμα αναφοράς το οποίο μετατρέπεται σε όλα τα άλλα δευτερογενή τύπου σκυροδέματα, συνδέονται μεταξύ τους πάντα με αυτήν την κύρια σχέση.

Οι σχέσεις που αναφέρονται στα κύρια και δευτερεύοντα μέλη μιας οικογένειας χρησιμοποιούνται σε δύο κατευθύνσεις: (α) για να καθορίσουν τις αναλογίες μίξεως που απαιτούνται για να ικανοποιήσουν μια συγκεκριμένη προδιαγραφή, και (β) για να προβλέψουν την αντοχή θραύσεως του δοκιμαζόμενου σκυροδέματος σαν να αποτελούσε το συγκεκριμένο την βάση αναφοράς. Έτσι οι κατά αντιστοιχία τιμές αντοχής θραύσεως που προκύπτουν χρησιμοποιούνται ως δεδομένα εισόδου στα διαγράμματα ελέγχου του συστήματος.

Όταν αξιόπιστες σχέσεις έχουν υπολογισθεί για σύνδεση με το σκυρόδεμα αναφοράς, τότε και άλλα σκυροδέματα μπορούν να συμπεριληφθούν στην οικογένεια. Με την επεξεργαστική ικανότητα των υπολογιστών, η τάση που μπορεί να ακολουθηθεί είναι να συμπεριλαμβάνουμε ή να εξαιρούμε μία ευρεία γκάμα μιγμάτων από την οικογένεια και να προσεγγίζουμε την ανάλυση των δεδομένων με διάφορους τρόπους. Τα πολυσυνθετικά συστήματα και τα συστήματα CUSUM είναι ικανά να υποστηρίξουν τέτοιες εξελιγμένες αναλύσεις. Για παράδειγμα, ένας αριθμός εργοστασίων παραγωγής που χρησιμοποιούν τα ίδια υλικά μπορούν να συμπεριληφθούν στην ίδια οικογένεια, αλλά καθώς τα συνδυασμένα δεδομένα αναλύθηκαν για την εξεύρεση τάσεων, κάθε εργοστάσιο θα πρέπει να επαναελέγχεται χωριστά. Ακόμα και όταν τα δεδομένα δεν συνδυάζονται σε οικογένειες, τα δεδομένα μπορούν να εξεταστούν για να επιβεβαιώσουν τις τάσεις.

Για παράδειγμα, εάν η οικογένεια A υποδεικνύει μία συγκεκριμένη τάση και αυτό πιστεύεται ότι είναι λόγω αλλαγής των συστατικών X, τα δεδομένα από άλλες οικογένειες / μίγματα που περιέχουν αυτό το συστατικό θα πρέπει επίσης να αναθεωρηθούν για σημάδια της ίδιας τάσης και να ληφθούν κατά περίπτωση μέτρα.

Σε γενικές γραμμές ο εγκλωβισμός αέρα στο σκυρόδεμα δεν συμπεριλαμβάνεται σε μια οικογένεια και αυτό θα πρέπει να ελεγχθεί ως ένα ξεχωριστό σκυρόδεμα, λόγω της πρόσθετης μεταβλητότητας που προκαλείται από τις διακυμάνσεις στην περιεκτικότητα του εγκλωβισμένου αέρα. Ωστόσο, αν αυτό ελέγχεται από ένα σύστημα CUSUM, είναι επίσης δυνατόν να ρυθμίσουμε την αντοχή θραύσεως επί τη βάση της μετρηθείσας περιεκτικότητας εγκλωβισμένου αέρα. Αυτό γίνεται για να αποφύγουμε περιττές αλλαγές στις αναλογίες περιεκτικότητας μίγματος όταν οι αλλαγές στα όρια αντοχής θραύσεως του

σκυροδέματος είναι απλώς το αποτέλεσμα της μεταβλητής περιεκτικότητας σε εγκλωβισμένο αέρα.

Κατά τον έλεγχο μιας οικογένειας μίγμάτων, η κύρια αντοχή θραύσεως του σκυροδέματος αναφοράς (για την οποία άλλες κατηγορίες αντοχής σε θλίψη έχουν διορθωθεί) είναι είτε ένα σκυρόδεμα που αντιπροσωπεύει το πιο κοινότυπο μίγμα που παράγεται στο εργοστάσιο ή θεωρείται ως το μέσο εύρος της οικογένειας, πάντως πρέπει να είναι ένα σκυρόδεμα με κύρια σχέση ως προς την οικογένεια. Ένας αριθμός προσαρμογών μπορεί να χρειαστεί να εφαρμοστούν σε ένα αποτέλεσμα δοκιμής για να εξασφαλίσουν ότι αυτό μπορεί να συγκριθεί με το σκυρόδεμα αναφοράς, π.χ. για την αντοχή κάμψης ή για την συμπερίληψη στο μίγμα πλαστικοποιητών. Τα πρώτα βήματα είναι να μετατρέψουμε την μετρούμενη αντοχή του ελεγχόμενου σκυροδέματος, σε μία ισοδύναμη αντοχή ενός σκυροδέματος με κύρια σχέση και στη συνέχεια αυτή η ισοδύναμη αντοχή να μετακινηθεί κατά μήκος της κύριας σχέσης έτσι ώστε να γίνει η ισοδύναμη αντοχή του σκυροδέματος αναφοράς.

Στην πράξη, ρυθμίσεις για την διασφάλιση ομοιομορφίας και ομοιογένειας συστατικών εφαρμόζονται στην ποσότητα τσιμέντου που περιέχεται στο σκυρόδεμα, έτσι ώστε να θεωρείται ότι ισοδυναμεί με σκυρόδεμα κύριας σχέσης. Η μετρούμενη αντοχή του ελεγχόμενου σκυροδέματος μπορεί να είναι παραπάνω, παρακάτω ή στα ίδια επίπεδα με την τιμή αντοχής της κύριας σχέσης για την ρυθμιζόμενη περιεκτικότητα σε τσιμέντο. Μια περαιτέρω προσαρμογή πρέπει να γίνει στο προβλεπόμενο αποτέλεσμα αντοχής έτσι ώστε να επιτρέψει την εκτίμηση της διαφοράς μεταξύ των αντοχών του προσαρμοσμένου μίγματος με το σκυρόδεμα αναφοράς. Αυτό γίνεται προκειμένου να προσδιοριστεί η αντοχή του υπό δοκιμή σκυροδέματος που θα είχε επιτευχθεί αν αυτό είχε την ίδια περιεκτικότητα σε τσιμέντο, όπως το σκυρόδεμα αναφοράς.

Αυτό είναι ένα αποτέλεσμα διπλά ρυθμισμένο το οποίο συγκρίνεται με την μέση αντοχή θραύσεως του σκυροδέματος αναφοράς, και η διαφορά μεταξύ αυτών των τιμών είναι που εφαρμόζεται στην CUSUM.

2.8. Καθοδήγηση των Συστημάτων Ελέγχου

2.8.1. Ανώμαλα Αποτελέσματα

Κατά περιόδους, τα αποτελέσματα που θα προκύψουν στο σύστημα ελέγχου, θα συμβεί να είναι ακραίες τιμές εκτός των περιοχών που θα ανήκει το μεγαλύτερο μέρος των δεδομένων. Αυτά τα αποτελέσματα θα μπορούσαν να οφείλονται σε διάφορους λόγους, για παράδειγμα, ένα σφάλμα δοκιμών ή σε ένα αποτέλεσμα λάθους του συστήματος. Εάν μια ακραία τιμή περιλαμβάνεται στην κύρια ανάλυση των δεδομένων, θα μπορούσε να επηρεάζει δυσανάλογα το σύστημα ελέγχου και να οδηγήσει σε δράσεις που αναλαμβάνονται για να ρυθμίσουν την διαδικασία που είναι μη αναγκαίες (και οι οποίες θα μπορούσε να επιτείνουν τον κίνδυνο για την χρήση του σκυροδέματος φέρνοντας την διαδικασία σε ακραίες καταστάσεις). Ωστόσο, εκτός εάν αυτό είναι τεχνικώς δικαιολογημένο και τεκμηριωμένο, κάθε ακραία τιμή ελέγχεται για τη συμμόρφωση της κατά το πρότυπο EN 206-1 με βάση το «κριτήριο μεμονωμένης παρτίδας» (individual batch criterion).

Ένας γενικός κανόνας που έχει υιοθετηθεί, είναι ότι τα αποτελέσματα που απέχουν περισσότερο από $3 \times \sigma$ (3 τυπικές αποκλίσεις) από τη μέση τιμή, θα πρέπει να θεωρηθούν ως ακραίες τιμές και ως εκ τούτου να εξαιρούνται από την ανάλυση. Η τιμή $3 \times \sigma$ ισοδυναμεί με 3 αποτελέσματα στα 1000 (βλ. Πίνακα 2). Ωστόσο, εάν ένα αποτέλεσμα που παραβιάζει το όριο $3 \times \sigma$ ακολουθείται από ένα που είναι μεγαλύτερο από τα όρια για $2 \times \sigma$ προς την ίδια κατεύθυνση, τότε αμφότερα τα αποτελέσματα θα πρέπει να περιλαμβάνονται στο σύστημα ελέγχου και να συνοδεύονται με άμεση έρευνα για να εντοπιστεί εάν μια σημαντική αλλαγή έχει συμβεί.

2.8.2. Χειριζόμενα μίγματα που δεν ανήκουν στην ίδια οικογένεια σκυροδέματος

Το σύστημα ελέγχου παρέχει πληροφορίες για το σκυροδεμα που ανήκει στην ίδια οικογένεια των μιγμάτων που ελέγχονται στο πλαίσιο του συστήματος. Η βασική σχέση για μια συγκεκριμένη οικογένεια μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο μιγμάτων που δεν ανήκουν στην ίδια οικογένεια. Αυτό μπορεί να γίνει με ένα αριθμό τρόπων:

- Η περιεκτικότητα σε τσιμέντο ενός σκυροδέματος που δεν ανήκει στην οικογένεια μπορεί να συνδεθεί με μία συντηρητική εκτίμηση με του κυρίου στελέχους του μίγματος, και εάν η περιεκτικότητα σε τσιμέντο για το κύριο μίγμα αυξάνεται, θα πρέπει να γίνει επανεξέταση για το σχεδιασμό του μίγματος που δεν ανήκει στην οικογένεια σκυροδέματος
- Η δημιουργία μιας ασφαλούς διαφοράς περιεκτικότητας σε τσιμέντο (η οποία μπορεί να είναι υψηλότερης ή χαμηλότερης τιμής), για να εφαρμοστεί σε διαφορετικούς τύπους τσιμέντου ή συνδιασμό περιεκτικότητας τσιμέντου. Αυτές οι διαφορές μπορεί να καταρτιστούν για διάφορα μίγματα μέσω δοκιμών στο εργαστήριο ή να ευρεθούν από άλλα συστήματα ελέγχου. Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη όταν ένα ειδικού τύπου σκυρόδεμα παράγεται σε μία μη περιοδική (έκτακτη) βάση. Αυτό έχει ως αντίκτυπο την αύξηση του περιθωρίου μεταξύ της καθορισμένης χαρακτηριστικής αντοχής και της αντοχής θραύσεως - στόχου.

2.8.3. Χειρισμός μιγμάτων που δεν ελέγχονται από τις απαιτήσεις θλιπτικής αντοχής

Όταν αναλογίες μίγματος, ιδιαίτερα τσιμέντου, μετρούμενες ανά κυβικό μέτρο, ελέγχονται από τα κριτήρια αντοχής θραύσεως, ο καθορισμός της αντοχής στόχου για το μείγμα είναι σχετικά απλός. Η αντοχή θραύσεως τότε δίνεται ως η καθορισμένη χαρακτηριστική αντοχή συν το περιθώριο.

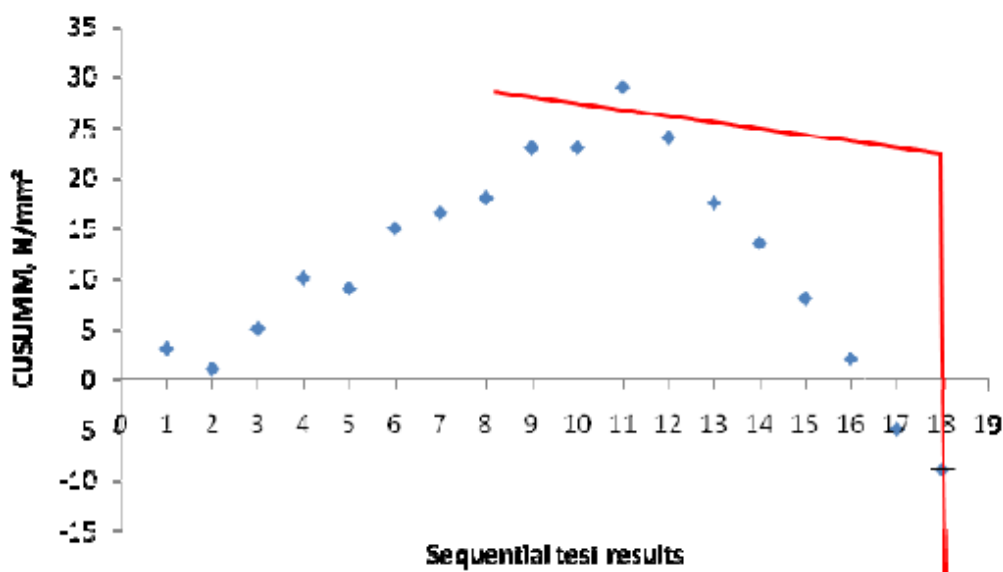
Ωστόσο, η αντοχή θραύσεως δεν καθορίζει πάντοτε το σχεδιασμό του μίγματος. Για παράδειγμα μια θεμελίωση που τοποθετείται σε αφιλόξενες - επιθετικές συνθήκες του εδάφους, μπορεί να απαιτήσει μία δομική αντοχή σκυροδέματος τύπου C25/30, αλλά λόγω της ανάγκης να αντισταθεί στις επιθετικές συνθήκες του εδάφους να απαιτεί ο μέγιστος λόγος w / c να είναι 0.45, γεγονός το οποίο στην πραγματικότητα θα παράγει μια αντοχή θραύσεως πολύ πάνω από αυτό που απαιτείται για την επίτευξη της προκαθορισμένης χαρακτηριστικής αντοχής. Η αντοχή - στόχος θα πρέπει να προσδιορίζεται από την υψηλότερη (ενδεχομένως) περιεκτικότητα σε τσιμέντο και θα πρέπει να είναι σύμφωνη με την καθορισμένη αντοχή, τη μέγιστη αναλογία νερού / τσιμέντου, και την ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμέντο του μίγματος.

Εάν αυτή η διαδικασία δεν ακολουθηθεί, δηλαδή εάν η ένταση του στόχου προσδιορίζεται από την καθορισμένη αντοχή και μόνο, η τυπική απόκλιση θα αυξηθεί σημαντικά και το αποτέλεσμα μπορεί να εμφανιστεί ως μια ακραία τιμή (στην υψηλή πλευρά). Ωστόσο, η πιο σοβαρή συνέπεια είναι ότι η δυσμενής τάση μπορεί να πάρει πολύ
 Οι εκτεταμένες χρήσεις του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών στον τομέα της Δομοστατικής - 90 -

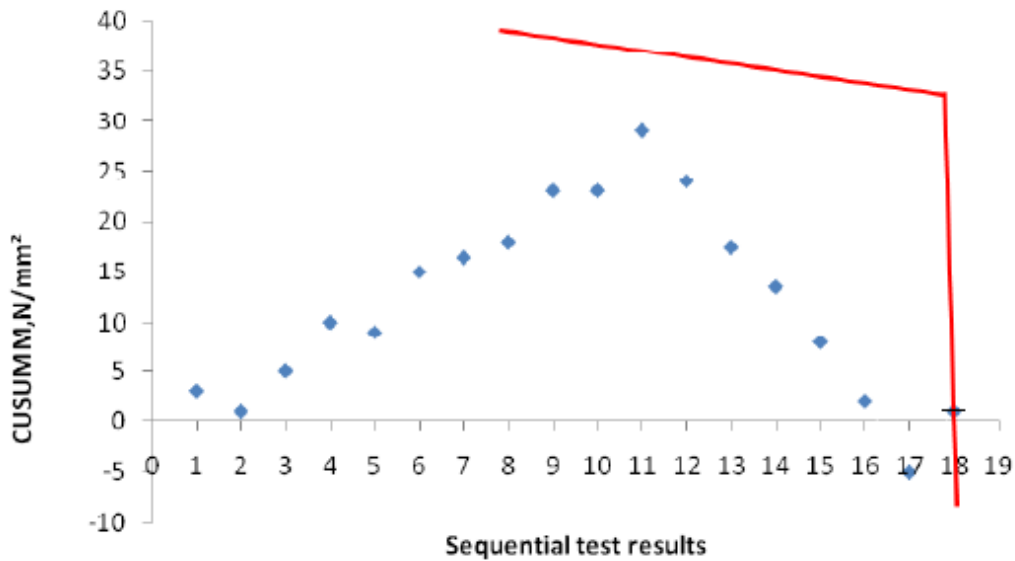
περισσότερο χρόνο για να διασχίσει τη V-μάσκα λόγω της αλλαγής βήματος στην τάση που προκαλείται από το αποτέλεσμα. Η εφαρμογή της ανωτέρω μεθόδου παρουσιάζεται στην περίπτωση δεδομένων που ακολουθεί:

Περίπτωση Ανάλυσης

Ένα σκυροδεμα έχει οριστεί ως τύπου C25/30, με ανώτατο όριο αναλογίας w / c ίσο με 0.55 και ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμέντο 300 kg/m^3 . Υποθέτοντας μια τυπική απόκλιση της τάξης των 4 N/mm^2 για την οικογένεια των σκυροδεμάτων τύπου C25/30 αυτό δίνει μια αντοχή στόχου 38 N/mm^2 (αναφερόμενη σε δοκίμιο κύβου). Ωστόσο μία w / c αναλογία της τάξης του 0.53 ισοδυναμεί με μια αντοχή στόχου 48 N/mm^2 και αυτή η υψηλότερη τιμή θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ως στόχος. Η μετρούμενη αντοχή είναι 44 N/mm^2 . Δεδομένου ότι υπάρχει μια δυσμενή τάση στα αποτελέσματα, η κατάσταση αυτή θα προκαλέσει δράση. (Σχήμα 12α). Ωστόσο, αν ο στόχος αντοχής του σκυροδέματος αυτού είχε εισαχθεί, λανθασμένα ως 38 N/mm^2 , αντί το αποτέλεσμα να είναι 4 N/mm^2 κάτω από την αντοχή στόχου των 48 N/mm^2 , θα εμφανίζονταν 6 N/mm^2 πάνω από την αντοχή στόχου των 38 N/mm^2 . Αυτή η λανθασμένη καταχώρηση δεν θα προκαλούσε δράση ούτε θα αναγνωριζόταν ως μια ακραία τιμή (τρέχουσα τυπική απόκλιση είναι 4 N/mm^2 και η πραγματική τιμή είναι μικρότερη από το $3 \times \sigma$ από την τιμή στόχου, βλέπε Σχήμα 12β).



α) Σωστή αντοχή για αναλογία w / c στο ελεγχόμενο σκυρόδεμα



β) Λανθασμένη αντοχή για αναλογία w / c στο ελεγχόμενο σκυροδέμα

Σχήμα 12: Παράδειγμα της επίδρασης των εσφαλμένων αποτελεσμάτων που εισέρχονται στην αντοχή στόχου για μια αναμίξη που ελέγχεται από τη μέγιστη αναλογία w / c

Για λόγους σαφήνειας, η υπέρθεση των αποτελεσμάτων αυτών με την ισοδύναμη τιμή του σκυροδέματος αναφοράς δεν έχει περιγραφεί.

2.8.4. Ρυθμοί Ελέγχου

Είναι σημαντικό ότι το κατάλληλο επίπεδο και η συχνότητα των δοκιμών, διατηρείται στο σύστημα ελέγχου. Εάν ο ρυθμός δοκιμών είναι πολύ χαμηλός, θα πάρει υπερβολικά χρόνο να αναγνωρίσουμε ότι το σύστημα δεν είναι πλέον εντός ελέγχου και θα υπάρξει ένας μη αποδεκτός κίνδυνος μη συμμορφούμενων προϊόντων που παρέχεται στον πελάτη για σημαντικό χρονικό διάστημα. Από την άλλη πλευρά θα ήταν οικονομικά ασύμφορο να ελεγχθούν όλα τα στοιχεία μιας παρτίδας σκυροδέματος που παράγεται, επομένως ένας ρυθμός δοκιμής απαιτείται έτσι ώστε να προκύψει μια κατάσταση όπου ο κίνδυνος κατανέμεται εξίσου μεταξύ παραγωγού σκυροδέματος και πελάτη. Για ένα δεδομένο ρυθμό παραγωγής, καθώς το ποσοστό των δοκιμών αυξάνει το επίπεδο της αυτοσυσχέτισης αυξάνεται επίσης.

Αυτοσυσχέτιση είναι το μέτρο της σχέσης μεταξύ ενός τρέχοντος αποτελέσματος και των προηγούμενων αποτελεσμάτων.

Ένα υψηλό επίπεδο αυτοσυσχέτισης δείχνει ότι ένα αποτέλεσμα είναι απίθανο να είναι σημαντικά διαφορετικό από τα προηγούμενα αποτελέσματα (π.χ. όταν δειγματοληπτούνται δύο διαδοχικές παραδόσεις του ίδιου τύπου σκυροδέματος) ενώ υπολογισμός της αυτοσυσχέτισης σε χαμηλότερους ρυθμούς θα παρέχει το ίδιο επίπεδο ελέγχου σε χαμηλότερο κόστος. Ωστόσο, πρέπει να αναγνωριστεί ότι τα εργοστάσια με χαμηλά ποσοστά παραγωγής μπορεί να μην είναι σε θέση να επιτύχουν τον βέλτιστο ρυθμό των δοκιμών. Ένας τρόπος χειρισμού εργοστασίων με χαμηλό ρυθμό ελέγχων είναι αυτά να παράγουν ένα μίγμα με πρόσθετο τσιμέντο, δηλαδή περισσότερο τσιμέντο από εκείνο που υποδεικνύεται από την αναλογία ανάμιξης, για την προστασία του χρήστη από τον κίνδυνο που συνδέεται με τις χαμηλές τιμές αντοχής.

Ένας ρυθμός δοκιμών περίπου 16 αποτελεσμάτων ανά μήνα παρέχει αρκετά δεδομένα για να τρέξει ένα αποτελεσματικό σύστημα ελέγχου χωρίς υπερβολικό επίπεδο για το πλήθος τιμών της αυτοσυσχέτισης. Η επίδραση της αυτοσυσχέτισης ελαχιστοποιείται στον υπολογισμό της επίδρασης μιας μεταβολής στο σύστημα ελέγχου με τη χρήση ενός αντι-ταλαντωτικού παράγοντα (βλέπε παράγραφο 2.5.5).

2.8.5. Δράσεις του συστήματος σε συνδιασμό με τις προκύπτουσες μεταβολές

Μία έρευνα στο σύστημα θα πρέπει να αναλάβει την υποχρέωση να προσδιορίσει την αιτία μιας ενδεχόμενης αλλαγής. Ένα σύστημα ελέγχου βασισμένο σε CUSUM θα υποδεικνύει τον κατά προσέγγιση χρόνο, όταν το σύστημα άρχισε να βγαίνει εκτός ελέγχου, βοηθώντας την έρευνα.

Η υπερσχόουσα αρχή είναι η προστασία του χρήστη του σκυροδέματος.

Εάν η αιτία μιας δυσμενούς μεταβολής δεν μπορεί να προσδιοριστεί, όλα τα σκυροδέματα στην οικογένεια πρέπει να ρυθμιστούν. Η κατάλληλη αύξηση ή μείωση στον έλεγχο της περιεκτικότητας του τσιμέντου εγκαθίσταται από το σύστημα ελέγχου, βέβαια ο γενικός κανόνας είναι ότι αλλαγές ανοδικά στην περιεκτικότητα σε τσιμέντο είναι υποχρεωτικές ενώ προς τα κάτω οι αλλαγές είναι προαιρετικές.

Όπως εξηγήθηκε στην παράγραφο 2,5.5 του παρόντος κεφαλαίου, η κατάλληλη ενέργεια ίσως να μην είναι να αλλάξουν εκ προοιμίου οι αναλογίες του μίγματος, καθώς η αιτία της αλλαγής μπορεί να έχει ήδη προσδιοριστεί και διορθωθεί εξαιτίας κάποιας άλλης μεταβολής της φυσικής διεργασίας, π.χ. οι κλίμακες ζυγίσεως βάρους έχουν επισκευαστεί και ρυθμίζεται εκ νέου. Καλή πρακτική ήταν να έχουμε μια ελάχιστη τιμή της τυπικής απόκλισης, συνήθως στο εύρος μεταξύ $3,0 \text{ N/mm}^2$ έως $3,5 \text{ N/mm}^2$.

Αυτό σημαίνει ότι όταν το σύστημα ελέγχου δείχνει ότι η τυπική απόκλιση είναι μικρότερη από αυτή την ελάχιστη τιμή, αυτή (η ελάχιστη τιμή) δεν εγκαθίσταται στην λειτουργία του συστήματος, και για το σύστημα υιοθετείται η μέγιστα των ελαχίστων τιμών ως βάση για την τυπική απόκλιση.

Ωστόσο με σκυροδέματα ενός τύπου και κύκλους μικρής παραγωγής, είναι δυνατό να επιτευχθεί μια τυπική απόκλιση της τάξης του 2 N/mm^2 . Όμως, οι αλλαγές μεταξύ των παρτίδων του τσιμέντου μπορεί να οδηγήσουν σε μεταβολές της αντοχής θραύσεως του σκυροδέματος της τάξης του 1 N/mm^2 και αυτό ισοδυναμεί από $0.5 \times \sigma$ με μια τυπική απόκλιση της τάξης των 2 N/mm^2 και αυξημένο κίνδυνο μη συμμόρφωσης με το πρότυπο. Έχοντας υιοθετήσει μια ελάχιστη τυπική απόκλιση προστατεύεται και ο πελάτης αλλά και ο παραγωγός σκυροδέματος.

2.9. Το πρότυπο EN 206-1 και ο Κανονισμός Συμμόρφωσης σε Θλιπτική Αντοχή

2.9.1. Βασικές Απαιτήσεις

Το πρότυπο EN 206-1, (ευρωπαϊκό πρότυπο για τις διαδικασίες παραγωγής σκυροδέματος), δηλώνει ότι η εκτίμηση της συμμόρφωσης της παραγωγής πρέπει να γίνεται με βάση τα αποτελέσματα των δοκιμών που λαμβάνονται κατά τη διάρκεια μιας περιόδου αξιολόγησης, η οποία δεν πρέπει να υπερβαίνει τους τελευταίους δώδεκα μήνες. Η συμμόρφωση του σκυροδέματος σε θλιπτική αντοχή εκτιμάται σε δείγματα - δοκίμια των 28 ημερών με την εφαρμογή δύο κριτηρίων:

Κριτήριο 1 - εφαρμόζεται σε ομάδες των «n» μη επικαλυπτόμενων ή επικαλυπτόμενων συνεχόμενων δοκιμίων

Κριτήριο 2 - εφαρμόζεται σε κάθε ένα αποτέλεσμα μετρήσεων ξεχωριστά.

Τα κριτήρια παρουσιάζονται στον Πίνακα 6.

Πίνακας 6: EN 206-1 Κριτήρια Συμμόρφωσης

Production	Number n of test results for compressive strength in the group	Criterion 1	Criterion 2
		Mean of n results (f_{cm}) N/mm ²	Any individual test result (f_{ci}) N/mm ²
Initial	3	$\geq f_{ck} + 4$	$\geq f_{ck} - 4$
Continuous	Not less than 15	$\geq f_{ck} + 1.48\sigma$	$\geq f_{ck} - 4$

Ανάλογα με το σχήμα των δειγμάτων δοκιμής, η κατάλληλη χαρακτηριστική αντοχή θραύσεως f_{ck} , επιλέγεται για την καθορισμένη κλάση αντοχής σε θλίψη. Τα ίδια κριτήρια ισχύουν ανεξάρτητα από το αν τα δοκίμια προς μέτρηση, είναι σε μορφή κυλίνδρου ή κύβου. Με βάση τα κριτήρια που ορίζονται στο πρότυπο EN 206-1, η παραγωγή ορίζεται ως είτε «Αρχική» ή «συνεχής». Με βάση αυτή την ταξινόμηση της παραγωγής, η συμμόρφωση της παραγωγής (conformity) επιβεβαιώνεται αν πληρούνται τα δύο κριτήρια που αναφέρονται στον Πίνακα 6.

Σε περίπτωση που η συμμόρφωση αξιολογείται με βάση μια συγκεκριμένη οικογένεια (βλ. Παράγραφο 2.7.2), εφαρμόζεται το Κριτήριο 1 στο σκυρόδεμα αναφοράς, Οι εκτεταμένες χρήσεις του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών στον τομέα της Δομοστατικής

λαμβάνοντας υπόψη όλα τα συμπεριλαμβανόμενα αποτελέσματα των δοκιμών της οικογένειας, ενώ το Κριτήριο 2 πρόκειται να εφαρμοστεί στα αρχικά αποτελέσματα των δοκιμών, δηλαδή για τη συμμόρφωση μιας ανεξάρτητης παρτίδας, τα αποτελέσματα ελέγχου δεν μπορούν να παρουσιάζουν μικρότερη αντοχή από την χαρακτηριστική αντοχή θραύσεως (σχετίζεται με την καθορισμένη κατηγορία μείον 4 N/mm^2).

Τα Βρετανικά αντίστοιχα πρότυπα της Ένωσης Προϊόντων Λατομείων (UK Quarry Products Association) που τώρα είναι Μέλος της Ένωσης Παραγωγής Μεταλλευτικών Προϊόντων (UK Mineral Products Association), παρέχουν λεπτομερείς οδηγίες σχετικά με την εφαρμογή των κανόνων συμμόρφωσης του προτύπου EN 206-1, και έχει αποδειχθεί ότι ο κίνδυνος για τον παραγωγό σκυροδέματος από το κριτήριο μέσης αντοχής θραύσεως ($\geq (f_{ck} + 1.48s)$) είναι μη αποδεκτά υψηλό όταν εφαρμόζεται σε παρτίδες των 15 δοκιμών ακόμα και όταν χρησιμοποιείται ένα περιθώριο τυπικής απόκλισης της τάξης των $1.96 \times \sigma$. Ένα τέτοιο περιθώριο μπορεί να είναι επαρκές για το κριτήριο μεμονωμένης παρτίδας (που ισοδυναμεί με 3 αποτυχίες στα 1000 δοκίμια, όταν η τυπική απόκλιση είναι 4.0 N/mm^2), αλλά ο κίνδυνος αστοχίας για τον παραγωγό σκυροδέματος, όσον αφορά στην μέση αντοχή θραύσης παραμένει υψηλός. Απλά αυξάνοντας το ποσοστό των δοκιμών σε κάποιο υψηλότερο επίπεδο δεν μπορεί να λύσει το πρόβλημα που οφείλεται στην αύξηση του επιπέδου της αυτοσυσχέτισης εξαλείφοντας έτσι το όφελος από την αύξηση του αριθμού των δοκιμών.

2.9.2. Περίοδος Αξιολόγησης

Σε όλη την Ευρώπη, ο πραγματικός ρυθμός δοκιμών στην πράξη, είναι κάτι το μεταβλητό. Ο καθορισμός των περιόδων αξιολόγησης ως προς την αντοχή θραύσεως των δοκιμών έχει σημαντικές συνέπειες στον έλεγχο της συμμόρφωσης. Για ρυθμό ελέγχου 15 αποτελέσματος τον μήνα, θα χρειαστεί περίπου ένα μήνα για να ανιχνευθεί μια αλλαγή της τάξης των $0.5 \times \sigma$ χαμηλότερο της αντοχής θραύσης - στόχου, δηλαδή για αυτόν το μήνα, η μέση αντοχή θραύσης θα μπορούσε να είναι για παράδειγμα, $(1,96 - 0,5)\sigma$, το οποίο συνιστά μια αποτυχία με βάση το κριτήριο της μέσης αντοχής για την περίοδο αξιολόγησης του μήνα. Λαμβάνοντας άμεσες ενέργειες αποκατάστασης, ο παραγωγός μπορεί να προσαρμόσει τις αναλογίες του μίγματος, π.χ αύξηση της περιεκτικότητας σε τσιμέντου, για να πετύχει την αναμενόμενη αντοχή - στόχο, και όταν τα αποτελέσματα κατά μέσο όρο για ένα μεγαλύτερο χρονικό διάστημα έρθουν εντός κλίμακας, το παραγώμενο σκυροδέμα θα μπορεί να θεωρηθεί συμμορφούμενο για το σύνολο της περιόδου αξιολόγησης.

Οι εκτεταμένες χρήσεις του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών στον τομέα της Δομοστατικής

Το γεγονός ότι οι ίδιοι κανόνες όταν εφαρμόζονται για τα ίδια δεδομένα κατά τη διάρκεια διαφορετικών περιόδων αξιολόγησης μπορεί να παράγει διαφορετικά αποτελέσματα συμμόρφωσης, δεν εμπνέει εμπιστοσύνη στη διαδικασία.

Η στατιστική βάση του κριτηρίου της μέσης αντοχής του προτύπου EN 206-1 είναι η επίτευξη ενός AOQL της τάξης του 5%. Η αποτυχία σε συμμόρφωση με τα κριτήρια μέσης αντοχής δείχνει ότι το μέσο εξερχόμενο όριο ποιότητας (AOQL), είναι μεγαλύτερο από 5% και όχι ότι το σκυρόδεμα είναι ακατάλληλο για το σκοπό που προορίζεται. Ωστόσο, αυτό αποτελεί ένδειξη ότι ο παραγωγός σκυροδέματος πρέπει να αναλάβει δράση για να επιτευχθεί μια AOQL της τάξης του 5%.

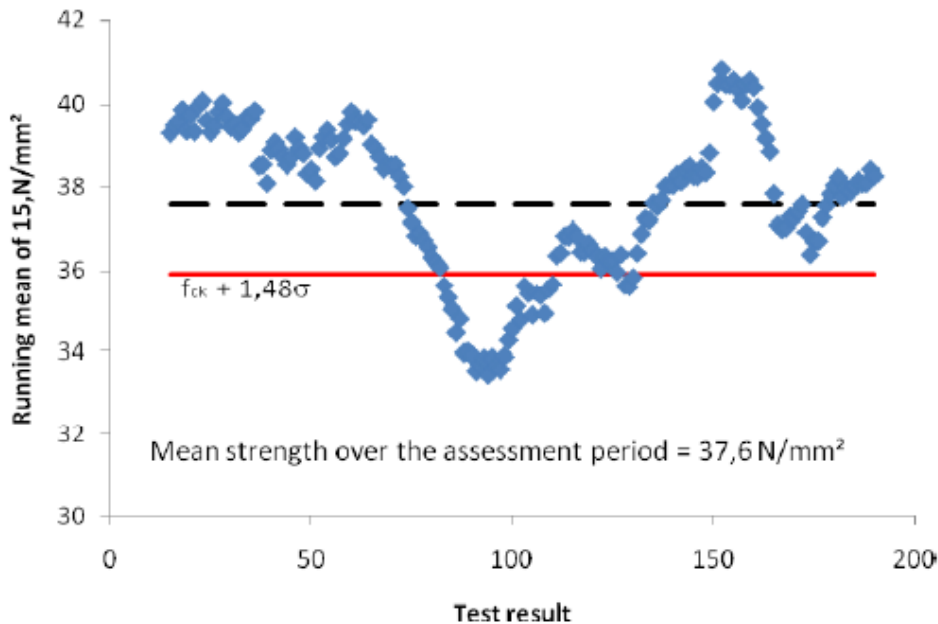
2.9.3. Κανόνες συμμόρφωσης για θλιπτική αντοχή

Εάν η περίοδος αξιολόγησης που επιλέγεται από τον παραγωγό είναι ένα έτος και όλα τα αποτελέσματα μιας οικογένειας χρησιμοποιούνται, ο κίνδυνος μη-συμμόρφωσης για την περίοδο ελέγχου είναι κοντά στο μηδέν. Ωστόσο, κατά το τρέχον έτος θα μπορούσαν να υπάρξουν περίοδοι κατά τις οποίες η παραγωγή δεν επιτύγχανε την καθορισμένη χαρακτηριστική αντοχή, δείτε Σχήμα 13.

Περίπτωση

Τα δεδομένα αναφέρονται στην συμμόρφωση με το κριτήριο της μέσης αντοχής ενός σκυροδέματος τύπου C25/30 με αντοχή θραύσεως - στόχο της τάξης των 38 N/mm^2 (με δοκίμια σε μορφή κύβου), και ένα περιθώριο τυπικής απόκλισης για παράδειγμα της τάξης του $2 \times \sigma$. Η τυπική απόκλιση είναι μία σταθερά της τάξης των 4 N/mm^2 . Το Σχήμα 13 συνίσταται από μία ακολουθία τυχαίων δειγμάτων με μέση αντοχή 38 N/mm^2 με εξαίρεση τα αποτελέσματα μεταξύ 77 έως 109, όπου η μέση αντοχή θραύσεως καθορίστηκε στα 35 N/mm^2 . Ωστόσο, το σύνολο δεδομένων ρυθμίζεται χειροκίνητα για τον αποκλεισμό μεμονωμένων αποτυχιών, όπως και στην πράξη τα εν λόγω αποτελέσματα θα είχαν δηλωθεί ως μη συμμορφούμενα και θα είχαν αποκλειστεί από την ανάλυση συμμόρφωσης της μέσης αντοχής θραύσεως, δηλαδή δεν αποτελούν μέρος του πληθυσμού που είναι συμμορφούμενος.

Ο τρεχων μέσος 15 δοκιμίων υποδεικνύει μη συμμόρφωση μεταξύ των αποτελεσμάτων 86 έως 100 και αυτό υπερθέτει την μη-συμμόρφωση της ζώνης που αντιπροσωπεύεται από τα αποτελέσματα των δοκιμών [(86 - 15) = 71 έως 100], επιπλέον αυτή η περίοδος της «μη συμμόρφωσης» μπορεί να μην εντοπιστεί, όταν η περίοδος αξιολόγησης είναι της τάξης του ενός έτους.



Σχήμα 13: Απεικόνιση του δυναμικού προβλήματος που οφείλεται στην χρήση μεγάλης περιόδου εκτίμησης της διεργασίας

Υποθέτουμε ότι τα δεδομένα, και η παραγωγή σκυρόδεματος, δεν υπόκεινται σε έλεγχο παραγωγής με τη χρήση ενός από τα συστήματα ελεγχου διαγραμμάτων που έχουν περιγραφεί στις προηγούμενες παραγράφους. Εάν ένα τέτοιο σύστημα ελέγχου ήταν σε λειτουργία, η αλλαγή στη μέση αντοχή θραύσης θα είχε ανιχνευθεί και η παραγωγή θα είχε τακτοποιηθεί πολύ πριν το αποτέλεσμα 109.

Η εξεύρεση λύσης που θα είναι δίκαιη τόσο από την πλευρά του πελάτη όσο και από την πλευρά του παραγωγού δεν είναι εύκολη, καθώς η λύση πρέπει να καλύπτει κανονικές, χαμηλές και υψηλές μονάδες παραγωγής. Μια προτεινόμενη λύση είναι:

Για μονάδες χαμηλής παραγωγής σχεδιασμένου σκυροδέματος:

Σε περίπτωση που ο αριθμός των δειγμάτων δοκιμών ανά τρεις μήνες για σχεδιασμένο σκυρόδεμα δεν είναι μεγαλύτερος από 35, η περίοδος αξιολόγησης πρέπει να περιλαμβάνει

τουλάχιστον 15 και όχι περισσότερο από 35 διαδοχικά αποτελέσματα που λαμβάνονται για περίοδο που δεν υπερβαίνει τους 12 μήνες.

Για μονάδες υψηλής παραγωγής σχεδιασμένου σκυροδέματος:

Σε περίπτωση που ο αριθμός των δειγμάτων δοκιμών ανά τρεις μήνες για σχεδιασμένο σκυρόδεμα υπερβαίνει τα 35, η περίοδος αξιολόγησης δεν πρέπει να υπερβαίνει τους τρεις μήνες. Μια τέτοια λύση δεν επιλύει όλα τα ζητήματα που σχετίζονται με τη συμμόρφωση της αντοχής, για παράδειγμα, τα κριτήρια αυτά βασίζονται στην υπόθεση ότι οι συγκεκριμένες αναλογίες μίγματος ελέγχονται από την αντοχή και αυτό δεν αναφέρεται στην γενική περίπτωση (βλ. 2.8.2).

Προτείνεται επίσης ότι η χρήση των διαγραμμάτων ελέγχου να γίνεται δεκτή ως εναλλακτική στον μέσο κανόνα αντοχής θραύσης. Αυτό εξαρτάται από το συγκεκριμένο θέμα της πιστοποίησης, αν έχει ανατεθεί σε τρίτους ή σε μια συμφωνία μεταξύ των συμβαλλόμενων μερών. Καθώς ένα διάγραμμα έλεγχου αποτελείται από διαδοχικά πλάνα δειγματοληψίας (με γνωστή τυπική απόκλιση), η λειτουργική-χαρακτηριστική καμπύλη του πλάνου δειγματοληψίας μπορεί να τεκμηριωθεί. Η καμπύλη μέσης ποιότητας εξερχόμενων (AOQ) τότε καθορίζεται από πολλαπλασιασμό κάθε ποσοστού όλων των δυνατών αποτελεσμάτων που είναι χαμηλότερα της απαιτούμενης χαρακτηριστικής αντοχής επί την αντίστοιχη πιθανότητα αποδοχής.

Το τμήμα 4.4 δείχνει πώς αυτή η προσέγγιση μπορεί να εφαρμοστεί στα συστήματα ελέγχου που βασίζονται στα διαγράμματα Shewhart και η παράγραφος 2.9.4 δείχνει πώς μπορεί να εφαρμοστεί με χρήση του διαγράμματος CUSUM.

2.9.4. Επιτυγχάνοντας μια AOQL της τάξης του 5% με CUSUM

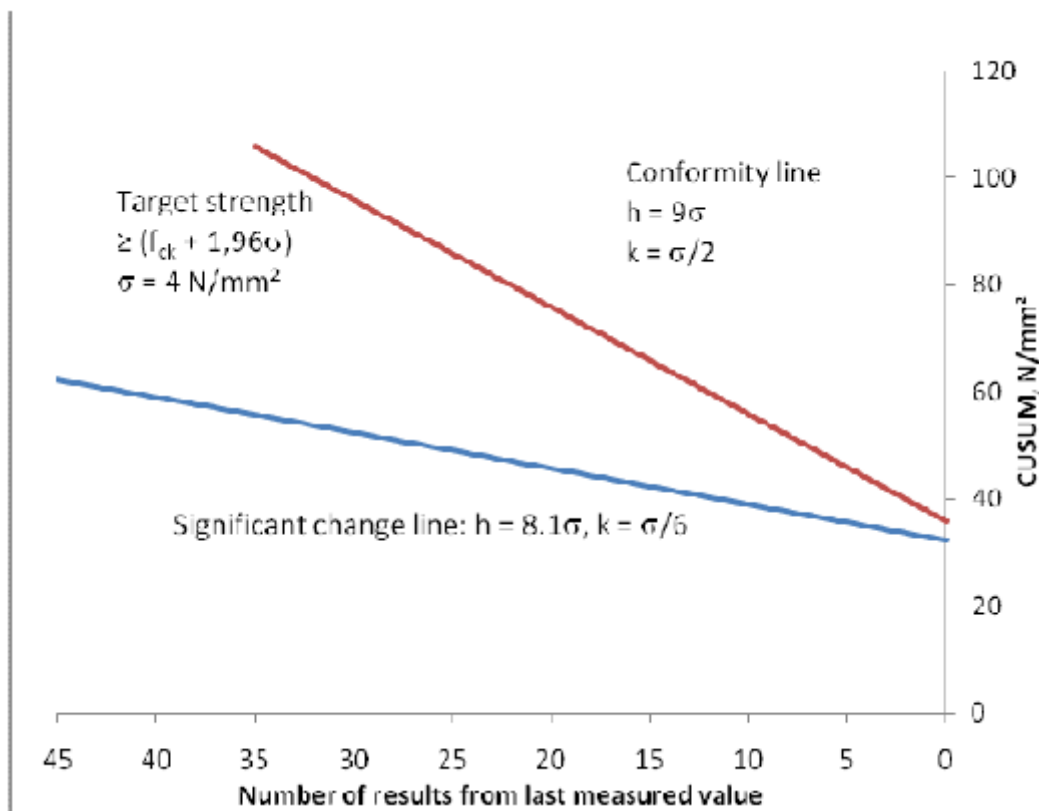
Οι Caspelle και Taerwe έχουν αναπτύξει ένα σύστημα όπου ένα επιλεγμένο περιθώριο του ανώτερου σκέλους της V-μάσκας στο διάγραμμα CUSUM M χρησιμοποιείται για να καθορίσει πότε μία AOQL της τάξης του 5% δεν έχει επιτευχθεί. Οι παράμετροι για τη V-μάσκα δίνονται για πλήθος δοκιμών $n = 15$ και 35 για ανεξάρτητα και αυτοσυσχετιζόμενα αποτελέσματα. Τα δεδομένα παραγωγής δείχνουν ότι τα αποτελέσματα δοκιμών ελέγχου σκυροδέματος, έχουν κάποια αυτοσυσχέτιση και συνεπώς έχουμε τις κατάλληλες τιμές. Για τους λόγους που αναφέρονται στην παράγραφο 2.9.2, ο παραγωγός σκυροδέματος θα πρέπει να επιλέξει μια περίοδο αξιολόγησης με βάση 35
Οι εκτεταμένες χρήσεις του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών στον τομέα της Δομοστατικής

δοκίμια ελέγχου. Η δημοσίευση [5] επικεντρώνεται στην επίτευξη μίας AOQL της τάξης του 5% και συμπεριλαμβάνει περιθώρια μικρότερα του $1.64 \times \sigma$. Η χρήση ενός περιθωρίου μικρότερου από $1.64 \times \sigma$ σημαίνει ότι ο παραγωγός σκυροδέματος στοχεύει σκόπιμα έτσι ώστε η παραγωγή να μην επιτύχει την καθορισμένη χαρακτηριστική αντοχή θραύσεως. Αυτό είναι μη αποδεκτό και το περιθώριο δεν πρέπει να είναι μικρότερο από $1.64 \times \sigma$. Ο πίνακας 7 δίνει τις παραμέτρους της V-μάσκας για επιλεγμένα περιθώρια που βασίζονται σε $n = 35$ και αυτόσυσχετισμένα αποτελέσματα.

Πίνακας 7: Επιλεγμένα παράμετροι V-μάσκας για συμμορφούμενη παραγωγή σκυροδέματος

Περιθώριο	διάστημα απόφασης	Κλίση
1.64σ	3σ	σ/2
1.66σ	8σ	σ/4
1.70σ	9σ	σ/4
1.71σ	4σ	σ/2
1.74σ	10σ	σ/4
1.76σ	5σ	σ/2
1.82σ	6σ	σ/2
1.86σ	7σ	σ/2
1.91σ	8σ	σ/2
1.95σ	9σ	σ/2
1.99σ	10σ	σ/2
2.06σ	2σ	σ/1
2.26σ	5σ	σ/1
2.49σ	10σ	σ/1

Η συμμόρφωση της V-μάσκας εφαρμόζεται μόνο για το άνω σκέλος, δηλαδή στην εκτίμηση του αν η πραγματική αντοχή είναι μικρότερη από την αντοχή θραύσεως - στόχου, και το μήκος του παραθύρου δειγμάτων είναι η επιλεγμένη τιμή $n = 35$ όπως στην περίπτωση του Πίνακα 7. Προκύπτει λοιπόν, ότι η V-μάσκα ελέγχει αν τα τελευταία n αποτελέσματα έχουν επιτύχει μια AOQL της τάξης του 5%. Το Σχήμα 14 για μέθοδο CUSUM M δείχνει τη συμμορφούμενη V-μάσκα. Η V-μάσκα δείχνει τότε μια σημαντική αλλαγή έχει συμβεί (βλ. 5.4).



Εικόνα 14: Συμμόρφωση δοκιμίων και δράση της V-μάσκας για αντοχή θραύσεως - στόχου ($f_{ck} + 1,96\sigma$)

Όταν το διάγραμμα CUSUM διασχίζει τη γραμμή σημαντικής αλλαγής, ο παραγωγός σκυροδέματος θα πρέπει να λάβει άμεσα τα κατάλληλα μέτρα. Ωστόσο, θα υπάρξει ένα πλήθος δοκιμίων που έχουν εξαχθεί από την μονάδα παραγωγής προς εξέταση αλλά ακόμα δεν εξετάστηκαν. Εάν για τον έλεγχο συμμόρφωσης χρησιμοποιείται μια V-μάσκα, το διάγραμμα CUSUM M θα πρέπει να αρχικοποιηθεί από την στιγμή που τα δοκίμια αυτά έχουν δοκιμαστεί.

Αυτό σημαίνει ότι η αρνητική τάση μπορεί να κινηθεί προς τη γραμμή της συμμόρφωσης από μόνη της.

Σε μία δοκιμή με ρυθμό 16 δείγματα ανά μήνα και χρήση δοκιμίων 7-ημερών για την μέτρηση της αντοχής, θα χρειαστούν περίπου 4 αποτελέσματα μεταξύ του να διασχίσουν τη γραμμή σημαντικής αλλαγής και την εκ νέου αρχικοποίηση του διαγράμματος CUSUM M και επομένως η πιθανότητα να διασχίσουν τη γραμμή των ορίων συμμόρφωσης είναι πολύ χαμηλή.

Μια δεκαετία εμπειρίας από τη χρήση των διαγραμμάτων CUSUM για τον έλεγχο αντοχής θραύσεως και των ορίων σημαντικής αλλαγής που δίδονται στο σχήμα 14 και για τον έλεγχο συμμόρφωσης της μέσης αντοχής θραύσεως όπως προβλέπεται στο πρότυπο EN 206-1:2000 χρησιμοποιώντας ένα τρεχοντα μέσο 35 αποτελέσματος, ουδέποτε οδήγησε σε μη συμμόρφωση της μέσης αντοχής.

Υπό αυτές τις συνθήκες η συμμόρφωση με V-μάσκα είναι εξαιρετικά απίθανο να περάσει τα όρια της μάσκας και αν έχει περάσει, θα αποτελεί ένδειξη ότι ο παραγωγός σκυροδέματος θα πρέπει να αναλάβει δράση για την επίτευξη του στόχου αντοχής. Ο παραγωγός σκυροδέματος θα πρέπει ήδη να έχει αναλάβει δράση, όταν διαπιστωθεί κάτι τέτοιο.

2.9.5. Μη συμμόρφωση

Αν το σύστημα ελέγχου δείχνει ότι μια AOQL της τάξης του 5% δεν έχει επιτευχθεί, ο παραγωγός σκυροδέματος οφείλει να αναλάβει άμεση δράση για την επίτευξη του στόχου αντοχής. Επιπλέον, ο παραγωγός θα πρέπει να εντοπίσει τυχόν σκυροδέματα που δεν είναι κατάλληλα για το σκοπό και να ενημερώνει τον χρήστη και ελεγκτή του συστήματος. Ο φορέας πιστοποίησης θα ελέγξει ότι η διαπίστωση της μη-συμμόρφωσης πραγματοποιήθηκε με τον κατάλληλο τρόπο καθώς και ότι οι χρήστες και ο ελεγκτής του συστήματος ενημερώθηκαν σωστά.

2.10. Ο Σχεδιασμός του Συστήματος Ελέγχου

Μόλις η συνεχής παραγωγή είναι σε εξέλιξη ο παραγωγός σκυροδέματος θα πρέπει να μπορεί να ελέγχει την παραγωγή ως προς την μέση αντοχή θραύσεως, χρησιμοποιώντας διαγράμματα ελέγχου. Η χρήση των διαγραμμάτων ελέγχου θα πρέπει να περιορίζεται στους παραγωγούς σκυροδέματος με πιστοποίηση από τρίτους φορείς/ελεγκτές (όπως η πλειοψηφία των παραγωγών του έτοιμου και κατά παραγγελία κατασκευασμένου σκυροδέματος βιομηχανίες της Δυτικής Ευρώπης) ή όπου υπάρχει απευθείας συμφωνία μεταξύ του παραγωγού και του πελάτη.

Τα παρακάτω συνιστούν τις ελάχιστες απαιτήσεις ενός συστήματος ελέγχου:

- Επίτευξη μέγιστης μέσης εξερχόμενης ποιότητας (AOQ) που δεν υπερβαίνει το 5,0%. (Παρατήρηση: Αυτό εξασφαλίζει ότι όχι περισσότερο από 5% της συνολικής παραγωγής είναι κάτω από τα καθορισμένα χαρακτηριστικά αντοχής).
- Διασφάλιση της συμμόρφωσης της παραγωγής με την απαιτούμενη χαρακτηριστική αντοχή
- Συμπερίληψη τακτικών ελέγχων για την αντοχή και την τυπική απόκλιση καθώς και αποκλίσεις από τις τιμές-στόχους
- Ανάλογα με την περίπτωση, περιλαμβάνει μία ή περισσότερες διαδικασίες για την επιτάχυνση της απόκρισης του συστήματος (π.χ. η χρήση πρώιμων δοκιμίων, χρήση τυποποιημένων οικογένειων)
- Καθορισμό και την εφαρμογή σαφών κανόνων για την απόφαση της συμμόρφωσης και των ορίων προειδοποίησης
- Να τεκμηριώνει πώς το σύστημα επιτυγχάνει μία μέγιστη μέση εξερχόμενη ποιότητα (AOQ) που δεν υπερβαίνει το 5,0% (εκτός αν χρησιμοποιείται κάποιος από τους κανόνες εφαρμογής που αναφέρονται στο ενημερωτικό παράρτημα του προτύπου EN 206-1)
- Όταν το διάγραμμα ελέγχου δείχνει ότι η τυπική απόκλιση είναι $\geq 0,5 \text{ N/mm}^2$ πάνω από την χρησιμοποιούμενη τιμή, να αλλάζει την τιμή που εφαρμόζεται.

2.11. Παραδείγματα Εφαρμογών της Μεθόδου CUSUM

2.11.1. Μίγμα Αναφοράς και Οικογένεια Σκυροδέματος

Το ακόλουθο παράδειγμα χρησιμοποιείται για να επιδείξει απλώς την χρήση και μεθοδολογία των διαγραμμάτων CUSUM εφαρμοσθείσα σε ένα εργοστάσιο σκυροδέματος που ελέγχει την παραγωγή, η οποία βασίζεται σε μια οικογένεια μιγμάτων, όπως είναι η κοινή πρακτική στο Ηνωμένο Βασίλειο.

Το σύστημα ελέγχου βασίζεται σε ένα σκυρόδεμα αναφοράς που περιγράφεται στον Πίνακα 8. Αυτό το σκυρόδεμα είναι αντιπροσωπευτικό του κύριου σκυροδέματος που παράγεται στο εργοστάσιο. Ο έλεγχος περιεκτικότητας σε τσιμέντο είναι το τρέχον μέτρο το οποίο χρησιμοποιεί η μέθοδος CUSUM ως αναγκαίο για την παραγωγή του στόχου αντοχής του σκυροδέματος αναφοράς. Σημειώστε ότι σκυρόδεμα με την ίδια κατηγορία αντοχής σε θλίψη, όπως το σκυρόδεμα αναφοράς θα μπορούσε να έχει παραχθεί με υψηλότερα περιεκτικότητες τσιμέντου από το σκυρόδεμα αναφοράς. Για παράδειγμα, οι απαιτήσεις των προδιαγραφών διάρκειας ζωής του σκυροδέματος μπορεί να δείξουν ότι ελάχιστη περιεκτικότητα σε τσιμέντο ή η περιεκτικότητα σε τσιμέντο θα πρέπει να ικανοποιούν καθορισμένη μέγιστη αναλογία w / c η οποία να είναι υψηλότερη από ότι προβλέπει η διεργασία CUSUM για το τσιμέντο αναφοράς. Το πώς αντιμετωπίζονται αυτά τα μίγματα έχει ήδη περιγραφεί στην παράγραφο 2.8.3.

Πίνακας 8: Αναφορές Λεπτομερειών Μίγματος

Compressive strength	C32/40
Aggregate size and type	20mm gravel
Cement Type	CEM III/A
Slump	70mm (S2)
Admixture	None
Control cement content	320 kg/m ³

Το περιεχόμενο τσιμέντο στο μίγμα του σκυροδέματος είναι αυτό που αναμένεται να δώσει τη αντοχή θραύσης - στόχου στο σκυρόδεμα αναφοράς. Δεν θα συμπεριληφθούν όλα τα σκυροδέματα στην οικογένεια των μιγμάτων που χρησιμοποιείται για να ελέγχει την κύρια παραγωγή. Οι παράμετροι της οικογένειας παρουσιάζονται στον Πίνακα 9.

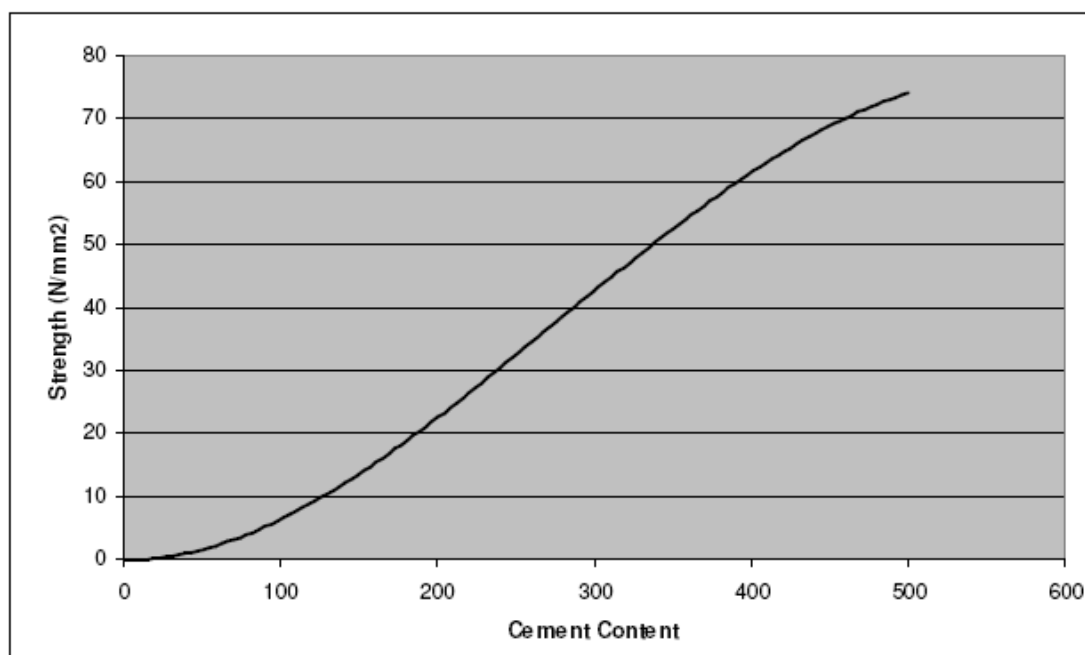
Πίνακας 9: Παράμετροι Οικογένειας

Compressive strength	C16/20 to C45/55 inclusive
Aggregate size and type	Gravel only 20mm or 10mm
Cement Type	CEM III/A only
Slump	25mm to 150mm inclusive
Admixture	With or without water reducing admixture

2.11.2. Κύρια Σχέση

Η κύρια σχέση που απαιτείται στην ανάλυση CUSUM είναι η βασική σχέση μεταξύ της περιεκτικότητας σε τσιμέντο και της αντοχής θραύσεως του σκυροδέματος (σχήμα 15), η οποία όχι μόνο επιτρέπει μίγματα να υπερτίθενται σε ένα ισοδύναμο με το σκυρόδεμα αναφοράς, αλλά επίσης χρησιμοποιείται για να καθορίσει το επίπεδο της διόρθωσης που θα πρέπει να εφαρμοστεί όταν το διάγραμμα CUSUM δείχνει ότι μια αλλαγή έχει συμβεί (βλ. 2.5.6).

Επιπρόσθετα στην κύρια σχέση, και άλλες σχέσεις είναι επίσης αναγκαίες για να καθοριστεί η επίδραση της περιεκτικότητας σε τσιμέντο στο συνολικό μέγεθος – όγκο, την κάμψη και την επίδραση των προσθετικών περιορισμού υγρασίας (Water Reducing Admixture - WRA). Αυτές οι επιδράσεις εκφράζονται ως προσαρμογές και αφορούν στην περιεκτικότητα σε τσιμέντο. Το μέγεθος αυτών των προσαρμογών συνήθως καθορίζεται σχετικά εύκολα από το εργαστήριο. Οι τιμές για την οικογένεια των μιγμάτων σε αυτό το παράδειγμα παρουσιάζονται στον Πίνακα 10. Οι προσαρμογές είναι εκείνες που απαιτούνται για τη μετατροπή του περιεχομένου τσιμέντου του ελεγχόμενου σκυροδέματος, σε ένα ισοδύναμης περιεκτικότητας τσιμέντο για την επίτευξη της κύριας αντοχής με βάση την κύρια φόρμουλα (Σχήμα 15). Για παράδειγμα, ένα πάχος σκυροδέματος της τάξης των 10 χιλιοστών θα πρέπει να έχει υψηλότερη περιεκτικότητα τσιμέντου από ό,τι ένα αντίστοιχο των 20mm. Το πάχος χρησιμοποιείται στην βασική σχέση και έτσι ένα σκυρόδεμα πάχους 10mm θα πρέπει να προσαρμοστεί μειώνοντας την περιεκτικότητα του σε τσιμέντο σε αυτό που θα ήταν εάν παραγόταν ένα σκυρόδεμα πάχους 20mm.



Εικόνα 15: Κύρια σχέση μεταξύ της περιεκτικότητας σε τσιμέντο και αντοχής θραύσεως

Table 10: Adjustments per cubic metre to convert the cement content of the tested concrete to a concrete on the main relationship^{A)}						
Adjustments where the tested concrete contained a WRA						
Cement content of tested concrete, kg/m ³	200 to 380		380+			
Adjustment to cement content, kg/m ³	+25 kg		At these higher cement contents it is more effective to use a superplasticizing admixture ^{B)} .			
Adjustments where the tested concrete contained 10mm maximum aggregate size ^{C)} .						
Cement content of tested concrete, kg/m ³	700 to 380		380+			
Adjustment to cement content, kg/m ³	-15		-10			
Adjustments where the tested concrete has a target slump that is not 70mm						
Target slump, mm	20 (S1)	50	70 (S2)	100	120 (S3)	150
Slump adjustment	+15 kg	+10 kg	0	-5 kg	-10 kg	-15 kg
^{A)} Numerically equal but opposite in sign (+ becomes -) adjustments are used in mix proportioning. ^{B)} As the following example does not need this adjustment for superplasticizer, a value is not given. ^{C)} As the following example does not include aggregates larger than 20mm, no adjustments are given.						

Εάν χρησιμοποιούνται προσθετικά υλικά αφύγρανσης WRA, η περιεκτικότητα σε τσιμέντο θα πρέπει να προσαρμοστεί προς τα πάνω. Στο παράδειγμα αυτό η προσθήκη WRA προστίθεται ως ένα σταθερό ποσοστό στη μάζα του τσιμέντου.

Μόλις αυτές οι αλλαγές έχουν γίνει για να ρυθμιστεί η πραγματική περιεκτικότητα σε τσιμέντο του δοκιμίου σκυροδέματος στην ισοδύναμη τιμή που προβλέπεται από την κύρια σχέση, μια δεύτερη προσαρμογή είναι αναγκαία για να διορθώσει περαιτέρω ότι η νέα περιεκτικότητα σε τσιμέντο είναι ίδια με εκείνη του δοκιμίου αναφοράς. Αυτή η ρύθμιση αντοχής είναι η διαφορά στην αντοχή της κύριας σχέσης μεταξύ της κύριας περιεκτικότητας τσιμέντου του σκυροδέματος που είναι υπό δοκιμή και του στόχου μέσης αντοχής του σκυροδέματος αναφοράς.

2.11.3. Εφαρμογή Διορθώσεων

Θεωρούμε τα παρακάτω σκυροδέματα για ένταξη στο σύστημα ελέγχου CUSUM

Μίγμα Αναφοράς 1

Σκυρόδεμα τύπου C25/30, 20 χιλιοστά πάχους με περιεχόμενο τσιμέντο τύπου CEM III / A, 100 χιλιοστά κάμψης χωρίς χρήση αφυγραντικών (WRA)

Το μίγμα παρήχθη με περιεκτικότητα τσιμέντου 275 kg/m^3 . Αυτό το μείγμα πληροί τα κριτήρια της οικογένειας που παρουσιάζεται στον Πίνακα 9.

Για να συσχετίσουμε το μίγμα με το σκυρόδεμα αναφοράς που περιγράφεται στον Πίνακα 8, το μίγμα πρέπει πρώτα να ρυθμιστεί ως προς το γεγονός ότι έχει καθοριστεί ως 100 χιλιοστά κάμψης και όχι 70 χιλιοστά. Ο πίνακας 10 δείχνει ότι για 100 χιλιοστά κάμψη θα πρέπει να γίνει προσαρμογή της τάξης των -5 kg/m^3 στην περιεκτικότητα του τσιμέντου. Η προσαρμογή είναι αρνητική καθώς πρόσθετο τσιμέντο θα πρέπει να προστεθεί στο μίγμα για να διατηρήσει την αναλογία νερού / τσιμέντου (w / c) καθώς η συνεκτικότητα έχει αυξηθεί από 70mm στα 100mm κάμψης.

Το προσαρμοσμένο περιεχόμενο τσιμέντο γίνεται: $275 - 5 = 270 \text{ kg/m}^3$.

Από την κύρια σχέση στο Σχήμα 15, θα περιμέναμε ένα σκυρόδεμα με περιεκτικότητα σε τσιμέντο 270 kg/m^3 να επιτυγχάνει μια αντοχή της τάξεως των 37.3 hN/mm^2 αλλά το σκυρόδεμα αναφοράς είναι τύπου C32/40. Καθώς το εργοστάσιο παραγωγής έχει μια τυπική απόκλιση της τάξης των 3.5 N/mm^2 και ένα περιθώριο σχεδιασμού της τάξης των $2.0 \times \sigma$, ο μέσος στόχος αντοχής του σκυροδέματος αναφοράς είναι 47 N/mm^2 . Η διαφορά του 9.7 N/mm^2 ($47 - 37,3 \text{ N/mm}^2$) στο σύστημα ελέγχου

CUSUM θα πρέπει να εισαχθεί για να υπερθέσει την αντοχή στα ισοδύναμα επίπεδα της περιεκτικότητας τσιμέντου για το μίγμα αναφοράς. Για παράδειγμα, στον Πίνακα 11 για το μίγμα αναφοράς 1, τα προβλεπόμενα και πραγματικά επίπεδα αντοχής για δοκίμια 28-ημερών είναι 42.5 N/mm^2 και $39,5 \text{ N/mm}^2$, αντιστοίχως. Μετά από προσαρμογή στις τιμές για ισοδύναμης περιεκτικότητας τσιμέντο του σκυροδέματος αναφοράς, αυτές καθίστανται 52.2 N/mm^2 ($42.5 + 9.7$) και 49.2 N/mm^2 και η αλλαγή στην μέθοδο CUSUM M είναι $52.2 - 47 = 5.2 \text{ N/mm}^2$ εάν χρησιμοποιηθεί η προβλεπόμενη αντοχή και $49.2 - 47 = 2.2 \text{ N/mm}^2$, όταν προβλεπόμενα δοκίμια 28-ημερών αντικαταστήσουν τα πραγματικά δοκίμια των 28-ημερών.

Στο παράδειγμα αυτό η χαμηλότερη κατηγορία αντοχής σε θλίψη του σκυροδέματος είναι η οικογένεια τύπου C16/20. Ωστόσο, αν μια οικογένεια επρόκειτο να συμπεριλάβει σκυρόδεμα με κλάσεις αντοχών μικρότερες του τύπου C16/20, δηλαδή ένας στόχος μέση αντοχής μικρότερης από 27 N/mm^2 , κάθε ένα από τα προηγούμενα αποτελέσματα θα έπρεπε να υπολογιστεί εκ νέου χρησιμοποιώντας την τυπική απόκλιση που λαμβάνεται από το Σχήμα 3.

Μίγμα Αναφοράς 2

Σκυρόδεμα τύπου C32/40, 20 χιλιοστά πάχους με τσιμέντο τύπου CEM III / A κάμψης 150 χιλιοστών με χρήση προσθετικών αφυγραντικών (WRA).

Το μίγμα παρήχθη με περιεκτικότητα τσιμέντου 310 kg/m^3 . Αυτό το μίγμα πληροί τα κριτήρια της οικογένειας στον Πίνακα 9.

Για να συσχετισθεί το μίγμα με το σκυρόδεμα αναφοράς που περιγράφεται στον Πίνακα 8, το μίγμα πρέπει πρώτα να προσαρμοστεί στο γεγονός ότι περιείχε πρόσθετα αφυγραντικά WRA και κατόπιν να ρυθμιστεί γιατί έχει καθοριστεί για 150 χιλιοστά κάμψη αντί των 70mm. Για τα προσθετικά αφύγρανσης WRA η περιεκτικότητα σε τσιμέντο για τον σκοπό της CUSUM θα πρέπει να αυξηθεί για να διορθώσει τη μείωση του νερού που οφείλεται στην προσθήκη του WRA. Για υψηλότερες τιμές κάμψης από ότι στην αναφορά, η προσαρμογή στην περιεκτικότητα σε τσιμέντο είναι αρνητικές.

Σύνολο προσαρμογών για την εφαρμογή είναι $25 - 15 = 10 \text{ kg/m}^3$ (από τον Πίνακα 10)

Η προσαρμοσζομενη περιεκτικότητα τσιμέντου γίνεται: $310 + 10 = 320 \text{ kg/m}^3$

Σημειώστε ότι όταν αναλαμβάνεται η διαμόρφωση της αναλογίας μίγματος, οι προσαρμογές από την κύρια σχέση έχουν πάντα το αντίθετο πρόσημο, αλλά την ίδια αριθμητική τιμή.

Η δεύτερη ρύθμιση είναι να διορθώσει την καταγεγραμμένη αντοχή της αυξημένης περιεκτικότητας τσιμέντου στην αντοχή που αντιστοιχεί σε περιεκτικότητα τσιμέντου του μίγματος αναφοράς. Από την κύρια σχέση στο σχήμα 15, περιεκτικότητα τσιμέντου της τάξης των 320 kg/m^3 αναμένεται να επιτύχει αντοχή της τάξης των 46.8 hN/mm^2 αλλά το σκυρόδεμα αναφοράς είναι τύπου C32/40. Καθώς το εργοστάσιο παραγωγής έχει μια τρέχουσα τυπική απόκλιση της τάξης των 3.5 N/mm^2 και ένα σχεδιαστικό περιθώριο της τάξης των $2.0 \times \sigma$, ο στόχος της μέσης αντοχής για το σκυρόδεμα αναφοράς είναι 47 N/mm^2 , μία διαφορά της τάξης των 0.2 N/mm^2 , η οποία είναι η προσαρμογή που θα γίνει με τις προβλεπόμενες και τις πραγματικές αντοχές για δοκίμια κύβου του συστήματος CUSUM.

Μίγμα Αναφοράς 3

Σκυρόδεμα τύπου C32/40, 20 χιλιοστά πάχους με τσιμέντο τύπου CEM III / A και κάμψη 70mm χωρίς προσθετικά αφυγραντικά (WRA).

Το μίγμα παρήχθη με περιεκτικότητα τσιμέντου 320 kg/m^3 . Αυτό το μίγμα αποτελεί το σκυρόδεμα αναφοράς και όπως αυτό προσαρτήθηκε στον έλεγχο, το μίγμα δεν χρειάζεται περαιτέρω ρυθμίσεις.

Αυτά αποτελούν τα 3 πρώτα σκυροδέματα που περιλαμβάνονται στον Πίνακας 11.

2.11.4. Υπολογισμός CUSUM

Μόλις οι προσαρμογές έχουν γίνει και η αναφερόμενη σε δοκίμια 28 ημερών αντοχή θραύσεως έχει υπολογιστεί, τα δεδομένα μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε οποιοδήποτε σύστημα ελέγχου (π.χ. τύπου CUSUM ή Shewhart). Το ακόλουθο παράδειγμα αναλύει τα δεδομένα με τεχνικές CUSUM. Το σύστημα βασίζεται σε ένα διάγραμμα CUSUM που εφαρμόζεται στην μέση (CUSUM M), στην τυπική απόκλιση (CUSUM R) και στην αυτοσυσχέτιση (CUSUM C). Για λόγους ελέγχου, τα μίγματα περιλαμβάνουν ένα προκαθορισμένο σκυρόδεμα (τύπου P300, με αναφορά σε 13 δείγματα) και ένα ονομαστικό μίγμα (1:02:04, με αναφορά σε 14 δείγματα).

Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στα διαγράμματα CUSUM και η τεχνικής της V-μάσκας τοποθετείται ξεχωριστά σε κάθε αποτέλεσμα. Αυτό το μη αυτοματοποιημένο σύστημα χρησιμοποιείται για να επεξηγηθούν οι βασικές αρχές των τεχνικών CUSUM.

Σαφώς, αυτή η διαδικασία θα μπορούσε κανονικά να εκτελείται αυτοματοποιημένα στον
Οι εκτεταμένες χρήσεις του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών στον τομέα της Δομοστατικής

υπολογιστή ,είτε μέσω ενός υπολογιστικού φύλλου ανάλυσης δεδομένων (spreadsheet), ή μέσω ενός εμπορικά διαθέσιμου προγράμματος για ανάλυση CUSUM είτε ενός ειδικά ανεπτυγμένου προγράμματος στα πλαίσια της ίδιας της εταιρείας.

Η τρέχουσα τυπική απόκλιση του εργοστασίου παραγωγής θεωρείται της τάξης των 3.5 N/mm² το οποίο δίνει ένα περιθώριο απόκλισης από την αντοχή – στόχο της τάξης των (1.128 x 3.5) = 3.9 N/mm² (βλέπε 2,2,3). Το περιθώριο είναι 2.0 x σ. Η αντοχή στόχος του σκυροδέματος αναφοράς, με δοκίμιο σε μορφή κύβου, είναι (40 + (2,0 x 3,5)) = 47 N/mm².

Από τα 3 διαγράμματα που παρουσιάζονται στα σχ. 16, 17 και 18, μπορεί να φανεί ότι η αυτοσυσχέτιση και η τυπική απόκλιση της παραγωγής βρίσκονται εντός ελέγχου, αλλά υπάρχει μια αλλαγή στη μέση τιμή του τρίτου διαγράμματος από το σημείο 7 στο σημείο 17. Αυτό αποτελεί απόδειξη ότι η τρέχουσα περιεκτικότητα σε τσιμέντο των 320 kg/m³ δεν δίνει το απαιτούμενο μέσο όριο αντοχής θραύσεως των 47 N/mm². Καθώς ο άνω βραχίονας της V-μάσκας διασχίζει τις τιμές του διαγράμματος, αυτό δείχνει ότι η προκύπτουσα μέση αντοχή θραύσεως είναι χαμηλότερη από την αντοχή στόχο. Οι αναλογίες μίγματος προσαρμόζονται άμεσα (βλ. 2.11.5) και το διάγραμμα CUSUM στο σημείο αυτό αρχικοποιείται στο μηδέν. Σημειώστε ότι αυτή η αλλαγή έχει γίνει επί τη βάση ενός συνόλου δοκιμών σκυροδέματος των 28 ημερών (σημεία 1 έως 16) και ανηγμένη συμπεριφορά 28 ημερών από πρώιμα δοκίμια (σημείο 17).

Table 11: CUSUM calculation

Mix description (all CEM III/A)										Results			Adjustments							CUSUM M			CUSUM R			CUSUM C	
Mix reference	Strength class	Aggregate size	Target slump	Plasticiser	Batched cement content	Actual 7 day	Predicted 28 day	Actual 28 day	Total cement adjustment	Adjusted cement content	Cement/Strength Code	Expected strength	Reference strength	Target strength	Strength adjustment	From predicted	From actual	Adjusted strength	Difference from target	CUSUM M	Range	Target Range	Difference from target	CUSUM R	Actual – predicted 28 day	CUSUM C	
CURRENT STANDARD DEVIATION = 3,5 N/mm ² ; TARGET RANGE = 1,128 x 3,5 = 3,9 N/mm ²																											
1	C25/30	20	100	No	275	31.1	42.5	39.5	-5	270	A	37.3	40	47	9.7		49.2	49.2	2.2	2.2					-3.0	-3.0	
2	C32/40	20	150	Yes	310	33.8	45.3	46.3	10	320	A	46.8	40	47	0.2		46.5	46.5	-0.5	1.7	2.7	3.9	-1.2	-1.2	1.0	-2.0	
3	C32/40	20	70	No	320	35.2	46.8	46.8	0	320	A	46.8	40	47	0.2		47.0	47.0	0.0	1.7	0.5	3.9	-3.4	-4.6	0.0	-2.0	
4	C32/40	20	70	No	320	37.2	48.8	49.3	0	320	A	46.8	40	47	0.2		49.5	49.5	2.5	4.2	2.5	3.9	-1.4	-6.0	0.5	-1.5	
5	C25/30	20	70	Yes	245	26.7	37.5	39.5	25	270	A	37.3	40	47	9.7		49.2	49.2	2.2	6.4	0.3	3.9	-3.6	-9.6	2.0	0.5	
6	C32/40	20	150	Yes	310	41.5	52.8	53.8	10	320	A	46.8	40	47	0.2		54.0	54.0	7.0	13.4	4.8	3.9	0.9	-8.7	1.0	1.5	
7	C32/40	20	70	No	320	42.6	53.8	53.3	0	320	A	46.8	40	47	0.2		53.5	53.5	6.5	19.9	0.5	3.9	-3.4	-	-0.5	1.0	
8	C28/35	20	50	No	285	28.2	39.2	39.2	10	295	A	42.1	40	47	4.9		44.1	44.1	-2.9	17.0	9.4	3.9	5.5	-6.6	0.0	1.0	
9	C28/35	20	50	No	285	30.9	42.2	40.7	10	295	A	42.1	40	47	4.9		45.6	45.6	-1.4	15.6	1.5	3.9	-2.4	-9.0	-1.5	-0.5	
10	C40/50	20	120	Yes	360	40.4	51.8	48.8	15	375	A	57.3	40	47	-		38.5	38.5	-8.5	7.1	7.1	3.9	3.2	-5.8	-3.0	-3.5	
11	C25/30	20	100	No	275	27.6	38.6	40.5	-5	270	A	37.3	40	47	9.7		50.2	50.2	3.2	10.3	11.7	3.9	7.8	2.0	1.9	-1.6	
12	C25/30	20	70	Yes	245	24.1	34.5	35.0	25	270	A	37.3	40	47	9.7		44.7	44.7	-2.3	8.0	5.5	3.9	1.6	3.6	0.5	-1.1	
13	P300	20	150	Yes	300	26.2	36.9	37.4	10	310	A	44.9	40	47	2.1		39.5	39.5	-7.5	0.5	5.2	3.9	1.3	4.9	0.5	-0.6	
14	1:2:4	20	70	No	270	27.6	38.6	37.6	0	270	A	37.3	40	47	9.7		47.3	47.3	0.3	0.8	7.8	3.9	3.9	8.8	-1.0	-1.6	
15	C40/50	20	120	Yes	360	38.3	49.8	47.3	15	375	A	57.3	40	47	-		37.0	37.0	-	-9.2	10.3	3.9	6.4	15.2	-2.5	-4.1	
16	C40/50	20	120	Yes	360	41.5	52.8	53.8	15	375	A	57.3	40	47	-		43.5	43.5	-3.5	-	6.5	3.9	2.6	17.8	1.0	-3.1	
17	C25/30	20	100	No	275	21.7	31.5		-5	270	A	37.3	40	47	9.7	41.2		41.2	-5.8	-	2.3	3.9	-1.6	16.2			
TARGET STRENGTH NOT BEING ACHIEVED; CEMENT CONTENT INCREASED; CUSUM M RESET TO ZERO																											

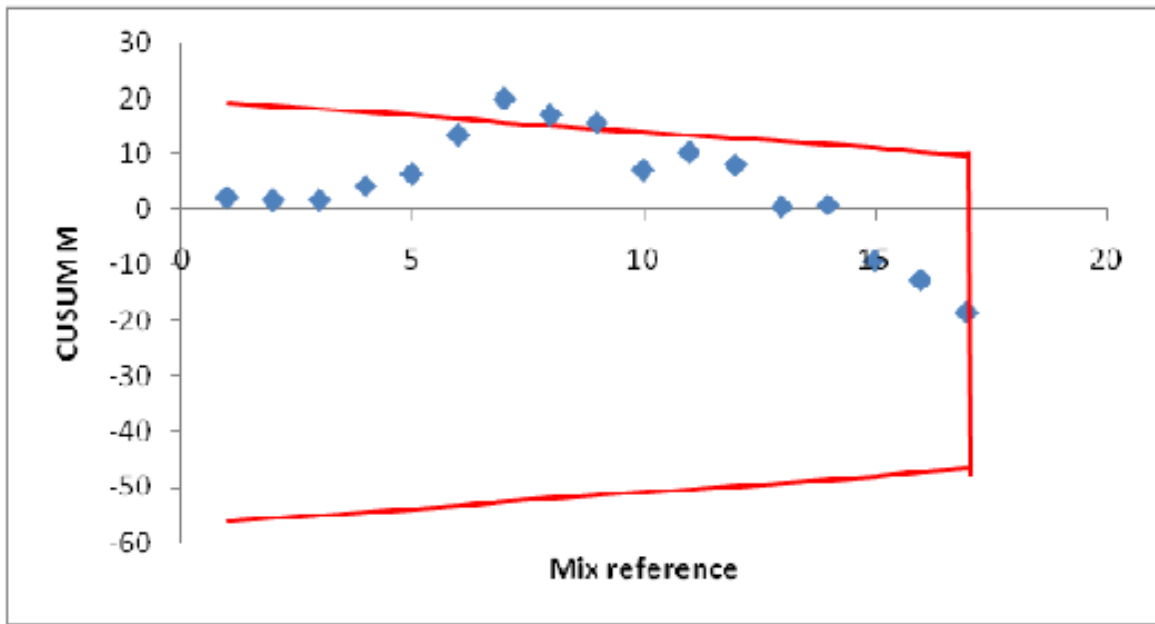


Figure 16: CUSUM M

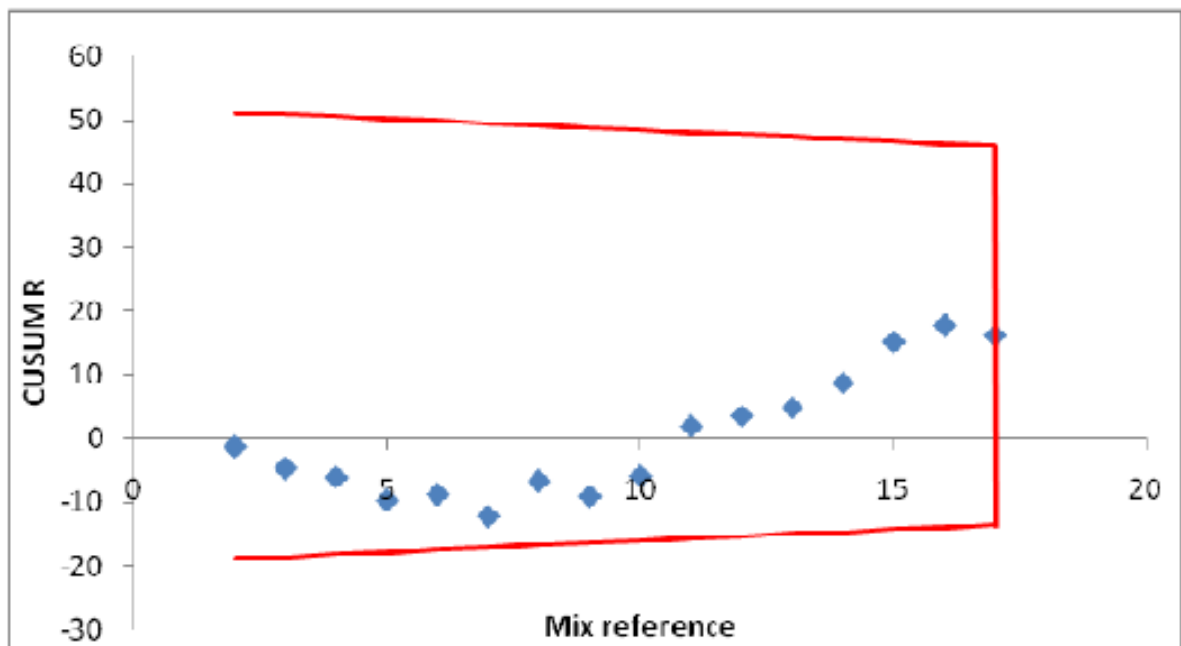


Figure 17: CUSUM R

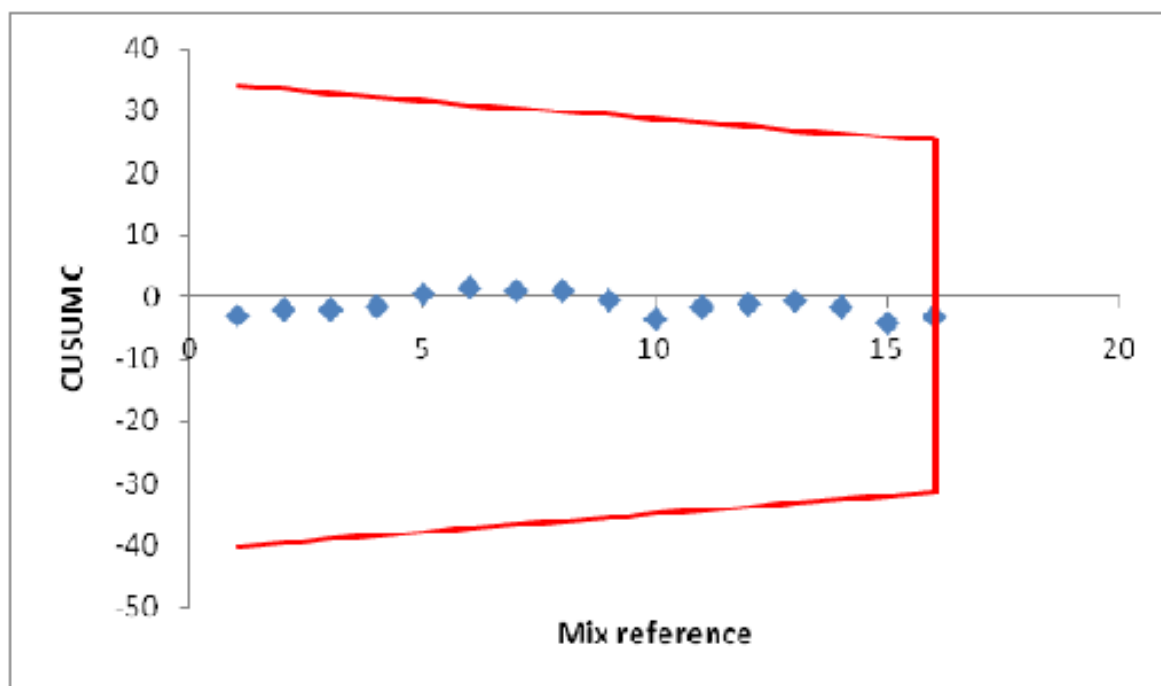


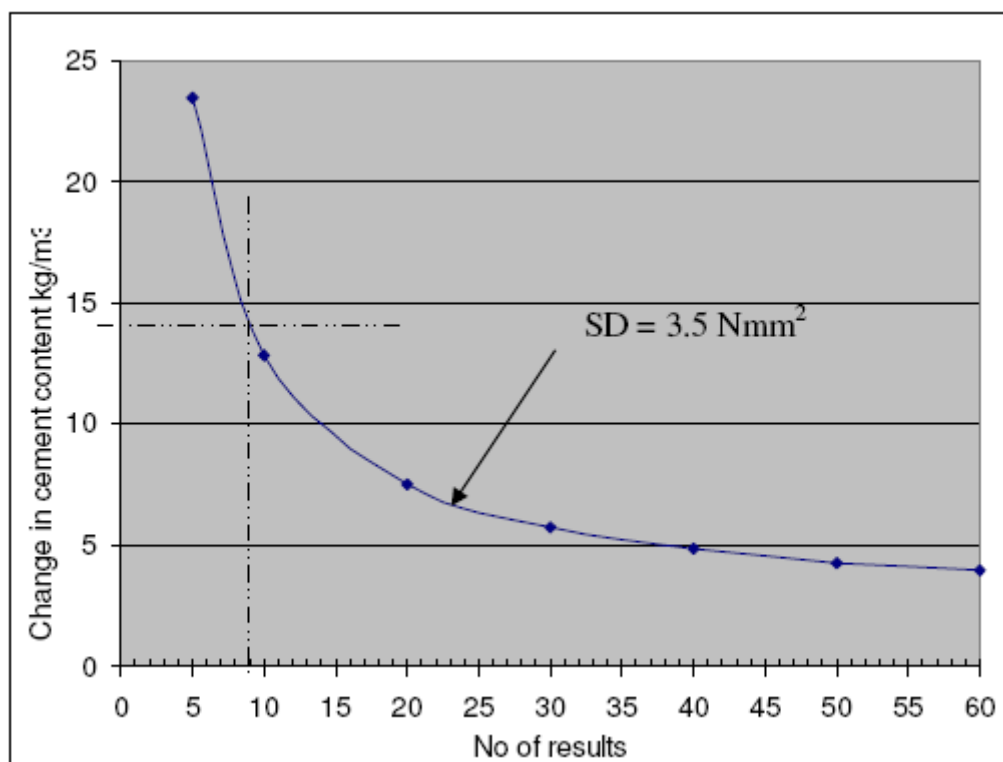
Figure 18: CUSUM C

2.11.5. Ενέργειες συστημάτων CUSUM μετά από αλλαγές

Το διάγραμμα CUSUM M έδειξε ότι υπάρχει μια πτώση στην απόδοση του συστήματος. Συνεπώς για να φέρουμε τη διαδικασία πίσω σε κατάσταση ελέγχου, είναι αναγκαίο να αυξηθεί η περιεκτικότητα σε τσιμέντο. Το μέγεθος της αύξησης στην κονία περιεχομένου είναι μια συνάρτηση της τυπικής απόκλισης του εργοστασίου παραγωγής, καθώς και ο αριθμός των αποτελεσμάτων για τα οποία διαπιστώθηκε η μεταβολή (βλ. 2.5.6).

Σε αυτή την περίπτωση, η τυπική απόκλιση του εργοστασίου παραγωγής είναι 3.5 N/mm^2 και η μεταβολή συνέβη στο μίγμα αναφοράς 7, αλλά το διάγραμμα CUSUM M μέσω της V-μάσκας διασχίζει το διάγραμμα στο σημείο μίγματος αναφοράς 9 εντοπίζοντας μια αλλαγή για πάνω από 9 αποτελέσματα. Από το σχήμα 19 μπορούμε να δούμε ότι η μεταβολή αυτή συνίσταται σε μία αλλαγή στην περιεκτικότητα τσιμέντου της τάξης των 14 kg/m^3 . Για απλότητα, αυτό θα μπορούσε να στρογγυλευθεί σε 15 kg/m^3 και συνεπώς η περιεκτικότητα σε τσιμέντο του σκυροδέματος αναφοράς θα αυξηθεί από 320 σε 335 kg/m^3 .

Μια νέα κύρια σχέση θα πρέπει να δημιουργηθεί η οποία συσχετίζει την περιεκτικότητα σε τσιμέντο των 335 kg/m^3 για μια χαρακτηριστική αντοχή 40 N/mm^2 (με στόχο αντοχής θραύσεως των 47 N/mm^2). Ο Πίνακας 12 επικεντρώνει στα στοιχεία του πίνακα 13, αυτό μπορεί να θεωρηθεί ως μια αλλαγή στην κωδικοποίηση τσιμέντου / αντοχή από το σημείο Α στο Β. Τα συστατικά του σκυροδέματος που χρησιμοποιούνται στο εργοστάσιο παραγωγής θα μπορούσαν άμεσα να αυξηθούν κατά τα ποσοστά που προκύπτουν από τη νέα κύρια σχέση. Η αλλαγμένη κύρια σχέση θα οδηγήσει επίσης σε αναθεωρημένες προσαρμογές που εφαρμόζονται για να προκύψει η προβλεπόμενη αντοχή του σκυροδέματος αναφοράς (σε δοκίμια κύβου). Αυτές οι προσαρμογές εφαρμόζονται από το αποτέλεσμα 18 και μετά (Πίνακας 13). Αυτές οι προσαρμογές επίσης θα εφαρμοστούν στα νέα μίγματα, αλλά θα υπάρχει μια περίοδος όπου το σκυρόδεμα έχει ήδη παγιοποιηθεί σε μία περιεκτικότητα τσιμέντου η οποία ώρα γνωρίζουμε ότι είναι χαμηλότερη από ότι ήταν αναγκαίο. Εντούτοις, για τον έλεγχο της μέσης αντοχής, το μίγμα από το στοιχείο 18 και μετά ρυθμίζεται σε μια νέα περιεκτικότητα τσιμέντου του σκυροδέματος αναφοράς (περιεκτικότητα τσιμέντου 335 kg/m^3).



Εικόνα 19: Μεταβολή της αντοχής συναρτήσει των δοκιμών

Cube strength N/mm ²	Cement content, kg/m ³ , for cement/strength codes		Cube strength N/mm ²	Cement content, kg/m ³ , for cement/strength codes	
	A	B		A	B
20	180.0	195.0	41	290.0	305.0
21	185.0	200.0	42	295.0	310.0
22	190.0	205.0	43	300.0	315.0
23	195.0	210.0	44	305.0	320.0
24	200.0	215.0	45	310.0	325.0
25	205.0	220.0	46	315.0	330.0
26	210.0	225.0	47	320.0	335.0
27	215.0	230.0	48	325.0	340.0
28	220.0	235.0	49	330.0	345.0
29	225.0	240.0	50	335.0	355.0
30	230.0	245.0	51	340.0	360.0
31	235.0	255.0	52	345.0	365.0
32	240.0	260.0	53	355.0	370.0
33	245.0	265.0	54	360.0	375.0
34	255.0	270.0	55	365.0	380.0
35	260.0	275.0	56	370.0	385.0
36	265.0	280.0	57	375.0	390.0
37	270.0	285.0	58	380.0	395.0
38	275.0	290.0	59	385.0	400.0
39	280.0	295.0	60	390.0	405.0
40	285.0	300.0			

2.11.6. Δεδομένα και αλλαγές στην τυπική απόκλιση

Ο πίνακας 13 είναι η συνέχιση των υπολογισμών της μεθόδου CUSUM με πρόσθετα δεδομένα. Κατά την περίοδο αυτή δεν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα που αφορούν πραγματικά δοκίμια των 28 ημερών. Τα διαγράμματα CUSUM με τα συμπληρωματικά δεδομένα εμφανίζονται στα Σχήματα 20 έως 22.

Ακολουθώντας την αλλαγή στην περιεκτικότητα σε τσιμέντο για την επίτευξη του στόχου αντοχής, το δείγμα 18, που ανήκει σε τύπο σκυροδέματος C32/40 κάμψης 70 χιλιοστών, το οποίο ξεπερνά την περιεκτικότητα τσιμέντου αναφοράς και γι'αυτό δεν απαιτούνται περαιτέρω διορθώσεις στο μίγμα (Βλέπε Πίνακα 11, δείγματα 3, 4 και 7). Ωστόσο, η περιεκτικότητα σε τσιμέντο έχει τώρα αυξηθεί σε 335 kg/m³. Δεδομένου ότι το μίγμα ήταν παγιοποιημένο σε περιεκτικότητα σε 320 kg/m³ πριν την εφαρμογή της μεθόδου CUSUM M, η οποία ανίχνευσε την ανάγκη για μια αλλαγή, επομένως μια προσαρμογή από τη νέα κύρια σχέση πρέπει να εφαρμοστεί.

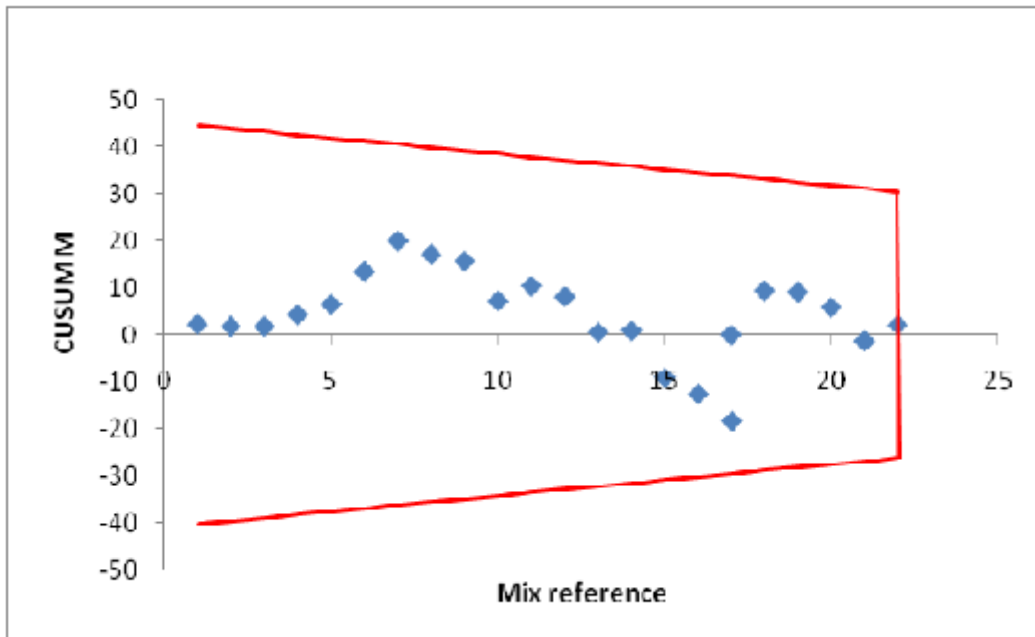
Το ίδιο σκυρόδεμα παγιοποιημένο σε συστατικά στο δείγμα 22, απαιτεί την ανάγκη αλλαγής περιεκτικότητας σε τσιμέντο, θέλοντας να ρυθμίσει την μέση αντοχή και την τυπική απόκλιση του. Για το λόγο αυτό δεν υπάρχει καμία ρύθμιση που θα πρέπει να γίνει στην περιεκτικότητα τσιμέντου, διότι τώρα είναι 340 kg/m³ (320 +15 +5) (+15 kg/m³ επιβάλλεται από την αλλαγή στην κύρια σχέση και 5 kg/m³ το οποίο επιβάλλεται από την αύξηση στην τυπική απόκλιση, βλ. Πίνακα 12).

Το εύρος πάνω στην προσαρμογή για τα δείγματα 17 και 18 σε θλιπτική αντοχή είναι μεγάλο $(56,3 - 41,2) = 15,1 \text{ N/mm}^2$. Τα αποτελέσματα αμέσως πριν και μετά την αλλαγή της μέσης αντοχής διορθώνονται σε διαφορετικές κύριες σχέσεις οι οποίες θα αυξήσουν την μεταβλητότητα. Κατά συνέπεια, μια τροποποίηση πρέπει να γίνει με το αποτέλεσμα αμέσως πριν από την αλλαγή της μέση αντοχής, ώστε να μην εισαγάγει την υπερβολική διακύμανση του διαγράμματος CUSUM R. Το αποτέλεσμα πριν από την αλλαγή της μέσης αντοχής ρυθμίζεται χρησιμοποιώντας τη νέα κύρια σχέση μόνο για τους υπολογισμούς που αφορούν σε αυτό το διάστημα. Από τη νέα κύρια σχέση η αναμενόμενη αντοχή είναι 44.2 N/mm^2 και αυτό μειώνει το ευρος από 15.1 έως 12.1 N/mm^2 .

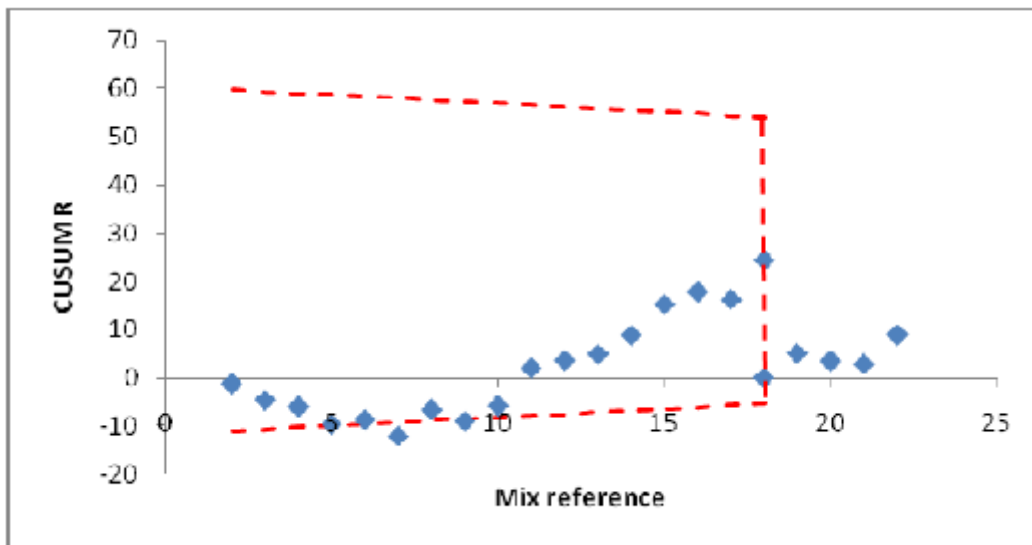
Μετά το δοκίμιο 18, μια μεταβολή στην τυπική απόκλιση του εργοστασίου παραγωγής, έχει επίσης ανιχνευθεί, βλέπε σχήμα 21. Μια νέα τυπική απόκλιση πρέπει να υπολογιστεί από το μέσο τρέχον ευρος. Το μέσο εύρος είναι 5.3 N/mm^2 και η νέα τυπική απόκλιση είναι 4.7 N/mm^2 ($5.3/1.128$). Για να αποφευχθεί η υπερβολική διόρθωση, θα πρέπει να ληφθεί η απόφαση να αλλάξει η τυπική απόκλιση σε $4,0 \text{ N/mm}^2$. Το περιθώριο αυξήθηκε στο $1.96 \times 4.0 = 7.8 \text{ N/mm}^2$ που στρογγυλοποιείται σε 8 N/mm^2 . Μία αύξηση κατά 1 N/mm^2 του περιθωρίου αντοχής απαιτεί μια αύξηση 5 kg/m^3 στη περιεκτικότητα του τσιμέντου, βλ. Πίνακα 12. Για τον λόγο αυτό η περιεκτικότητα του τσιμέντου αμέσως αυξάνεται από 335 kg/m^3 σε 340 kg/m^3 . Η σχέση αντοχής / τσιμέντου παραμένει αμετάβλητη (σχέση B). Αυτό που έχει αλλάξει είναι ο στόχος αντοχή του σκυροδέματος αναφοράς από 47 έως 48 N/mm^2 .

Πίνακας 13: Πίνακας CUSUM συνέχεια

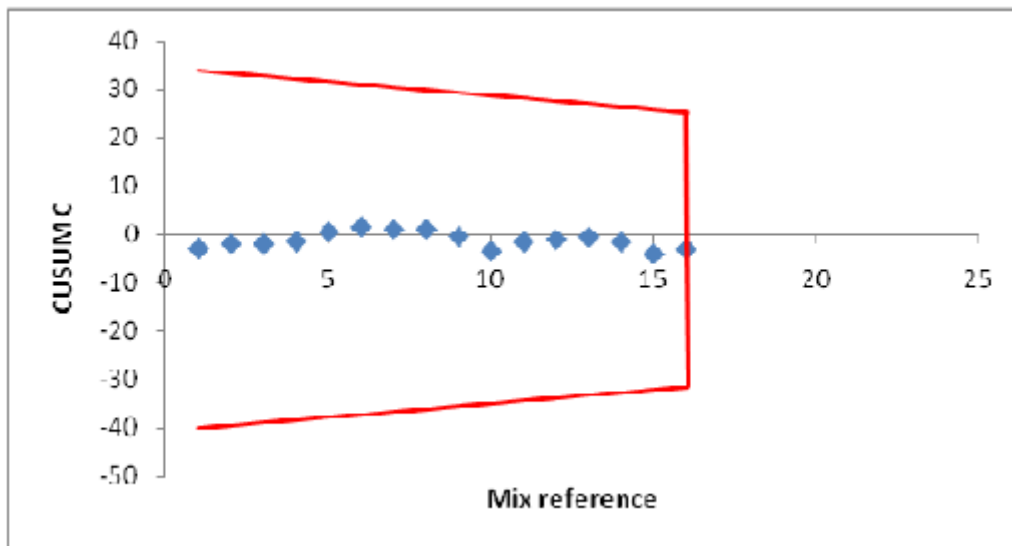
Mix description (all CEM III/A)					Results			Adjustments							CUSUM M		CUSUM R			CUSUM C							
Mix reference	Strength class	Aggregate size	Target slump	Plasticiser	Batched cement content	Actual 7 day	Predicted 28 day	Actual 28 day	Total cement adjustment	Adjusted cement content	Cement/Strength Code	Expected strength	Reference strength	Target strength	Strength adjustment	From predicted	From actual	Adjusted strength	Difference from target	CUSUM M	Range	Target Range	Difference from Target	CUSUM R	Actual - predicted 28 day	CUSUM C	
16	C40/50	20	120	Yes	360	41.5	52.8	53.8	15	375	A	57.3	40	47	-	-	43.5	43.5	-3.5	-	6.5	3.9	2.6	17.8	1.0	-3.1	
17	C25/30	20	100	No	275	21.7	31.5		-5	270	A	37.3	40	47	10.3	41.2		41.2	-5.8	12.7	2.3	3.9	-	16.2			
TARGET STRENGTH NOT BEING ACHIEVED; CEMENT CONTENT INCREASED; CUSUM M RESET TO ZERO																											
17	Adjusted					21.7	31.5			270	B	34.3	40	47	12.7	44.2		44.2	0.0					16.2			
18	C32/40	20	70	No	320	41.8	53.1		0	320	B	43.8	40	47	3.2	56.3		56.3	9.3	9.3	12.1	3.9	8.2	24.4			
STANDARD DEVIATION INCREASED TO 4,0 N/mm ² ; TARGET STRENGTH INCREASED TO 48 N/mm ² ; TARGET RANGE INCREASED TO 4,5 N/mm ² ; CEMENT CONTENT INCREASED																											
18	Adjusted					41.8	53.1			320	B	43.8	40	48	4.2	57.3		57.3	9.3						0.0		
19	C25/30	20	100	No	290	26.2	36.9		-5	285	B	37.2	40	48	10.8	47.7		47.7	-0.3	9.0	9.6	4.5	5.1	5.1			
20	C28/35	20	50	No	305	28.6	39.7		10	315	B	42.9	40	48	5.1	44.8		44.8	-3.2	5.8	2.9	4.5	-	3.5			
21	P300	20	150	Yes	300	24.4	34.8		10	310	B	41.9	40	48	6.1	40.9		40.9	-7.1	-1.3	3.9	4.5	-	2.9			
22	C32/40	20	70	No	340	39.5	51.0		0	340	B	47.6	40	48	0.4	51.4		51.4	3.4	2.1	10.5	4.5	6.0	8.9			



Σχήμα 20: CUSUM M με πρόσθετα δεδομένα



Σχήμα 21: CUSUM R με πρόσθετα δεδομένα



Σχήμα 22: CUSUM C με πρόσθετα δεδομένα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Η τεχνική του συσσωρευμένου αθροίσματος προσαρμοσμένου κινδύνου (Risk Adjusted CUSUM – RACUSUM) για την εντός ελέγχου (on-line) παρακολούθηση της αντοχής θραύσεως για μονάδες παραγωγής σκυροδέματος

3.1. Εισαγωγή

Η διαδικασία του συσσωρευμένου αθροίσματος (RACUSUM) όπως θα παρουσιασθεί και στο παρόν κεφάλαιο, είναι ένα αποτελεσματικό εργαλείο ελέγχου της στατιστικής διαδικασίας, που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της ποιότητας του ετοιμού σκυροδέματος (Ready Mixed Concrete - RMC) κατά τη διάρκεια της διαδικασίας παραγωγής του. Η διασυνεχής (On-line) παρακολούθηση της ποιότητας αναφέρεται στην παρακολούθηση της ποιότητας του σκυροδέματος στο εργοστάσιο κατά τη διαδικασία παραγωγής του.

Το υλικό του παρόντος κεφαλαίου καθώς και η μεθοδολογία εφαρμογής της εν λόγω τεχνικής Σ.Ε.Δ, βασίζεται στην εργασία των Sarkar και Dutta et al, η οποία επικεντρώνεται στην ανάπτυξη και εφαρμογή μιας νέας διαδικασίας CUSUM για τη βιομηχανία ετοιμού σκυροδέματος. Η αναφερόμενη διαδικασία χρησιμοποιεί την συμπερίληψη των κινδύνων που εμπλέκονται και σχετίζονται με την παραγωγή του σκυροδέματος, φροντίζοντας η επίδραση τους να ληφθεί υπόψη στην ανάπτυξη και εφαρμογή της τεχνικής.

Η νέα αυτή διαδικασία θα μπορούσε να χαρακτηριστεί ως (Risked Adjusted CUSUM - RACUSUM) δηλ. ως «διαδικασία συσσωρευμένου αθροίσματος προσαρμοζόμενη στους κινδύνους παραγωγής». Η συγκεκριμένη μέθοδος θα δώσει έμφαση στην παραγωγή και τον έλεγχο διαγραμμάτων CUSUM, τα οποία σχετίζονται με

την αντοχή θραύσεως του σκυροδέματος, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι η μέθοδος αυτή δεν θα μπορούσε να είναι εφαρμόσιμη/επεκτάσιμη και σε άλλους τύπους διαγραμμάτων ελέγχων που σχετίζονται με το υπόλοιπο σύνολο των μεταβλητών παραγωγής σκυροδέματος (π.χ. αναλογία w/c στο μίγμα).

Τα χαρακτηριστικά αντοχής του σκυροδέματος αναφέρονται συνήθως σε δοκίμια στην μορφή κύβων ή κυλίνδρων, ωρίμανσης έως και 28 ημερών. Οι μετρήσεις από αυτά μέσω της εφαρμογής μετρήσεων αντοχής στην θραύση, καθώς και άλλες συγκεκριμένες και λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με την παραγωγική διαδικασία και τους κινδύνους που σχετίζονται με την παραγωγή του RMC, συλλέχθηκαν από εργοστασιακές μονάδες (plants) στις περιοχές γύρω από το Αχμενταμπάντ (Δελχί /Ινδία). Οι κίνδυνοι που αναφέρονται στην παραγωγική διαδικασία, ποσοτικοποιούνται με τη χρήση μιας παραμέτρου πιθανότητας που βασίζεται σε μία μέθοδο κατάταξης και βαθμολόγησης των κινδύνων της παραγωγής.

Πρέπει να καταστεί εμφανές, ότι το μοντέλο «προσαρμοσμένου κινδύνου CUSUM» αναπτύχθηκε από την επιβολή σταθμισμένης βαθμολόγησης των εκτιμώμενων κινδύνων βασισμένο στο συμβατικό διάγραμμα CUSUM. Το μοντέλο που προκύπτει μέσα από την παραπάνω διαδικασία, είναι ένα πιο αποτελεσματικό και ρεαλιστικό εργαλείο για την παρακολούθηση της αντοχής της RMC.

3.2. Λεπτομέρειες και Μεθοδολογία εφαρμογής

Το συσσωρευμένο άθροισμα (CUSUM) είναι μια σημαντική στατιστική τεχνική ελέγχου της διαδικασίας παραγωγής, για την παρακολούθηση και την ανάλυση των αντοχών ετοιμού σκυροδέματος. Η αντοχή σε θλίψη του σκυροδέματος σε μορφή δοκιμίων σχήματος κύβων, κάνει χρήση δοκιμίων ωρίμανσης των 3, 7 και 28 ημέρων. Στην πράξη η μέθοδος CUSUM κάνει χρήση του συσσωρευμένου αθροίσματος των αποκλίσεων της πραγματικής αντοχής σε θραύση των δοκιμίων, σε σχέση με την επιθυμητή μέση αντοχή για τον εν λόγω τύπο του σκυροδέματος (όπως αυτή καθορίζεται από τον τύπο, τα πρότυπα και τις προδιαγραφές του εργοστασίου). Για να εφαρμόσουμε την τεχνική του διαγράμματος CUSUM στη βιομηχανία RMC, οι υπεύθυνοι χειριστές του συστήματος παρακολούθησης του εργοστασίου, θα πρέπει να συγκρίνουν τα αποτελέσματα των δοκιμών της παραγωγής με τις επιθυμητές τιμές και να ελέγχουν κατά πόσον είναι σύμφωνες με τα απαιτούμενα επίπεδα συμμόρφωσης. Κατά την εφαρμογή αυτής της τεχνικής, η επιθυμητή μέση αντοχή αφαιρείται από κάθε μία από τις παρατηρήσεις (που προκύπτουν από την θραύση κάθε δείγματος), παρέχοντας θετικές και αρνητικές διαφορές. Αυτές οι διαφορές προστίθενται «συσσωρευτικά» για να ληφθεί η τρέχουσα τιμή της μεθόδου CUSUM για την αντοχή θραύσεως του σκυροδέματος. Όταν αυτό το συσσωρευμένο άθροισμα χαράσσεται γραφικώς έναντι της αλληλουχίας των αποτελεσμάτων δοκιμής, παράγεται μία οπτικοποιημένη παρουσίαση της «τάσης» των δοκιμών, σε σχέση με το επιθυμητο επίπεδο αντοχής. Αυτή η συμβατική αναπαράσταση του διαγράμματος CUSUM δεν λαμβάνει καθόλου υπόψην της, τους λειτουργικούς κινδύνους κατά τη διάρκεια της παραγωγής του RMC στο εργοστάσιο.

Η μετεξέλιξη της μεθόδου CUSUM, στην RACUSUM βασίζεται στην βιβλιογραφική έρευνα, η οποία περιλαμβάνει τη διαθέσιμη βιβλιογραφία σχετικά με το CUSUM και άλλες στενά συνδεδεμένες τεχνικές Σ.Ε.Δ. κατά τα τελευταία είκοσι χρόνια. Η μέθοδος ασχολείται επίσης με το εννοιολογικό πλαίσιο για την ανάπτυξη του κινδύνου προσαρμοσμένου μοντέλου CUSUM.

Στην συνέχεια του κεφαλαίου, τα προκύπτοντα αποτελέσματα από την μέθοδο RACUSUM θα συγκριθούν με τα αντίστοιχα παραγόμενα αποτελέσματα από την κλασσική εφαρμογή της μεθόδου CUSUM για την παραγωγή σκυροδέματος. Στο τέλος του παρόντος κεφαλαίου θα προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα που συνάγονται από αυτήν την τεχνική Σ.Ε.Δ και, αφορούν επίσης, στην επέκταση και σε άλλα σχετιζόμενα πεδία για περαιτέρω έρευνα σε αυτόν τον τομέα.

3.3. Η μέθοδος CUSUM και οι ιστορικές απόπειρες «εμπλουτισμού» και «ενίσχυσης» των αποτελεσμάτων της

Τα τελευταία είκοσι χρόνια αρκετές ερευνητικές εργασίες έχουν γίνει από διακεκριμένους ερευνητές, για την μεθοδολογία της CUSUM και άλλες στενά συνδεδεμένες τεχνικές Σ.Ε.Δ.

Ο Montgomery (1985), σε έρευνά του σχετικά με τα διαγράμματα ελέγχου, είχε την άποψη ότι τα διαγράμματα αυτά είναι «μεταξύ μερικών από τα πιο σημαντικά εργαλεία για τον έλεγχο της διαχείρισης και της ποιότητας της παραγωγής». Τα διαγράμματα αυτά, έχουν μια μακρά ιστορία στην βιομηχανοποιημένη παραγωγή σε όλο τον κόσμο. Οι πέντε βασικοί λόγοι στους οποίους βασίζεται αυτό είναι οι εξής:

- (i) τα διαγράμματα ελέγχου αποτελούν ευρέως αποδεκτές και δοκιμασμένες τεχνικές για τη βελτίωση της παραγωγικότητας*
- (ii) οι μέθοδοι CUSUM είναι αποτελεσματικές στην πρόληψη βλάβης/ελαττωματικής παραγωγής*
- (iii) μέσω της μεθοδολογίας CUSUM αποφεύγονται οι άσκοπες προσαρμογές της διαδικασίας*
- (iv) Τα διαγράμματα της μεθόδου παρέχουν διαγνωστικές πληροφορίες*
- (v) Επιπλέον τα διαγράμματα CUSUM παρέχουν πληροφορίες σχετικά με την ικανότητα παραγωγής ενός εργοστασίου που εφαρμόζει την καθορισμένη διαδικασία.*

Αν και τα διαγράμματα ελέγχου CUSUM προτάθηκαν από τον Page (1954), τα διαγράμματα Shewhart εκείνη την χρονική περίοδο αλλά και για αρκετά χρόνια αργότερα, ήταν πιο δημοφιλή και χρησιμοποιούνταν ευρέως σε σχέση με τα διαγράμματα CUSUM. Ο Montgomery τόνισε ότι «ένα σημαντικό μειονέκτημα για οποιοδήποτε από τα διαγράμματα Shewhart ήταν ότι αυτά «χρησιμοποιούν μόνο τις πληροφορίες σχετικά με τη διεργασία που περιέχεται στο τελευταίο δείγμα, και αγνοούν τις πληροφορίες που δόθηκαν από τον ολόκληρη την αλληλουχία των δειγμάτων». Τα διάγραμμα CUSUM είναι επομένως, «μια καλύτερη εναλλακτική λύση ως προς τα διαγράμματα Shewhart», διότι ενσωματώνουν άμεσα όλες τις πληροφορίες στην ακολουθία των τιμών των δειγμάτων, αναπαριστώντας τα συσσωρευμένα αθροίσματα των αποκλίσεων των τιμών δείγματος από την επιθυμητή τιμή.

Για πλήθος δειγμάτων $n \geq 1$, εάν x_i είναι ο μέσος όρος του i -στου δείγματος και μ_0 είναι ο στόχος για τη μέση τιμή της διαδικασίας, το γράφημα CUSUM σχηματίζεται με την γραφική παράσταση της ποσότητας

$$S_m = \sum (x_i - \mu_0) \text{ όπου } i = 1, 2, \dots, m \quad (\text{εξ. 3.3.1})$$

συναρτήσεως του αριθμού m τρέχοντος δείγματος. Η ποσότητα S_m είναι το άθροισμα μέχρι και συμπεριλαμβανομένου του m -στου δείγματος.

Καθώς συνδυάζονται πληροφορίες από διάφορα δείγματα, τα διαγράμματα CUSUM είναι πιο αποτελεσματικά από ότι τα διαγράμματα Shewhart για την διαδικασία της ανίχνευσης μικρών μετατοπίσεων. Εάν η διαδικασία παραμένει υπό έλεγχο κοντά στην επιθυμητή τιμή μ_0 , τα διαγράμματα CUSUM που προκύπτουν από την ανωτέρω εξίσωση πρέπει να μεταβάλλονται τυχαία γύρω από το μηδέν. Ωστόσο, εάν ο μέσος όρος μετατοπίζεται προς τα πάνω σε κάποια τιμή $\mu_1 > \mu_0$, τότε μια ανοδική ή θετική απόκλιση (τάση) έχει αναπτυχθεί στο διάγραμμα CUSUM. Αντιστρόφως, εάν ο μέσος όρος μετατοπίζεται προς τα κάτω σε κάποια τιμή $\mu_2 < \mu_0$, τότε μία προς τα κάτω ή μία αρνητική μετατόπιση στο S_m έχει αναπτυχθεί.

Ως εκ τούτου, αν η τάση αναπτύσσεται στα σημεία που απεικονίζονται - είτε προς τα πάνω είτε προς τα κάτω, θα πρέπει να θεωρήσουμε αυτό ως απόδειξη ότι η μέση διαδικασία έχει μετατοπιστεί και για τον λόγο αυτό θα πρέπει να ξεκινήσει η αναζήτηση της αιτίας επίδρασης και μεταβολής.

Για να καθοριστεί εάν η διαδικασία είναι εκτός ελέγχου, μια τυπική διαδικασία λήψης αποφάσεων (OCAP) μπορεί να καθορισθεί, όπως γνωρίζουμε και παρουσιάστηκε εκτενώς στο κεφάλαιο 2, με τη μορφή κόλουρου σχήματος μιας τεχνικής V-μάσκας. Η συγκεκριμένη τεχνική είναι ευρέως γνωστή ως V-μάσκα και η μέθοδος προτάθηκε από τον Barnard (1959).

Ο Deming (1986) υποστήριξε ένθερμα τη χρήση των διαγραμμάτων ελέγχου CUSUM, των Εκθετικά Σταθμισμένων Κινητών Μέσων (Exponential Weighted Moving Average - EWMA) και των διαγραμμάτων Shewhart, «ως αποτελεσματικά εργαλεία Σ.Ε.Δ. για την παρακολούθηση της ποιότητας παραγωγής», χωρίς όμως ο ίδιος να είναι υπέρ της χρήσης των στατιστικών ελέγχων υποθέσεων. Η έρευνά του τονίζει ότι «οι μέθοδοι των διαγραμμάτων CUSUM και EWMA, είναι πιο αποτελεσματικές από ότι τα διαγράμματα Shewhart, για τον εντοπισμό μικρού και μεσαίου μεγέθους διασυνεχών αλλαγών στις παραμέτρους της κατανομής πιθανοτήτων ενός ποιοτικού χαρακτηριστικού». Αν και στις περισσότερες περιπτώσεις και τα διαγράμματα CUSUM και τα EWMA είναι πολύ χρήσιμα,

δεν έχουν σκοπό να αντικαταστήσουν τα διαγράμματα Shewhart, τα οποία μπορεί να χρησιμοποιηθούν συμπληρωματικά για να ανιχνεύσουν μια ευρύτερη ποικιλία μεταβολών που οφείλονται σε διαμορφώσιμες αιτίες.

Συνεπώς, συχνά συνίσταται η χρησιμοποίηση των ορίων από τα διαγράμματα Shewhart σε συνδυασμό με τα διαγράμματα CUSUM ή EWMA.

Ο Apley et al (1999) εργάστηκαν πάνω στις τεχνικές Σ.Ε.Δ. που στηρίζονται στον Γενικευμένο έλεγχο του λόγου πιθανοφάνειας (Generalized Likelihood Ratio Test) για την ανίχνευση και την εκτίμηση μέσω μετατοπίσεων αυτοσυσχετιζόμενων διαδικασιών. Βασισμένοι σε παρατηρήσεις που έκαναν, αποδεικνύεται ότι μερικές φορές η απόδοση των μοντέλων GLRT είναι ελαφρώς καλύτερη από τα διαγράμματα CUSUM, αλλά για ορισμένες περιπτώσεις, είτε η διαφορά είναι αμελητέα, ή η απόδοση του διαγράμματος CUSUM φαίνεται να είναι καλύτερη.

Ο Woodall (2000) εργάστηκε πάνω στις μεθόδους Σ.Ε.Δ, ιδιαίτερα στα διαγράμματα ελέγχου, τα οποία είναι σημαντικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση και τη βελτίωση των διαδικασιών παραγωγής ακόμα και στις επιχειρήσεις παροχής υπηρεσιών. Η άποψή του ήταν ότι οι «ασκούμενοι πρέπει να αναπτύξουν μια καλύτερη κατανόηση του πώς η έρευνα Σ.Ε.Δ. μπορεί να βελτιώσει τη χρήση των μεθόδων στην πράξη».

Ο Steiner et al. (2000) πρότειναν ένα μοντέλο προσαρμοσμένου κίνδυνου CUSUM, επικεντρώνοντας σε εφαρμογή του σε ιατρικές κατευθύνσεις. Το προτεινόμενο μοντέλο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση χειρουργικών αποδόσεων. Ο Pignatiello et al (2001), διεξήγαγαν έρευνα σχετικά με την εκτίμηση των σημείων αλλαγής της συνήθους διαδικασίας Σ.Ε.Δ. σε συσχέτιση με τη σημασία που έχει αυτή η αλλαγή για την εφαρμογή. Η εργασία αυτή αποκαλύπτει το γεγονός ότι «τα διαγράμματα ελέγχου διαδραματίζουν έναν σημαντικό ρόλο στις εφαρμογές Σ.Ε.Δ. και ότι αυτά είναι ικανά να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση των αλλαγών μιας διαδικασίας διακρίνοντας μεταξύ ειδικών και κοινών αιτίων διακύμανσης των τιμών της».

Ο Yeh et al (2004) πρότειναν δύο νέα διαγράμματα ελέγχου CUSUM – το διάγραμμα CUSUM M, το οποίο είναι ειδικά σχεδιασμένο για την ανίχνευση μικρών μετατοπίσεων στη μέση της διαδικασίας, και το διάγραμμα V-CUSUM σχεδιασμένο για την ανίχνευση μικρών αλλαγών στη μεταβλητότητα της διεργασίας. Ο συνδυασμός CUSUM M και V διαγραμμάτων, παρέχει ένα ενοποιημένο σύστημα στην παρακολούθηση του μέσου και της μεταβλητότητας της διεργασίας. Το τελευταίο αποτελεί ιδιαίτερα

χρήσιμο χαρακτηριστικό, όταν υπάρχουν πολλαπλές διεργασίες που πρέπει να παρακολουθούνται ταυτόχρονα, δεδομένου ότι όλα τα χαρακτηριστικά ποιότητας κάθε διεργασίας μπορεί να παρακολουθούνται σε ένα μόνο γράφημα.

Αν και οι περισσότεροι ερευνητές έχουν αποδείξει ότι τα CUSUM διαγράμματα ελέγχου μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για τη μείωση της μεταβλητότητας της διαδικασίας, το οποίο είναι ο τελικός στόχος του Σ.Ε.Δ, ελάχιστες προσπάθειες έχουν γίνει για να εφαρμοστεί η τεχνική CUSUM ως ένα αποτελεσματικό εργαλείο για την παρακολούθηση της ποιότητας στον κλάδο των κατασκευών, ιδίως στους τομείς της δομοστατικής σε ευρεία γεωγραφική κλίμακα (π.χ. Ινδία). Το κεφάλαιο αυτό παρουσιάζει την ανωτέρω διερεύνηση καθώς και το πόσο αποτελεσματικά η τεχνική CUSUM μπορεί να εφαρμοστεί ως ένα εργαλείο ελέγχου της ποιότητας για την δομοστατική, ειδικά στη βιομηχανία ετοιμού σκυροδέματος (RMC).

3.4. Κίνδυνοι στην παραγωγή έτοιμου σκυροδέματος και προσδοκίες από τον σχεδιασμό και την εφαρμογή των RACUSUM τεχνικών

Στην πραγματικότητα αρκετοί κίνδυνοι από την διαδικασία παραγωγής του έτοιμου σκυροδέματος δεν περιορίζονται μόνο στην φάση της παραγωγής αλλά φθάνουν μέχρι την φάση της εμπορικής διάθεσης της παρτίδας. Κάποιοι από αυτούς τους κινδύνους μπορούν να τύχουν αντικείμενο μέριμνας και να ενσωματωθούν προληπτικά προς παρακολούθηση σε ένα συμβατικό διάγραμμα CUSUM μέσω του προτεινόμενου μοντέλου προσαρμοσμένου κινδύνου CUSUM (RACUSUM). Για το λόγο αυτό εκτιμάται, ότι τα διαγράμματα RACUSUM θα είναι ένα πιο αποτελεσματικό εργαλείο για την παρακολούθηση της ποιότητας του RMC. Όπως και το συμβατικό διάγραμμα CUSUM, το διάγραμμα RACUSUM μπορεί να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά για την παρακολούθηση της μέσης αντοχής σκυροδέματος, της τυπικής απόκλισης και του εύρους των αποτελεσμάτων θλίπτικής αντοχής των διαφόρων ποιοτήτων σκυροδέματος (π.χ. M15, M20, M25, M30, M40, κλπ) που παράγεται σε ένα τυπικό εργοστάσιο RMC.

Η εφαρμογή ενός πλαισίου επανεξέτασης του έργου των ερευνητών, όπως προσέγγισε ο Box et al (1992), έχει οδηγήσει την διαδικασία ανάπτυξης της RACUSUM, σε παρακολούθηση στατιστικών υποθέσεων, μέσω ένα συστήματος συνεχούς δοκιμής. Ο Vining (1998), είδε επίσης αυτά τα «νέα» διαγράμματα ελέγχου, ως «αλληλουχία δοκιμών υπόθεσης». Δικαιολόγησε δε, τη χρήση του ελέγχου υποθέσεων δηλώνοντας «ότι αντικατοπτρίζει καλύτερα τον στατιστικό τρόπο σκέψης, δείχνοντας τους δεσμούς ανάμεσα σε δύο σημαντικούς τομείς των στατιστικών στοιχείων που παρέχει μια τυπική βάση για την αξιολόγηση των ιδιοτήτων των διαγραμμάτων ελέγχου».

Ο Deming (1986) υποστήριξε ένθερμα τη χρήση των διαγραμμάτων ελέγχου και δικαιολόγησε την χρήση των διαγραμμάτων CUSUM. Ο Apley et al (1999), εργάστηκαν πάνω σε μοντέλα GLRT, και παρατήρησαν ότι σε ορισμένες περιπτώσεις, η απόδοση αυτών των μοντέλων, είναι καλύτερη από αυτή των μοντέλων που βασίζονται απλά σε διαγράμματα CUSUM. Υπήρξαν βέβαια και περιπτώσεις όπου ο συγκεκριμένος ερευνητής διαπίστωσε ότι τα «νέα» μοντέλα είχαν ισάξια ή ακόμη και υπολειπόμενη συμπεριφορά σε σχέση με τα «κλασσικά» μοντέλα διαγραμμάτων CUSUM.

Αν και η εργασία αυτών των ερευνητών χαίρει εκτιμήσεως στην επιστημονική κοινότητα, ένα μοντέλο, όπου η τεχνική CUSUM μπορεί να εφαρμοστεί σε συνδυασμό με την αρχή των

στατιστικών υποθέσεων και τις αρχές και τις έννοιες GLR, με ειδική αναφορά στην βιομηχανία παραγωγής έτοιμου σκυροδέματος (RMC), λείπει ως τεχνική ελέγχου.

Το προτεινόμενο μοντέλο RACUSUM έχει αναπτυχθεί με βάση τις έννοιες της τεχνικής CUSUM, συγκεράζοντας τις έννοιες των στατιστικών δοκιμών και υπόθεσης GLR, ως τεχνική που μπορεί να εφαρμοστεί για την παρακολούθηση της αντοχής του έτοιμου σκυροδέματος.

Από τα χαρακτηριστικά δε των μεθόδων που αυτή η τεχνική συνδιάζει, πιστεύεται ότι το μοντέλο αυτό θα είναι ένα πιο αποτελεσματικό και ρεαλιστικό εργαλείο για τον έλεγχο και την διασφάλιση της παραγωγής στη βιομηχανία RMC.

3.5. Το Εννοιολογικό πλαίσιο της μεθόδου RACUSUM

3.5.1. Παρουσίαση των μεταβλητών και των παραμέτρων που χρησιμοποιεί το μοντέλο RACUSUM

Για την διασφαίνιση και την επαρκή τοποθέτηση της μεθοδολογίας RACUSUM, ορίζουμε τις παρακάτω μεταβλητές ως εξής:

X_t : το συσσωρευμένο άθροισμα των αποκλίσεων της επιθυμητής μέσης αντοχής από την πραγματική αντοχή θραύσεως δοκιμίων σε μορφή κύβου, ωρίμανσης 28 ημέρων του t -οστού δείγματος

t : ο τρέχον αριθμός δείγματος (1,2,3)

D_t : η απόκλιση της επιθυμητής μέσης αντοχής από την πραγματική παρατηρούμενη αντοχή θραύσεως του t -οστού δείγματος

p_t : ποσοστό κινδύνου που εκτιμήθηκε για το t -οστο δείγμα με βάση την πιθανότητα εμφάνισης (πιθανόφανεια) ενός κινδύνου κατά την παραγωγή

W_t : συντελεστής βάρους λογαριθμικής πιθανόφανειας του δείγματος ή βαθμολόγηση που αντιστοιχεί στο t -οστο δείγμα ανάλογα με τον εκτιμώμενο κίνδυνο

H_0 : στατιστική μηδενική υπόθεση

H_A : στατιστική εναλλακτική υπόθεση

θ : αλλαγή στην παράμετρο της διαδικασίας (καθορισμένη αντοχή του σκυροδέματος)

θ_0 : αλλαγή στην παράμετρο της διαδικασίας υπό την μηδενική υπόθεση

θ_A : αλλαγή στην παράμετρο της διαδικασίας υπό την εναλλακτική υπόθεση

C_0 : τρέχον αποδεκτό επίπεδο αντοχής

C_A : σημαντική αλλαγή στο επίπεδο της αντοχής

OR_0 : λόγος των πιθανοτήτων υπό μηδενική υπόθεση

OR_A : λόγος πιθανοτήτων υπό την εναλλακτική υπόθεση

yt : πραγματικό αποτέλεσμα της αντοχής του δείγματος (αποδοχή = 1, απόρριψη = 0)

RAX_t : συσσωρευτικό άθροισμα προσαρμοσμένου κινδύνου των αποκλίσεων της επιθυμητής μέσης αντοχής από την παρατηρούμενη αντοχή σε δείγματα ωρίμανσης 28 ημέρων

3.5.2. Λειτουργία του μοντέλου CUSUM στην παρακολούθηση της παραγωγικής διαδικασίας

Ένα τυπικό διάγραμμα CUSUM με δείκτες (tabular) περιλαμβάνει την παρακολούθηση των τιμών $X_t = \max(0, X_{t-1} + D_t)$, $t = 1, 2, 3, \dots$ όπου $X_0 = 0$.

Το μοντέλο CUSUM που βασίζεται στην παραπάνω εξίσωση δοκιμάζει διαδοχικά στο αποτέλεσμα την υπόθεση $H_0: \theta = \theta_0$ και $H_A: \theta = \theta_A$.

Η παράμετρος θ_0 της αρχικής υπόθεσης συνήθως καθορίζεται από την τρέχουσα απόδοση ενώ η παράμετρος θ_A είναι μια εναλλακτική τιμή που χρήζει ενδιαφέροντος όσον αφορά τον καθορισμό της από το σύστημα και συνήθως αντιστοιχεί σε κατώτερες επιδόσεις. Η διαδικασία αρχικά αναμένεται να βρίσκεται σε κατάσταση H_0 όσο η παράμετρος X_t είναι εντός των ορίων ελέγχου ενώ εναλλακτικά θεωρείται ότι έχει μετατοπιστεί σε κατάσταση H_A αν η παράμετρος X_t υπερβαίνει το όριο ελέγχου.

Ένα σύστημα ελέγχου CUSUM που υπερβαίνει το όριο ελέγχου λέγεται ότι «σηματοδότησε» (παρήγαγε «σήμα») σημαίνει ότι το διάγραμμα έχει συγκεντρώσει αρκετά στοιχεία για να καταλήξει στο συμπέρασμα ότι η παράμετρος διαδικασίας έχει αλλάξει). Το μοντέλο CUSUM έχει σχεδιαστεί για να παρακολουθεί τα παραγόμενα διαδοχικά αποτελέσματα παραγωγής έως ότου επαρκή αποδεικτικά στοιχεία της επιδείνωσης της διαδικασίας ανιχνεύονται. Έτσι θεωρητικά το μοντέλο CUSUM τελικά θα σηματοδοτήσει την παρατηρούμενη αλλαγή (ακόμα και αν στο τέλος το σήμα μπορεί να αποδειχθεί ένας ψευδής συναγερμός).

Το μήκος διαδρομής του διαγράμματος CUSUM είναι ο χρόνος ή ο αριθμός των παρατηρήσεων (που μπορεί επίσης να αναχθεί σε χρόνο), που απαιτείται πριν το πρώτο δείγμα του διαγράμματος υπερβεί το όριο ελέγχου. Καλές επιλογές (συμβιβασμοί) για το όριο ελέγχου, γίνονται με βάση την αναμενόμενη ή μέση διάρκεια εκτέλεσης (ARL) του διαγράμματος CUSUM υπό των υποθέσεων H_0 και H_A . Στην ιδανική περίπτωση, δηλ. ενώ η διαδικασία βρίσκεται στην κατάσταση H_0 , η διάρκεια (ευσταθούς) λειτουργίας του συστήματος θα πρέπει να είναι μεγάλη, δεδομένου ότι σε αυτήν την κατάσταση τα «σήματα» ακόμη και αν προκύψουν, αποτελούν ψευδείς συναγερμούς. Από την άλλη πλευρά, εάν η διεργασία έχει μετατοπιστεί σε θ_A , ή οποιαδήποτε άλλη μεταβολή στο σύστημα παράγει αποτέλεσμα με ουσιαστική διαφορά από θ_0 , είναι λογικό να προτιμώνται «διαδρομές» μικρότερων ARLs.

3.5.3. Τροποποίηση του μοντέλου CUSUM με την συμπερίληψη συναρτήσεων βαρών πιθανοφάνειας

Ο σχεδιασμός του μοντέλου CUSUM με ενδείκτες (tabular) μπορεί να τροποποιηθεί με ενσωμάτωση ενός «παράγοντα βάρους» επί του δείγματος με βάση την αναλογία πιθανοφάνειας. Σε αυτήν την περίπτωση η εξίσωση παρακολούθησης γίνεται:

$$X_t = \max(0, X_{t-1} + Dt + W_t) \quad (\text{εξ. 3.5.1})$$

όπου « W_t » είναι ο «παράγοντας βάρους» του δείγματος ή ο όρος που ανατιθεται στο t -οστό δείγμα.

Αν το " y " αντιπροσωπεύει το τρέχον αποτέλεσμα, και $f(y; \theta)$ δηλώνει την κατανομή πιθανοτήτων των πιθανών υποομάδων αποτελεσμάτων, τότε ο λόγος λογαριθμικής πιθανοφάνειας είναι $\ln(f(y; \theta) / f(y; \theta_0))$.

Αυτή η επιλογή είναι η καλύτερη δυνατή, υπό την έννοια ότι, μεταξύ όλων των συστημάτων με την ίδια ARL υπό την στατιστική υπόθεση H_0 , η αναλογία λογαριθμικής πιθανοφάνειας βαρών θα δώσει το μικρότερο ARL υπό την στατιστική υπόθεση H_A .

Κατά την εφαρμογή της πρότυπης μεθοδολογίας για την παρακολούθηση της αντοχής σε θλίψη, είναι αναγκαίο να ενημερωθεί το μοντέλο του «τροποποιημένου» CUSUM μετά από κάθε αποτέλεσμα αντοχής που λαμβάνεται μετά την δοκιμή αντοχής για την δεδομένη ποιότητα σκυροδέματος. Αυτό βοηθά στην ανίχνευση μεταβολών όσο το δυνατόν γρηγορότερα. Το αποτέλεσμα « y » αντιστοιχεί σε ένα από τα δύο πιθανά αποτελέσματα (επιτυχία ή αποτυχία), δηλαδή δηλώνει κατά πόσον η αντοχή του λαμβανόμενου σκυροδέματος είναι μεγαλύτερη ή μικρότερη από την καθορισμένη ελάχιστη αντοχή. Το διάγραμμα CUSUM είναι το άθροισμα των βαθμολογιών που προκύπτουν από την παρακολούθηση πάνω σε όλα τα δείγματα. Υποθέτοντας ότι y_t είναι το αποτέλεσμα από το τεστ αντοχής θραύσεως του t δείγματος, με τιμές $y_t = 1$, εάν το ληφθέν δείγμα εμφανίσει αντοχή μεγαλύτερη από την καθορισμένη ελάχιστη αντοχή και $y_t = 0$, εάν η λαμβανόμενη αντοχή είναι μικρότερη από την καθορισμένη ελάχιστη.

$$\text{Ετσι } f(y_t/\theta) = \rho(\theta)^{y_t} (1 - \rho(\theta))^{1 - y_t} \quad (\text{εξ. 3.5.2})$$

όπου το $\rho(\theta_0) = C_0$, το εκτιμώμενο τρέχον αποδεκτό επίπεδο αντοχής, $\rho(\theta_A) = C_A$, αποτελεί το επίπεδο σημαντικής αλλαγής στο επίπεδο αντοχής.

Ως αποτέλεσμα, το «τροποποιημένο» μοντέλο CUSUM ελέγχει διαδοχικά την υπόθεση $H_0: p = C_0$ έναντι της $H_A: p = C_A$ και οι βαθμολογίες για το κάθε δείγμα της CUSUM είναι:

$$W_t = \log \left(\frac{[1 - CA]}{[1 - C0]} \right) \text{ εάν } y_t = 0 \text{ και} \quad (\text{εξ. 3.5.3})$$

$$W_t = \log \left(\frac{CA}{C0} \right) \text{ αν } y_t = 1. \quad (\text{εξ. 3.5.4})$$

3.6. Το προτεινόμενο μοντέλο προσαρμοσμένου κινδύνου CUSUM (RACUSUM)

Το προτεινόμενο μοντέλο RACUSUM βασίζεται στην μέθοδο βαθμολόγησης αναλογίας πιθανόφανεας, η ποσοτικοποίηση της οποίας περιλαμβάνει παραμέτρους όπως ο εκτιμώμενος κίνδυνος (pt), ο λόγος πιθανοτήτων υπό την μηδενική υπόθεση (OR_0), ο λόγος πιθανοτήτων υπό εναλλακτική υπόθεση (OR_A) και η πραγματική έκβαση της αντοχής του δείγματος (yt).

Ο όρος λογαριθμικής πιθανόφανεας (Wt) που υπολογίζεται από την παραπάνω φόρμουλα, όταν προστίθεται στις συμβατικές τιμές CUSUM και την αντίστοιχη γραφική παράσταση του διαγράμματος, ορίζει το διάγραμμα RACUSUM.

Το μοντέλο CUSUM μπορεί κατά αυτόν τον τρόπο, να ρυθμιστεί με βάση την εκτιμώμενο κίνδυνο υιοθετώντας το μέγεθος των βαθμολογιών (scores) βάσει των κινδύνων που ορίζει και μπορεί να ανεχθεί ο δεδομένος τύπος σκυροδέματος υπό παραγωγή. Δεδομένου ότι κάθε παρακολουθούμενη αντοχή μπορεί να έχει ένα διαφορετικό επίπεδο κινδύνου αναφοράς, οι στατιστικές υποθέσεις H_0 και H_A βασίζονται σε μια αναλογία πιθανοτήτων. Έστω οι παράμετροι OR_0 και OR_A που ορίζονται να αντιπροσωπεύουν τους λόγους πιθανοτήτων υπό την μηδενική και την εναλλακτική υπόθεση αντίστοιχα. Για την ανίχνευση κινδύνου αύξησης, μπορούμε να θέσουμε $OR_A > OR_0$. Η επιλογή των τιμών για τις παραμέτρους OR_A είναι παρόμοια με τον καθορισμό ενός ελάσσονος κινδύνου που έχει ελάχιστη επίδραση στην ποιότητα του σκυροδέματος. Εάν ο εκτιμώμενος κίνδυνος pt βασίζεται στις τρέχουσες συνθήκες, μπορούμε να θέσουμε $OR_0 = 1$. Λαμβάνοντας υπόψη ένα κατ'εκτίμηση κίνδυνο αποτυχίας ίση με pt , οι προκύπτουσα πιθανότητα αποτυχίας ισούται με $pt/(1 - pt)$. Έτσι, για την αντοχή θραύσεως του t δείγματος υπό την στατιστική υπόθεση H_0 , οι πιθανότητα αποτυχίας είναι ίση με $OR_0 pt / (1 - pt)$, ενώ σύμφωνα με την στατιστική υπόθεση H_A η πιθανότητα αποτυχίας είναι ίση με $OR_A pt / (1 - pt)$, η οποία αντιστοιχεί σε πιθανότητα αστοχίας ίση με $OR_A pt / (1 - pt + OR_A)$.

Με τον τρόπο αυτό, η CUSUM δοκιμάζει επανειλημμένα την υπόθεση H_0 : με αναλογία πιθανοτήτων ίση με OR_0 ως προς της υπόθεσης H_A : με αναλογία πιθανοτήτων ίση με OR_A .

Έτσι, οι δύο πιθανές βαθμολογήσεις του λόγου λογαριθμικής πιθανοφάνειας για την αντοχή του δείγματος 't' που προτείνονται είναι:

$$Wt = \log [(1 - pt + OR_0 pt) OR_A] / [(1 - pt + OR_A pt) OR_0] \text{ εάν } yt = 1 \quad (\text{εξ. 3.6.1})$$

$$Wt = \log [(1 - pt + OR_0 pt) / (1 - pt pt + OR_A)] \text{ εάν } yt = 0 \quad (\text{εξ. 3.6.2})$$

καταλήγοντας στην απόλυτη εξίσωση για RACUSUM:

$$RAXt = Xt + Wt \quad (\text{εξ. 3.6.3})$$

3.7. Εφαρμογή του μοντέλου *RACUSUM* σε πραγματικά δεδομένα

Τα δεδομένα αντοχής θραύσεως από δοκίμια σε σχήμα κύβου ωρίμανσης 7 ημέρων και 28 ημέρων διαφόρων ποιοτήτων σκυροδέματος (M15, M20, M25, M30, M40) συλλέχθηκαν από τις παραγωγικές μονάδες RMC μέσα και γύρω από την περιοχή Αχμενταμπάντ (Δελχί/Ινδία) και αναλύθηκαν αρχικά χρησιμοποιώντας συμβατική τεχνική CUSUM και την αντίστοιχη CUSUM με χρήση V-μάσκας. Με αυτή την τεχνική, οι φορείς ελέγχου ποιότητας RMC μπορούν να παρακολουθούν την αντοχή του παραγόμενου σκυροδέματος, σε καθημερινή, εβδομαδιαία ή μηνιαία βάση (ανάλογα με τα επίπεδα παραγωγής). Αυτό θα εξασφαλίσει ότι η ποιότητα του σκυροδέματος που παράγεται από αυτά, είναι σύμφωνα με τις προδιαγραφές του σχεδιασμού του μίγματος. Ως εκ τούτου, οι παραγωγοί σκυροδέματος δεν χρειάζεται να επιλέξουν για μια υπερ-συντηρητική σχεδίαση μίγματος (δηλ. προσθήκη μεγάλης περιεκτικότητας σε τσιμέντο) για να μειώσουν τους κινδύνους αστοχίας της παραγωγής τους, αποφεύγοντας έτσι την άσκοπη σπατάλη υλικού. Με χρήση της συμβατικής τεχνικής CUSUM, εμπλέκοντας τους κινδύνους κατά τη διάρκεια της παραγωγής του ετοιμού σκυροδέματος στο υπάρχον μοντέλο, δημιουργείται ένα νέο μοντέλο που καλείται RACUSUM. Στόχος είναι αυτό το μοντέλο να είναι ένα πιο αποτελεσματικό και ρεαλιστικό εργαλείο για την παρακολούθηση της ποιότητας του έτοιμου σκυροδέματος.

Τα δεδομένα που λαμβάνονται υπόψη για την ανάλυση βασίζονται σε μια παρτίδα των τριάντα δειγμάτων (στην πραγματικότητα κάθε δείγμα αποτελεί τον μέσο όρο τριών δοκιμίων σχήματος κύβου), ωρίμανσης 28 ημερών, τύπου σκυροδέματος M20. Τα δείγματα θα χρησιμοποιηθούν για έλεγχο αντοχής θραύσεως και συλλέγονται όπως ήδη αναφέρθηκε από μια εμπορική παρτίδα που προέρχεται από εργοστάσια στο Ahmedabad. Αυτή η παρτίδα λαμβάνεται για τη διάρκεια περίπου ενός μηνός και παρουσιάζεται στον πίνακα 1.

Πίνακας 1: Δείγματα ωρίμανσης 28 ημέρων σχήματος κύβου που υποβλήθηκαν σε μέτρηση της αντοχής θραύσεως (από ένα εμπορικό εργοστάσιο RMC σε Ahmedabad)

Sample No. (t)	Date Of casting	28 day Compressive Strength N/mm ² (Mpa) (Mean of 3 cube strengths) (x _t)
1	20.05.06	35.50
2	20.05.06	27.80
3	22.05.06	35.80
4	22.05.06	30.10
5	23.05.06	27.60
6	25.05.06	32.45
7	25.05.06	30.20
8	26.05.06	26.85
9	28.05.06	31.10
10	30.05.06	19.20
11	02.06.06	25.86
12	03.06.06	31.20
13	03.06.06	25.60
14	04.06.06	31.15
15	06.06.06	35.80
16	07.06.06	27.50
17	09.06.06	28.73
18	10.06.06	23.20

19	11.06.06	18.95
20	12.06.06	24.50
21	13.06.06	22.45
22	14.06.06	29.80
23	15.06.06	35.65
24	15.06.06	30.80
25	17.06.06	24.01
26	19.06.06	25.25
27	20.06.06	27.55
28	22.06.06	30.15
29	24.06.06	24.50
30	24.06.06	22.60

Οι εκτιμώμενοι κίνδυνοι σε ποσοτώσεις «p» που εντοπίστηκαν κατά τη διαδικασία παραγωγής του RMC συνδέονται κυρίως με την επιδείνωση της αντοχής του

σκυροδέματος, και η μετέπειτα αξιολόγηση τους με βάση την εμπειρία, δίνεται στον Πίνακα 2.

Πίνακας 2: Εκτίμηση των κανονικοποιημένων ποσοστάσεων κινδύνων που συνδέονται με την παραγωγή RMC

S No.	Description of identified risks	Risk ratings (likelihood based)
1	Strength deterioration due to problematic raw materials (cement, coarse aggregates, fine aggregates, admixtures etc.)	0.4
2	Strength deterioration due to problematic admixtures	0.2
3	Strength deterioration due to problematic water quality	0.1
4	Strength deterioration due to poor workmanship during production process	0.3
	Summation of estimated risks (Σp)	1.0

Για τα στοιχεία σκυροδέματος τύπου M20 σύμφωνα με τον πίνακα 1, η βασική ανάλυση για τη διαμόρφωση ενός συμβατικού διαγράμματος CUSUM έχει ως εξής:

Μέσος όρος : $28.061 \text{ N/mm}^2 \text{ (Mpa)}$ [$1 \text{ Mpa} = 1 \text{ N/mm}^2$]

Τυπική Απόκλιση (σ) : 4.601 (εργοστασιακή τυπική απόκλιση της παρτίδας που αποτελεί αντικείμενο ανάλυσης)

Επιθυμητή μεση αντοχή

$(TMS) = f_{ck} + 2 \times \sigma$ [σύμφωνα με τους Dewar και Anderson]

$TMS = 20 + 2 (4.601) = 29.202 \text{ N/mm}^2 \text{ (Mpa)}$

Αποτελέσματα από την επεξεργασία των παραπάνω δεδομένων με την τεχνική CUSUM παρουσιάζονται στον Πίνακα 3. Η στήλη 1 του πίνακα 3 αντιπροσωπεύει τον αριθμό του δείγματος, η στήλη 2 την αντοχή θραύσεως δείγματος σε σχήμα κύβου ωρίμανσης 28 ημερών (x_i) και στη στήλη 3 υπολογίζονται οι αποκλίσεις (θετικές και αρνητικές) από την τιμή TMS (29.202 N/mm^2) από την τρέχουσα τιμή x_i . Από αυτά τα δεδομένα υπολογίστηκαν οι τιμές της απλής τεχνικής CUSUM για κάθε δείγμα (t), που παρουσιάζονται στην στήλη 4. Αυτά τα αποτελέσματα χρησιμοποιούνται επίσης και για

τον σχεδιασμό του διαγράμματος CUSUM. Η στήλη 5 του πίνακα αντιπροσωπεύει τις αξιολογήσεις των εκτιμώμενων κινδύνων που έχουν εντοπιστεί για κάθε δείγμα από το εργοστάσιο RMC υπό μελέτη. Στη στήλη 6 υπολογίζονται οι τιμές που λαμβάνονται για την τεχνική προσαρμοσμένου κινδύνου CUSUM (RACUSUM).

Η ανάλυση δεδομένων που αφορά στην RACUSUM, έχει ως ακολούθως:

Υποθέτοντας αναλογία πιθανοτήτων υπό την μηδενική υπόθεση $OR_0 = 1$ και υπό την εναλλακτική υπόθεση $OR_A = 0.5$, οι αξιολογήσεις των εκτιμώμενων κινδύνων pt για τα δείγματα 1, 2, 3, 4, ..., 30 με βάση μια εμπειρική μεθοδολογία συνοψίζονται στον Πίνακα 3.

Η Βαθμολόγηση λογαριθμικής πιθανόφανεας των δειγμάτων 1, 2, 3, ..., 30 υπολογίζεται ως εξής:

Για την παραγωγή RMC, το βασικό κριτήριο για την αποδοχή ενός συγκεκριμένου σκυροδέματος είναι ότι η αντοχή του δεν πέφτει κάτω από τα καθορισμένα επίπεδα του προτύπου, συνεπώς, για:

$yt = 1$ όπως ορίζεται στην (εξ. 3.6.1)

$$Wt = \log [(1 - pt + OR_0 pt) OR_A / (1 - pt + OR_A pt) OR_0]$$

Όπου Wt είναι το βάρος της πιθανόφανεας στο t -οστό δείγμα λαμβάνοντας υπόψη τον εκτιμώμενο κίνδυνο pt :

Για, $OR_0 = 1$ και $OR_A = 0.5$

$$Wt1 = \log [(1 - 0.1 + 1 (0.1)) 0.5 / (1 - 0.1 + 0.5 (0,1)) 1] = - 0.2787$$

Ομοίως υπολογίζεται:

$$Wt2 = - 0,2304$$

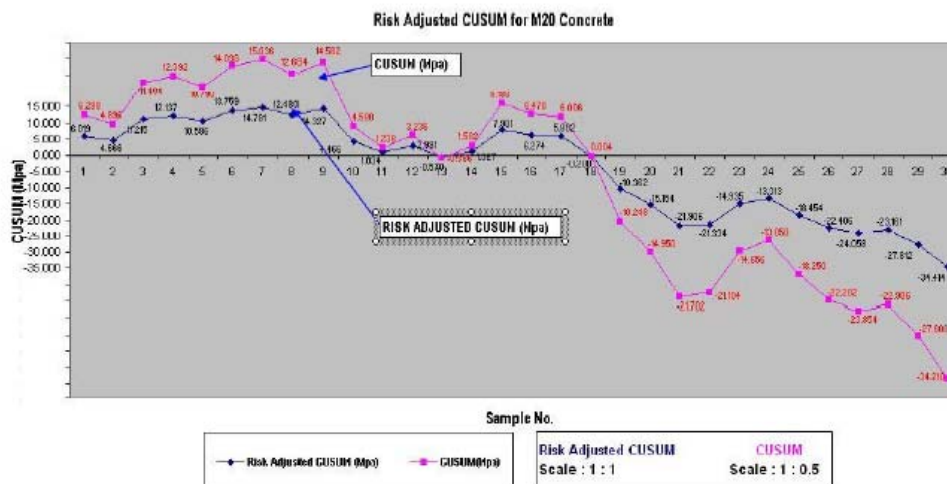
Έτσι, τα αποτελέσματα από την επεξεργασία της RACUSUM διαμορφώνονται με τη χρήση των παραπάνω τιμών.

Table 3. Formulation of Risk Adjusted CUSUM (RACUSUM) for M20 grade concrete with Mean = 28.061 N/mm² (Mpa), Standard deviation = 4.601, TMS = 29.202 N/mm² (Mpa)

Sample No.(t)	28 D Compressive Strength N/mm ² (Mpa) (x _t)	Deviations (x _t - TMS) N/mm ² (Mpa)	CUSUM N/mm ² (Mpa)	Estimated Risk (p _t)	Sample Weight Log likelihood Score (W _t)	Risk Adjusted CUSUM N/mm ² (Mpa)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
1	35.50	6.298	6.298	0.1	-0.2788	6.0192
2	27.80	-1.402	4.896	0.3	-0.2304	4.6656
3	35.80	6.598	11.494	0.1	-0.2788	11.2152
4	30.10	0.898	12.392	0.2	-0.2553	12.1367
5	27.60	-1.602	10.790	0.4	-0.2041	10.5859
6	32.45	3.248	14.038	0.1	-0.2788	13.7592
7	30.20	0.998	15.036	0.2	-0.2553	14.7807
8	26.85	-2.352	12.684	0.4	-0.2041	12.4798
9	31.10	1.898	14.582	0.2	-0.2553	14.3267
10	19.20	-10.002	4.580	0.7	-0.1139	4.4661
11	25.86	-3.342	1.238	0.4	-0.2041	1.0338
12	31.20	1.998	3.236	0.2	-0.2553	2.9807
13	25.60	-3.602	-0.366	0.4	-0.2041	-0.5701
14	31.15	1.948	1.582	0.2	-0.2552	1.3267
15	35.80	6.598	8.180	0.1	-0.2788	7.9012

16	27.50	-1.702	6.478	0.4	-0.2041	6.2738
17	28.73	-0.472	6.006	0.4	-0.2041	5.8018
18	23.20	-6.002	0.004	0.4	-0.2041	-0.2001
19	18.95	-10.252	-10.248	0.7	-0.1139	-10.3619
20	24.50	-4.702	-14.950	0.4	-0.2041	-15.1541
21	22.45	-6.752	-21.702	0.4	-0.2041	-21.9061
22	29.80	0.598	-21.104	0.3	-0.2304	-21.3344
23	35.65	6.448	-14.656	0.1	-0.2788	-14.9347
24	30.80	1.598	-13.058	0.2	-0.2553	-13.3132
25	24.01	-5.192	-18.250	0.4	-0.2041	-18.4541
26	25.25	-3.952	-22.202	0.4	-0.2041	-22.4061
27	27.55	-1.652	-23.854	0.4	-0.2041	-24.0581
28	30.15	0.948	-22.906	0.2	-0.2553	-23.1613
29	24.50	-4.702	-27.608	0.4	-0.2041	-27.8121
30	22.60	-6.602	-34.210	0.4	-0.2041	-34.4141

Fig. 1. Comparison of Conventional CUSUM Plot and RACUSUM Plot for M20 Concrete (as per data of Table 3.)



3.7.1. Ανάλυση των τάσεων του γραφήματος του σχήματος 1

Σε γενικές γραμμές, οι ανοδικές κλίσεις δείχνουν μια αύξηση της μέσης αντοχής και της τυπικής απόκλισης, ενώ προς τα κάτω κλίσεις αντανακλούν μια τάση μείωσης. Ελάχιστη διακύμανση της αντοχής δοκιμής από τον στόχο σημαίνει ότι η αντοχή είναι κοντά στην επιθυμητή. Στο Σχήμα 1, η τάση του γραφήματος για τη συμβατική τεχνική CUSUM παρουσιάζει μικρή αύξηση στην τάση αντοχής μέχρι το δείγμα No.9. (31.10 N/mm² [Mpa]) μετά την οποία, στο δείγμα No.10 (19.2 N/mm²), η αντοχή πέφτει κάτω από την τιμή - στόχο των 20 N/mm². Αν και υπάρχει και πάλι μια ανάκαμψη της αντοχής μέχρι το δείγμα No.17, η αντοχή πέφτει και πάλι κάτω από την τιμή στόχο στο δείγμα No.19 (18.95 N/mm²). Στη συνέχεια, το διάγραμμα CUSUM δείχνει μια αρνητική τάση μέχρι δείγμα No.30.

Ο παρατηρούμενος υψηλός βαθμός της διακύμανσης της μέσης αντοχής καθώς και τα επίπεδα της τυπικής απόκλισης αποκαλύπτουν ότι το σύστημα παρακολούθησης της ποιότητας σκυροδέματος του εργοστασίου RMC που εξετάζεται, είναι ανεπαρκές.

Το γεγονός αυτό αυξάνει επίσης την πιθανότητα απόρριψης του παραγόμενου σκυροδέματος από τον τελικό χρήστη. Αντίστοιχα το διάγραμμα RACUSUM εμφανίζει αρχικά αυξητική τάση, αλλά η τάση αυτή έχει λιγότερες αποκλίσεις από την τιμή στόχο - TMS (η μέγιστη τιμή είναι 14.327 N/mm²) από ότι το συμβατικό CUSUM (όπου η μέγιστη τιμή του οποίου είναι 15.036 N/mm²). Στο δείγμα No.13, το συμβατικά διαγράμματα CUSUM και RACUSUM δείχνουν ίδιες τιμές (0) πέρα από τις οποίες και τα δύο διαγράμματα δείχνουν μια πτωτική τάση, αλλά οι αποκλίσεις από την αρνητική πλευρά είναι λιγότερες (-34.414 N/mm²) για το διάγραμμα RACUSUM από τις αντίστοιχες αποκλίσεις του συμβατικού διαγράμματος CUSUM (-34.210 N/mm²) μέχρι το δείγμα No.30.

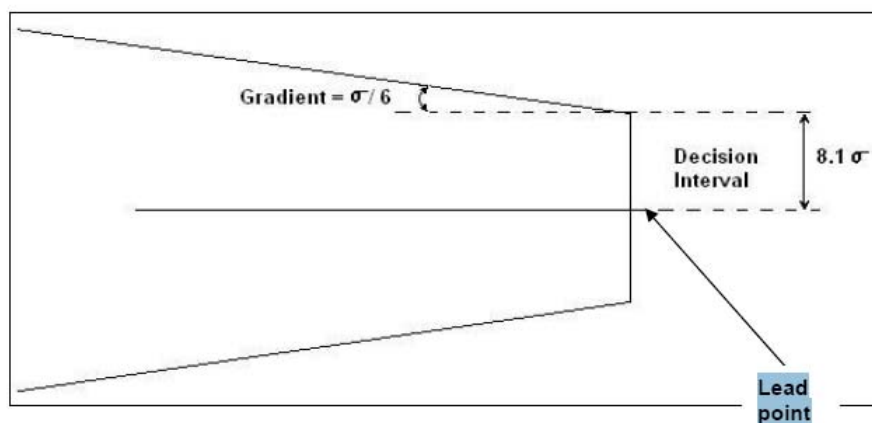
3.7.2. Παρουσίαση μιας ειδικής της τεχνικής V-μάσκας στα διαγράμματα CUSUM

Για να επιβεβαιωθεί εάν μια σημαντική αλλαγή έχει συμβεί, εφαρμόζουμε μία διαφανή μάσκα, σε σχήμα ενός κόλουρου «V» πάνω στο τελευταίο δείγμα της ανάλυσης του διαγράμματος CUSUM. Εάν το διάγραμμα παραμένει εντός των ορίων της μάσκας, δεν έχει συμβεί κάποια σημαντική αλλαγή, δηλ. η ποιότητα του σκυροδέματος δεν έχει

παρεκκλίνει από το επιθυμητό επίπεδο σημαντικά. Οι αποκλίσεις που έχουν συμβεί είναι αποδεκτές και αυτές είναι που οφείλονται σε τυχαίους και μη ελέγξιμους παράγοντες. Ωστόσο, εάν το διάγραμμα διασχίζει ένα όριο, μια σημαντική τάση μπορεί να ανιχνευθεί και η δράση είναι απαραίτητη. Η V-μάσκα εφαρμόζεται στο διάγραμμα κάθε φορά που ένα νέο αποτέλεσμα προστίθεται σε αυτό και ο ανωτέρω έλεγχος επαναλαμβάνεται.

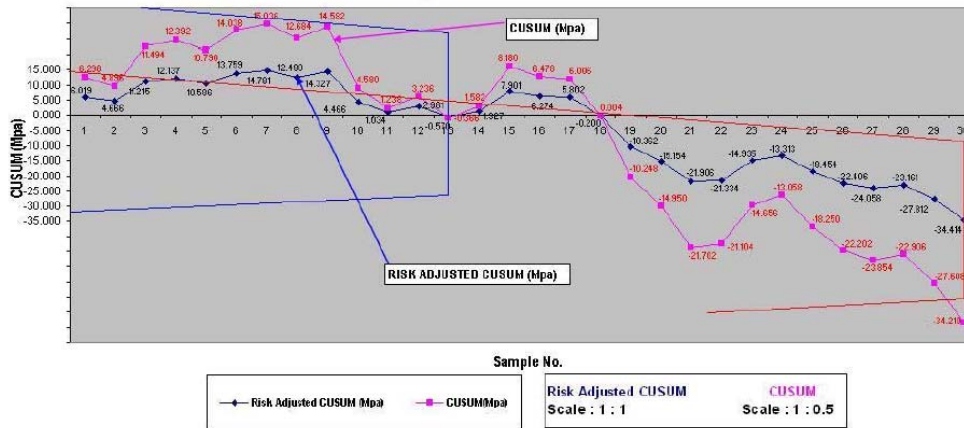
Η ειδική τεχνική της V-μάσκας που χρησιμοποιείται, ενώνει τρεις ευθείες γραμμές, και συγκεκριμένα, τη βάση του κόλουρου V και τις δύο κεκλιμένες γραμμές που συνδέουν τη βάση. Η βάση του κόλουρου κώνου ορίζει το διάστημα απόφασης (Decision Interval - DI) και το μήκος αυτής της γραμμής είναι $8.1 \times \sigma$. Η κλίση των δύο συμμετρικά τοποθετημένων κεκλιμένων γραμμών είναι $\sigma / 6$ στην περίπτωση της μάσκας που προορίζεται για την ανίχνευση σημαντικής αλλαγής στην μέση αντοχή, όπου σ είναι η τυπική απόκλιση του εργοστασιου παραγωγής.

Σχήμα. 2: V-Μάσκα για την παρακολούθηση της μέσης αντοχης διαγράμματος CUSUM



Σχήμα 3: Εφαρμογή της V-Μάσκας στα διαγράμματα CUSUM και RACUSUM

Για σκυρόδεμα τύπου M20 (δεδομένα από τον Πίνακα 3)



3.7.3. Εφαρμογή της ειδικής τεχνικής V-μάσκας στα διαγράμματα CUSUM και RACUSUM

Η τεχνική που παρουσιάστηκε για την V-Μάσκα μπορεί να εφαρμοστεί σε διαγράμματα CUSUM, ως ημερήσιο εργαλείο παρακολούθησης της παραγωγής του εργοστασίου. Στο σχήμα 3, παρατηρείται ότι με την τοποθέτηση της μάσκας στο δείγμα No.13, το διάγραμμα CUSUM του δείγματος No.7 (30.20 N/mm²) και του δείγματος No.9 (31.11 N/mm²) αγγίζουν τα όρια της μάσκας, αλλά το διάγραμμα RACUSUM παραμένει εντός των ορίων της V-μάσκας. Όταν η V-Μάσκα εφαρμόζεται πάνω από το τελευταίο δείγμα No.30 του διαγράμματος RACUSUM, το δείγμα No.6 (32.45 N/mm²) βγαίνει εκτός των ορίων της μάσκας, δίνοντας ένα σήμα ότι μια σημαντική αλλαγή έχει λάβει χώρα.

Σε αυτό το σημείο, η αιτία αυτής της αλλαγής θα πρέπει να διερευνηθεί.

Το πρόβλημα αστοχίας μπορεί να οφείλεται σε ένα σύνολο από αιτίες όπως οι πρώτες ύλες (τσιμέντο, λεπτόκοκκα αδρανή, φυσικά αδρανή, πρόσμικτα κλπ.), στην επεξεργασία των υλικών κατά την ανάμιξη, ή στο σχεδιασμό του μίγματος. Έτσι, με τις απαραίτητες τροποποιήσεις στο σχεδιασμό ή στο μίγμα πρώτων υλών ή την επεξεργασία του μίγματος, θα οδηγήσουν σε μείωση των αποκλίσεων της αντοχής του σκυροδέματος από την μέση τιμή - στόχο.

3.7.4. Απαιτούμενες δράσεις για την διόρθωση των μεταβολών

Όταν ανιχνεύονται αλλαγές στη μέση τιμή της αντοχής ή την τυπική απόκλιση, το μίγμα θα πρέπει να τροποποιηθεί ώστε να ληφθούν τα κατάλληλα νέα επίπεδα στόχου από την ημερομηνία της ανίχνευσης.

Μία εύχρηστη μέθοδος της τροποποίησης του σχεδιασμού του μίγματος είναι ο υπολογισμός/επανακαθορισμός της μεταβολής της περιεκτικότητας σε τσιμέντο ανά κυβικό μέτρο σκυροδέματος κάνοντας χρήση μιας εμπειρικής σχέσης. Μετά από την μεταβολή στην πυκνότητα του μίγματος, στη συνέχεια το σύστημα ελέγχου παραγωγής θα πρέπει να διεξάγει δοκιμές αντοχής θραύσεως σε δοκίμια 28 ημέρων του σκυροδέματος.

Η εμπειρική σχέση (Dewar και Anderson) και η εφαρμογή της στην παραπάνω περίπτωση παρουσιάζεται παρακάτω:

$$dc = 0,75 r [(DI/n) + G] \quad (\text{εξ. 3.7.1})$$

όπου:

dc : αλλαγή στην περιεκτικότητα μίγματος σε τσιμέντο (Kg / m^3)

DI : διάστημα απόφασης της V-Μάσκας ($8,1 \times \sigma$ για την παρακολούθηση μέσης αντοχής και συσχέτισης και $8.5 \times \sigma$ για επεξεργασία εύρους)

σ : τυπική απόκλιση εργοστασίου

n : αριθμός των αποτελεσμάτων από οδηγούν από το τρέχον σημείο στο σημείο δράσης

r : κανονικοποιημένο ισοδύναμο περιεκτικότητας τσιμέντου για αύξηση αντοχής θραύσεως κλίμακας 1 N/mm^2 (συνήθως της τάξεως των $5 \text{ Kg} / \text{m}^3$)

$0,75$: συντελεστής αντίδρασης για να αποφευχθεί η υπερβολική αντίδραση του συστήματος στην αποκατάσταση (ταλαντωτικές συμπεριφορές)

G : κλίση της μάσκας ($\sigma / 6$ για τη μέση αντοχή και την συσχέτιση, $\sigma / 10$ για επεξεργασία εύρους)

Εφαρμόζοντας την ανωτέρω εξίσωση για την εύρεση της αλλαγής στο περιεχόμενο τσιμέντου του μίγματος σύμφωνα με τα γραφικά αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 3, θα υπολογισθεί η απαιτούμενη μεταβολή. Θεωρώντας ως σήμα το δείγμα No.6 και λαμβάνοντας ως αρχή σημείου επεξεργασίας το δείγμα No.30, η προτεινόμενη αλλαγή στην περιεκτικότητα σε τσιμέντο μπορεί να υπολογιστεί από την παραπάνω εμπειρική σχέση (εξ.4) ως ακολούθως:

$$\begin{aligned} \sigma &= 4.601 \\ DI &= 8.1 \times \sigma = 8.1 (4.601) \\ n &= 24 \\ r &= 5 \text{ Kg} / \text{m}^3 \\ G &= \sigma / 6 = 4.601 / 6 \\ dc &= 0.75 \times 5 [8.1 (4,601) / 24 + 4,601 / 6] = 8,69 \text{ Kg} / \text{m}^3 \end{aligned}$$

Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, η παρούσα περιεκτικότητα τσιμέντου του μίγματος να μπορεί να μειωθεί προσεγγιστικά κατά $9 \text{ Kg} / \text{m}^3$ και στην συνέχεια το προκύπτον αποτέλεσμα να ελεγχθεί μέσω δοκιμών και ελέγχου των αντοχών θραύσεως τους. Επιπλέον, όλα τα στοιχεία των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται στο παραπάνω μίγμα χρειάζονται μια ενδελεχή έρευνα για την επιβεβαίωση της ποιότητάς τους σύμφωνα με τις προδιαγραφές του κώδικα και του εγχειριδίου ποιότητας που ακολουθείται από το εν λόγω εργοστάσιο παραγωγής ετοιμού σκυροδέματος.

3.7.5. Αποτελέσματα και ενέργειες δράσης από την εφαρμογή των ανωτέρω μεθοδολογιών

Οποιοδήποτε πρόβλημα εντοπισθεί από το σύστημα παρακολούθησης το οποίο επιδρά στην ποιότητα της παραγωγής θα χρειασθεί διόρθωση. Μετά την εφαρμογή των απαιτούμενων ελέγχων σε όλες τις βαθμίδες της παραγωγικής διεργασίας στο εργοστάσιο η ποιότητα των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται για το μίγμα βρέθηκε να είναι ικανοποιητική. Το προσωπικό χειρισμού του κεντρικού αναμίκτη (mizer) δεν είχε επαρκή εμπειρία στη φόρτωση των υλικών μέσα στο μίκτη παραγωγής και αυτό είχε ως επακόλουθο η ανάμιξη των πρώτων υλών να μην γίνεται επαρκώς.

Η διαδικασία της χύτευσης σε καλούπια σχήματος κύβου για την κατασκευή των δοκιμών καθώς και οι τεχνικές ωρίμανσης τους βρέθηκαν να χρειάζονται επίσης περαιτέρω βελτίωση. Με μια βελτίωση στην ποιότητα κατασκευής και τροποποίηση στο μίγμα σχεδιασμού, μπορούμε να πετύχουμε μια σημαντική μείωση στην περιεκτικότητα τσιμέντου, από $333 \text{ Kg} / \text{m}^3$ σε $324 \text{ Kg} / \text{m}^3$. Η παραπάνω ενέργεια εφόσον επαληθευθεί από μετρήσεις σε δοκίμια, θα μειώσει την σπατάλη του τσιμέντου, αλλά και θα αποθαρρύνει την περιττή χρήση του περισσότερου τσιμέντο στο μίγμα του σχεδιασμού.

Έτσι οι παραγωγοί RMC θα είναι σε θέση να κάνουν τα συγκεκριμένα βαθμό πιο οικονομικές τιμές και επίσης να αποφεύγονται οι βλαβερές παρενέργειες και περιβαλλοντολογικές συνέπειες από τη χρήση περισσότερου τσιμέντου στο μίγμα.

3.8. Συμπεράσματα από την εφαρμογή της τεχνικής RACUSUM

Τα συστήματα ελέγχου που βασίζουν την λειτουργία τους σε CUSUM είναι πιο ευαίσθητα από άλλα συστήματα στην ανίχνευση αλλαγών μικρού μεγέθους στην παραγωγή σκυροδέματος, και έτσι αξιόπιστες αποφάσεις για τον έλεγχο της παραγωγής μπορούν να ληφθούν με βάση λιγότερα αποτελέσματα. Εξέταση των διαγραμμάτων της προηγούμενης ενότητας προσδιορίζει εύκολα την τάση των αποτελεσμάτων από τη γενική κλίση του γραφήματος. Μεταβολές στην κλίση μπορούν να βοηθήσουν (κατά προσέγγιση) στην ημερομηνία και τον αριθμό του δείγματος, προσεγγίζοντας χρονικά την παρτίδα παραγωγής σκυροδέματος στην οποία συνέβη μια αλλαγή στη αντοχή θραύσεως ή στον έλεγχο. Στη συνέχεια οι έρευνες για δράσεις μπορούν να επικεντρωθούν σε υλικά ή διαδικασίες παραγωγής που σχετίζονται κατά προσέγγιση με την ημερομηνία αυτή.

Η κλίση των διαγραμμάτων μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να προσδιοριστεί το μέγεθος της αλλαγής. Στη συμβατική διαδικασία CUSUM, οι κίνδυνοι που συνδέονται με την παραγωγή RMC μπορούν να ενσωματωθούν υπό τη μορφή των επιπέδων λογαριθμικής πιθανόφανεας κάνοντας χρήση του μοντέλου Προσαρμοσμένου κινδύνου CUSUM. Το μοντέλο Προσαρμοσμένου κινδύνου (RACUSUM) δείχνει σαφείς ενδείξεις για τον καθορισμό ενός πιο αποτελεσματικού εργαλείου παρακολούθησης της αντοχής για τη βιομηχανία RMC.

Η παραπάνω προσέγγιση μπορεί να επεκταθεί με την εφαρμογή της τεχνικής RACUSUM για την παρακολούθηση της ποιότητας, για τους άλλους τομείς του κατασκευαστικού κλάδου, όπως προκατασκευασμένα και αρθρωτές μονάδες κατασκευής καλουπιών συμπεριλαμβανομένων των σπονδυλωτων και σκαλωσιών, τη βιομηχανία αυτοκινητόδρομων συμπεριλαμβανομένων και του μίγματος ασφάλτου, καθώς και σε άλλα συναφή προϊόντα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Προσέγγιση των τεχνικών Σ.Ε.Δ. όπως εφαρμόζονται στην πράξη για την αξιολόγηση της παραγωγής σκυροδέματος - Συμπεράσματα

4.1. Εισαγωγή

Στην σύγχρονη αντίληψη όσον αφορά στον έλεγχο της ποιότητας και παραγωγής σκυροδέματος, θα πρέπει (ασχέτως των μηχανισμών που εφαρμόζονται για την εφαρμογή του δεδομένου ελέγχου και τις ιδιαίτερες τεχνικές που εμπίπτουν στα πλαίσια του Σ.Ε.Δ), να αναφερθούμε στην σύγκριση που ενυπάρχει γύρω από τους όρους «συμβατότητας» (compliance) και «συμμόρφωσης» (conformance) της παραγωγής.

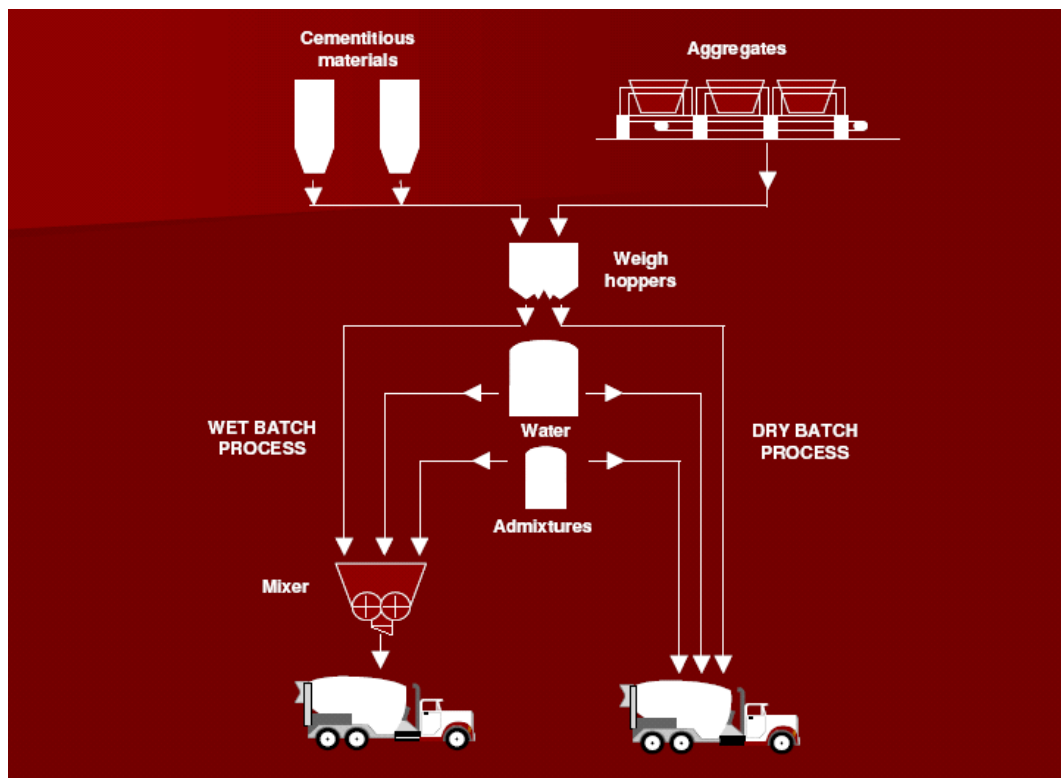
Ο όρος «συμβατότητα» σημαίνει ότι η προσδιοριζόμενη παραγωγή ακολουθεί τις κατευθύνσεις (directives) ενός γενικότερου προτύπου (specification) ως σύνολο κανόνων, ενώ ο όρος «συμμόρφωση» επιδέχεται την ερμηνεία ότι το εν λόγω παραγόμενο σκυρόδεμα ακολουθεί ένα συγκεκριμένο ειδικού τύπου πρότυπο (π.χ. BS EN 197-1). Η τελευταία παρατήρηση σημαίνει ότι ένα σκυρόδεμα που ενδεχόμενα παράγεται κάτω από ένα πρότυπο που επιτάσσει ένα σύνολο κανόνων, ενδεχόμενα μπορεί να είναι ή να μην είναι αποδεκτό εξεταζόμενο υπό ένα άλλο πρότυπο που έχει θεσπιστεί ειδικά και θεωρείται κατάλληλο για την αποδοχή της ποιότητας του σκυροδέματος, επικεντρωμένα σε ειδικά γεωγραφικά κριτήρια ή ως προτεινόμενο για ειδικού τύπου κατασκευές.

Θα πρέπει να αναφερθεί, λαμβάνοντας υπόψη την ανωτέρω διευκρίνηση, ότι ο όρος συμβατότητα χρησιμοποιείται λανθασμένο σε παλαιότερες οδηγίες/κανόνες (π.χ. BS 5328). Ως «συμβατότητα» λοιπόν, ορίζεται το σύνολο των ελέγχων καθώς και η αξιολόγηση των αποτελεσμάτων που αναλαμβάνεται από τον παραγωγό σκυροδέματος, με στόχο να αποδείξει ότι το σκυρόδεμα που παράγεται στο εργοστάσιο (plant) υπό τον έλεγχο του συμμορφώνεται στο σύνολο κανόνων που αφορούν στην παραγωγή του (specification).

Ως «έλεγχος ταυτότητας σκυροδέματος», εννοούνται οι έλεγχοι (tests) που αναλαμβάνονται από τον αρμόδιο για την εφαρμογή του ελέγχου ποιότητας (specifier), με στόχο να εξακριβωθεί εάν μια παρτίδα σκυροδέματος ή ένα σύνολο από ομάδες παραγόμενων σκυροδεμάτων προέρχονται από ένα πληθυσμό που συμμορφώνεται με τους κανόνες.

4.2. Οι δομικές μονάδες ενός εργοστασίου παραγωγής σκυροδέματος

Στο σχήμα που ακολουθεί παρουσιάζονται οι λειτουργικές μονάδες που συνιστούν ένα σύγχρονο εργοστάσιο παραγωγής σκυροδέματος:



Σχήμα 1: Οι λειτουργικές μονάδες ενός σύγχρονου εργοστασίου παραγωγής σκυροδέματος

Από το ανωτέρω σχήμα διακρίνουμε ότι οι μονάδες επικεντρώνονται στα αρχικά υλικά του μίγματος έως τους σταθμούς ζύγισης, την προσθήκη νερού και προσθετικών στο μίγμα.

Ο έλεγχος παραγωγής των δομικών μονάδων ενός εργοστασίου σκυροδέματος συντίθεται από όλα τα απαιτούμενα και αναγκαία μέτρα για την διατήρηση των ιδιοτήτων του σκυροδέματος σύμφωνα με τις απαιτήσεις συμμόρφωσης του προτύπου.

Αναλυτικότερα ο έλεγχος παραγωγής σκυροδέματος όπως συντελείται σε πρακτικό επίπεδο σε ένα εργοστάσιο παραγωγής, περιλαμβάνει:

- *Επιλογή των υλικών σύνθεσης του σκυροδέματος*
- *Καθορισμό των αναλογιών μίξης*
- *Διαδικασία Παραγωγής σκυροδέματος*
- *Επίβλεψη του εργοστασίου παραγωγής με ελέγχους*
- *Χρησιμοποίηση των αποτελεσμάτων ελέγχων επί των υλικών σύνθεσης σε δοκίμια μετρήσεων, που έχουν ωριμάσει φυσιολογικά αλλά είναι σχετικά πρόσφατα (μικρότερα αυστηρά του ενός χρόνου)*
- *Έλεγχο συμμόρφωσης*

Στην πραγματικότητα αυτό που εφαρμόζεται στις μονάδες παραγωγής σκυροδέματος, αφορά στην παραγωγή σκυροδεμάτων καθορισμένου τύπου που επαληθεύονται από ελέγχους σε συνδιασμό με σύγχρονα συστήματα ανάλυσης/σύνθεσης (όπως η χρήση μοντέλων με υπολογιστή και χρήση ειδικού λογισμικού για τον καθορισμό της ανάμιξης) έτσι ώστε να επιτευχθεί η κατάλληλη αναλογία υλικών σύνθεσης. Επιπλέον στην ανωτέρω μεθοδολογία, έμφαση δίνεται στην διατήρηση των ανωτέρω ιδιοτήτων καθώς και στα επίπεδα αντοχής σε θραύση του σκυροδέματος. Η εξάρτηση των επιπέδων αντοχής θραύσεως στα μοντέλα που χρησιμοποιεί το εργοστάσιο αναφέρεται διεξοδικά σε όλα τα διαθέσιμα υλικά πρόσμιξης για την παραγωγή στο εργοστάσιο.

Όταν η παραγωγή υπόκειται στην εφαρμογή ενός κανονισμού, οι αναλογίες μιγμάτων σύνθεσης λαμβάνονται κατά τρόπο έτσι ώστε:

- Να συμμορφώνονται στους περιορισμούς που επιβάλλονται στα υλικά πρόσμιξης.
- Να επιτυγχάνουν τα επίπεδα αντοχής θραύσεως συν επιπλέον ένα όριο ασφαλείας (1.64 x σ).
- Να ικανοποιούν την μέγιστη αναλογία w/c (για τον λόγο αυτόν επιβάλλεται η συγκεκριμένη αναλογία να είναι κατ'ελάχιστον μικρότερη κατά 0.02 από την μέγιστη καθοριζόμενη τιμή για τον συγκεκριμένο τύπο).

- Να ικανοποιούν τα ελάχιστα επίπεδα περιεκτικότητας σε τσιμέντο.

Στην πράξη το εργοστάσιο παραγωγής σκυροδέματος:

Για ευκολία, εάν οι αναλογίες των υλικών σύνθεσης του σκυροδέματος ελέγχονται από την μέγιστη τιμή της αναλογίας w/c είτε από την ελάχιστη τιμή της περιεκτικότητας σε τσιμέντο, ο υπεύθυνος για την παραγωγή του σκυροδέματος θα αναγάγει αυτές σε ένα ισοδύναμο επίπεδο αντοχής θραύσεως, για να λειτουργήσει την παραγωγή του εργοστασίου κάτω από αυτό το κριτήριο.

4.3. Έλεγχος Παραγωγής – Εργοστάσιο σε πραγματική λειτουργία

Για λόγους καλύτερου ελέγχου της παραγωγής, το σκυροδέμα με τις προκαθορισμένες αναλογίες μίξεως, εντάσσεται σε μία κλάση αντοχής σκυροδέματος.

Από πλευράς παραγωγής και λειτουργίας, το εργοστάσιο θα πρέπει να ελέγχεται τακτικά και προγραμματισμένα. Επιπλέον θα πρέπει να ελέγχονται οι παραγόμενες παρτίδες σκυροδέματος ως προς την ακρίβεια παραγωγής τους. Για καλύτερο καθορισμό των αναλογιών σύνθεσης στην Μεγάλη Βρετανία, τα βάρη των υλικών που χρησιμοποιούνται κατά την πρόσμιξη καθορίζονται σε ειδικές επιφάνειες οι οποίες διασφαλίζουν δεδομένα επίπεδα ξηρότητας (αποφυγή υγρασίας).

Επιπλέον για την διασφάλιση των επιπέδων υγρασίας των υλικών, τα εργοστάσια παραγωγής σκυροδέματος στην γραμμή παραγωγής προβλέπουν ειδικούς φούρνους (υψικάμινοι) μέσα στους οποίους τα υλικά προθερμαίνονται για να ελαχιστοποιηθούν τα επίπεδα υγρασίας των υλικών σύνθεσης.

4.3.1. Η παραγωγή σκυροδέματος και τα επίπεδα υγρασίας των υλικών σύνθεσης

Ο κανόνας ανάμιξης υλικών σύνθεσης θα πρέπει να λάβει υπόψην του, οποιαδήποτε από τα επίπεδα υγρασίας που αναφέρονται στα επιμέρους υλικά.



Σχήμα 2: Γραμμή μεταφοράς μετά την αφύγρανση των υλικών σύνθεσης του σκυροδέματος

Η ύπαρξη υγρασίας στα υλικά σύνθεσης απαιτεί την χρήση μετρήσεων της υγρασίας από μετρητές (probes) για να καθορισθούν τα επίπεδα της. Για σκυροδέματα μη ειδικού τύπου είναι ικανοποιητική η προσθήκη νερού μέχρι το παραγόμενο σκυροδέμα να επιτύχει τα επίπεδα αντοχής θραύσεως. Η παραπάνω προσέγγιση (δηλ. της αρχικής αφύγρανσης των συστατικών σύνθεσης και η επραιτέρω προσθήκη εκ νέου στο μίγμα νερού εφόσον αυτό κρίνεται απαραίτητο), διευκολύνει τον καθορισμό με ακρίβεια των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν καθώς και των φυσικών ιδιοτήτων του παραγόμενου σκυροδέματος.

4.3.2. Η αυτοματοποίηση και οι σύγχρονες ηλεκτρονικές μετρητικές διατάξεις στα εργοστάσια παραγωγής σκυροδέματος

τα εργοστάσια παραγωγής σκυροδέματος παλαιού τύπου προοδευτικά αντικαθίστανται από εργοστάσια ελεγχόμενα από ηλεκτρονικούς υπολογιστές εφοδιασμένους με σύγχρονα καταγραφικά μηχανήματα, τα οποία χρησιμοποιούνται για να καταγράψουν όλες τις ενέργειες κατά την φάση παραγωγής.

Σε πολλά σύγχρονα εργοστάσια παραγωγής ο έλεγχος όλων των μονάδων παραγωγής μπορεί να γίνει ακόμα και με κεντρικό χειρισμό από έναν πίνακα ελέγχου της μονάδας παραγωγής. Η σύγχρονη τεχνολογία ελαχιστοποιεί την πιθανότητα εσφαλμένης παραγωγής αλλά δεν εκμηδενίζει ποτέ τον παράγοντα αστοχίας. Για τον λόγο αυτό η εξέλιξη των υπάρχοντων συστημάτων καθώς και η ανθρώπινη παρέμβαση εξακολουθούν να κρίνονται αναγκαίες.



Σχήμα 3: Σύγχρονες ηλεκτρονικές μετρητικές διατάξεις συνδεδεμένες με ηλεκτρονικούς υπολογιστές στα εργοστάσια παραγωγής σκυροδέματος

Όταν παράγεται σκυρόδεμα, ο παραγωγός (εργοστάσιο) θα ενσωματώσει τα υλικά στις σωστές αναλογίες και τα οποία θα προσδώσουν τα κατάλληλα επίπεδα αντοχής θραύσεως στο παραγόμενο σκυρόδεμα. Όταν το αποτέλεσμα παραγωγής ελεγχθεί, θα διαπιστωθούν πάντα αποκλίσεις από την επιθυμητή κεντρική τιμή μέσης αντοχής, οι οποίες οφείλονται σε φυσικές και μη αιτίες που συνδέονται με την διαδικασία παραγωγής.

Το σύστημα ελέγχου παραγωγής οφείλει να διαπιστώσει αυτές τις αποκλίσεις. Επιπλέον, θα πρέπει να μπορεί να προβεί σε ενέργειες αποκατάστασης εφόσον αυτό είναι αναγκαίο, και οι οποίες μπορεί να αφορούν στην διόρθωση των συστατικών του μίγματος. Η μεθοδολογία CUSUM όπως έχει δειχθεί και στα προηγούμενα κεφάλαια της παρούσας εργασίας, αποτελεί το κυρίαρχο εργαλείο του Σ.Ε.Δ. ως εργαλείο διαπίστωσης αυτών των αποκλίσεων.

4.3.3. Μορφές των παρατηρούμενων αποκλίσεων

Οι αιτίες απόκλισης από τα επιθυμητά επίπεδα αντοχής θραύσεως μιας παρτίδας σκυροδέματος οφείλονται κατά κύριο λόγο στα επίπεδα μίξεως των υλικών και κυρίως του τσιμέντου (ως συστατικό του σκυροδέματος που επιδρά καταλυτικά στην αντοχή θραύσεως του). Οι εμφανιζόμενες αλλαγές στις μετρήσεις εμφανίζουν μία ασυνεχή βηματική υφή. Η μέση απαιτούμενη αντοχή από κάθε κλάση σκυροδέματος έχει επιλεγεί κατά τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε μικρές μεταβολές στα υλικά μίξεως του παραγόμενου σκυροδέματος να μην οδηγήσουν σε απόρριψη του παραγόμενου τύπου.

Ο ρόλος του παραγωγού σκυροδέματος είναι να ανιχνεύσει το συντομότερο δυνατόν τις αποκλίνουσες αυτές τάσεις. Όπως εκτενώς συζητήθηκε στις προηγούμενες παραγράφους, δοκίμια πρώιμης γήρανσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διευκολύνουν αυτήν την γρήγορη ανίχνευση, όμως θα πρέπει να σημειωθεί ότι δοκίμια μικρότερης ωρίμανσης των 7 ημερών (π.χ. 3 ημερών) ή επιταχυνόμενης γήρανσης δεν φαίνεται να αποδίδουν σε μετρήσεις κετίμησης της αντοχής.

Τα εργοστάσια παραγωγής σκυροδέματος παράγουν έτοιμους τύπους χρησιμοποιώντας σαφείς καθορισμούς συστατικών για κάθε έναν από αυτούς. Όταν η παραγωγή αναφέρεται σε ένα σύνολο (κλάση) σκυροδεμάτων είναι προφανές ότι μια μεταβολή των συστατικών ή των ιδιοτήτων ενός στοιχείου σύνθεσης θα επιδράσει και στην Οι εκτεταμένες χρήσεις του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών στον τομέα της Δομοστατικής

παραγωγή των υπολοίπων τύπων που παράγονται εκείνη την περίοδο στο εργοστάσιο. Ο ρόλος της οικογένειας σκυροδέματος είναι στο να βοηθήσει στην εύκολη και γρήγορη εξακρίβωση ατών των μεταβολών στις ιδιότητες του παραγόμενου σκυροδέματος.

Ο χρόνος καθυστέρησης για αυτήν την ανίχνευση είναι αναπόφευκτος. Ευθύνη των διαδικασιών ελέγχου και του παραγωγού είναι να καθορίσει μία χρονική περίοδο ελέγχου της λειτουργίας του εργοστασίου (π.χ. διάστημα λήψης δειγμάτων από την παραγωγή) έτσι ώστε κατά μέσον όρο να επιτυγχάνει συμμόρφωση του παραγόμενου σκυροδέματος με τις απαιτούμενες μέσες τιμές αντοχής της κλάσης στην οποία αυτό ανήκει.

Το σκυροδέμα το οποίο παράγεται και λαμβάνεται σε ένα σύντομο χρονικό διάστημα από το εργοστάσιο παραγωγής έχει μικρή πιθανότητα να έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά από το προηγούμενο δείγμα, έτσι ώστε να χρησιμοποιηθούν ως διαδοχικά δοκίμια αξιολόγησης της παραγωγής. Επομένως χρειάζεται να σταθμιστεί μία περίοδος λήψης δειγμάτων η οποία να επιτρέπει αφενός την διαφοροποίηση των χαρακτηριστικών του παραγόμενου σκυροδέματος και αφετέρου να μην επιτρέπει την αδράνεια του συστήματος ελέγχου στην λήψη γρήγορης και έγκαιρης απόφασης.

4.3.4. Τα ωφέλη στην παραγωγή από την κατηγοριοποίηση των σκυροδεμάτων σε οικογένειες

Η κατάταξη του σκυροδέματος σε οικογένειες επιτρέπει την πιο γρήγορη ανίχνευση στις μεταβολές αντοχής θραύσης του παραγόμενου σκυροδέματος. Επιπλέον βελτιστοποιεί την λειτουργικότητα του συστήματος ελέγχου παραγωγής και κάνει πρακτικά υλοποιήσιμη και εφαρμόσιμη (ρεαλιστικά και οικονομικά) την μεθοδολογία ελέγχου παράλληλα μεγάλου αριθμού σκυροδεμάτων από το ίδιο εργοστάσιο.

Μία οικογένεια σκυροδέματος, όπου σαφώς καθορισμένες σχέσεις των συστατικών και των ιδιοτήτων αντοχής είναι καθορισμένες, αναφέρεται στο πρότυπο BS EN 206-1.

4.4. Εργοστάσιο παραγωγής σκυροδέματος και πρακτική εφαρμογή του ελέγχου

Τα βασικά στοιχεία για την εφαρμογή τεχνικών πρακτικού και υλοποιήσιμου ελέγχου, σε ένα εργοστάσιο παραγωγής σκυροδέματος, είναι:

- Επιλογή των οικογενειών σκυροδέματος (όπου το παραγόμενο σκυρόδεμα ανήκει)
- Επιλογή ενός σκυροδέματος Αναφοράς (Ανά Οικογένεια)
- Καθορισμός των σχέσεων μεταβολής των συστατικών του σκυροδέματος και των ιδιοτήτων αντοχής θραύσεως
- Καθορισμός αναλογιών μίγματος
- Αντιστοίχιση των αποκομιζόμενων δεδομένων από τον ποιοτικό έλεγχο του σκυροδέματος και σύγκριση με τις αντίστοιχες ιδιότητες του σκυροδέματος αναφοράς.

4.4.1. Επιλογή της Οικογένειας Σκυροδέματος

Η επιλογή της οικογένειας σκυροδέματος αφορά σκυρόδεμα ενός τύπου, καθορισμένης αντοχής και προέλευσης. Τα συστατικά τα οποία συνθέτουν αυτήν την οικογένεια, αφορούν στον καθορισμό των συστατικών είτε αφορούν σε προσθήκη νερού είτε άλλων υλικών πρόσμιξης.

4.4.2. Καθορισμός των σχέσεων αναλογίας συστατικών και επιτεύξιμης αντοχής θραύσεως

Για την ανάπτυξη των σχέσεων που συνδέουν τις αναλογίες μίγματος με την αντοχή θραύσης, κάθε σκυρόδεμα της οικογένειας συγκρίνεται με το σκυρόδεμα αναφοράς της. Η σύγκριση αυτή καταδεικνύει τον καθορισμό των μεταβολών των αναλογιών των συστατικών του υπό εξέταση σκυροδέματος σε σχέση με το σκυρόδεμα αναφοράς.

Ο καθορισμός των αναλογιών για τον προσδιορισμό της αντοχής αφορά μίγματα δοκιμών (Annex A του προτύπου EN 206-1). Επιπλέον ο καθορισμός μπορεί να βασιστεί κάνοντας χρήση δεδομένων καταγραφής από το ιστορικό λειτουργίας του εργοστασίου ή την χρήση θεωρητικών μοντέλων όπως αυτά έχουν εξαχθεί και επαληθευτεί από πειραματικά δεδομένα.

4.4.3. Καθορισμός των δευτερευουσών σχέσεων της αναλογίας συστατικών σε σχέση με την επιτεύξιμη αντοχή θραύσεως

Δευτερεύουσες σχέσεις οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον καθορισμό της σχέσης αντοχής θραύσεως βάσει των συστατικών του μίγματος, μπορεί να λάβει υπόψην τις αποκλίσεις από το μίγμα αναφοράς, τα μεγέθη των συστατικών πρόσμιξης, την προσθήκη παραγόντων WRA και την προσθήκη άμμου στο σκυρόδεμα.

4.5. Συμμόρφωση και Έλεγχος Ταυτότητας Σκυροδέματος

Όπως ήδη συζητήθηκε η συμμόρφωση, ως διεργασία, αποτελεί αντικείμενο που αναλαμβάνεται από τον παραγωγό σκυροδέματος με στόχο να επαληθεύσει ότι το σκυρόδεμα που επιλέχθηκε από τον πελάτη είναι πράγματι αυτό που απεστάλη. Οι νέοι έλεγχοι συμμόρφωσης κατήγγησαν το πρότυπο BS 5328. Ο έλεγχος συμμόρφωσης λαμβάνει υπόψην τις ιδιότητες και τους περιορισμούς του προτύπου BS 8500.

4.5.1. Χρόνος Δειγματοληψίας

Ο έλεγχος συμμόρφωσης βασίζεται σε δεδομένα τα οποία προκύπτουν από την φάση/περίοδο ελέγχου. Ο παραγωγός είναι υπεύθυνος για την εκλογή, την διάρκεια και την περιοδικότητα της φάσης ελέγχου. Η συγκεκριμένη περίοδος δεν μπορεί να είναι μεγαλύτερη από 1 χρόνο, διότι σε αυτήν την περίπτωση τα δοκίμια έχουν ωριμάσει υπερβολικά και τα αποτελέσματα δεν είναι χρήσιμα για την εφαρμογή δράσεων στο εργοστάσιο. Η περίοδος ελέγχου μπορεί να διαφοροποιείται για διαφορετικές προσεγγίσεις ελέγχων συμμόρφωσης. Επιπλέον η περίοδος συμμόρφωσης μπορεί να λαμβάνει υπόψην της το πλήθος των δοκιμών ελέγχου που αποκομίζονται κατά την περίοδο εφαρμογής της καθώς και την χρονική διάρκεια της.

4.5.2. Χώρος Δειγματοληψίας

Δεδομένου ότι οι ιδιότητες σύνθεσης του σκυροδέματος όπως αυτές αποκομίζονται από τα δοκίμια προς έλεγχο δεν μεταβάλλονται, είτε τα δοκίμια ληφθούν στον χώρο του εργοστασίου, είτε τα δοκίμια ληφθούν στον χώρο κατασκευής του χρήστη, η δειγματοληψία επιτρέπεται να γίνεται στον χώρο του κατασκευαστή.

4.5.3. Συμμόρφωση σε αντοχή θραύσεως με βάση τους τύπους παραγωγής

Η συμμόρφωση σε αντοχή θραύσεως διακρίνει δύο τύπους στην παραγωγή: (α) την αρχική φάση παραγωγής (initial) και (β) τα ενδιάμεσα προϊόντα παραγωγής (continuous). Κατά την φάση συνεχούς λήψης δοκιμίων, τα πρότυπα ορίζουν την χρήση κατ'ελάχιστον ενός αριθμού δοκιμίων για την εφαρμογή ελέγχων (π.χ. $n \geq 35$). Εάν κατά την εφαρμογή των δεδομένων ελέγχων αποδειχθεί ότι τα επίπεδα παραγωγής «νοσούν» όσον αφορά στην επίτευξη των προδιαγραφών, οι κανόνες ελέγχου της παραγωγής συνεχούς χρόνου θα πρέπει να εναλλαχθούν από τους αντίστοιχους κανόνες ελέγχου παραγωγής αρχικής φάσης.

Οι ανωτέρω έλεγχοι εφαρμόζονται είτε σε μεμονωμένα σκυροδέματα είτε σε οικογένειες σκυροδεμάτων. Σκυροδέματα βαρέως και ελαφρού τύπου σε καμία περίπτωση δεν θα πρέπει να ανήκουν στην ίδια οικογένεια. Όλα τα υπόλοιπα σκυροδέματα επιτρέπεται να ομαδοποιούνται σε οικογένειες. Στην περίπτωση ομαδοποίησης σε οικογένειες, οι αντίστοιχες σχέσεις εξάρτησης αντοχής θραύσεως – συστατικών θα πρέπει να εξαχθούν για όλα τα μέλη της οικογένειας. Οδηγίες για την συγκρότηση οικογενειών δίνονται στα πρότυπα BS EN 206-1, Annex K. Η χρήση των σκυροδεμάτων οργανωμένων σε οικογένειες είναι μια διαδικασία καλά εδραιωμένη στα εργοστάσια παραγωγής σκυροδέματος της Μεγάλης Βρετανίας.

4.5.4. Συμμόρφωση σε αντοχή θραύσεως σε συνεχή παραγωγή

Ο παραγωγός σκυροδέματος μπορεί να επιλέξει την εφαρμογή των μεθόδων τόσο σε επικαλυπτόμενες όσο και σε μη επικαλυπτόμενες παρτίδες δειγμάτων. Τα κριτήρια κυρίως αναφέρονται σε μη επικαλυπτόμενες παρτίδες δειγμάτων.

Το κριτήριο ελέγχου της αρχικής παραγωγής παραμένει αμετάβλητο.

Πρακτικά αναφέρεται ότι εντός 15 δειγμάτων υπάρχει 30% πιθανότητα απόρριψης μιας ομάδας (ενός πληθυσμού) που γενικά θεωρείται ότι επιτυγχάνει τα απαιτούμενα χαρακτηριστικά αντοχής.

4.5.5. Εναλλακτικές μέθοδοι συμμόρφωσης

Μια εναλλακτική προσέγγιση συμμόρφωσης μπορεί να εφαρμοσθεί με χρήση επιπέδων (attributes). Αυτή η προσέγγιση βασίζεται στο γεγονός ότι τα αποτελέσματα θα πρέπει να εμπίπτουν εντός των ορίων κλάσεως/ομάδας τόσο όσον αφορά στα επίπεδα αντοχής όσο αντίστοιχα και στα επίπεδα των ανοχών παραγωγής. Επιπρόσθετα μπορούν να χρησιμοποιηθούν κριτήρια μέγιστων/ελάχιστων ορίων αντοχής για ανεξάρτητες (μεμονωμένες) παρτίδες.

4.5.6. Άλλες παράμετροι που χρησιμοποιούνται στον έλεγχο συμμόρφωσης

Πέρα από την ευρύτητα διαδεδομένη μεθοδολογία ελέγχου συμμόρφωσης η οποία αναφέρεται κυρίως στον έλεγχο αντοχής θραύσης δοκιμίων οι παρακάτω παράμετροι μπορούν να χρησιμοποιηθούν:

- Πυκνότητα σκυροδέματος
- Αναλογία νερού / τσιμέντου στο μίγμα (w/c ratio)
- Ποσοστά περιεκτικότητας τσιμέντου
- Περιεχόμενα/εγκλωβισμένα ποσοστά αέρα

4.6. Πρότυπα Συμμόρφωσης Σκυροδέματος

Η δήλωση συμμόρφωσης σκυροδέματος βασίζεται στο πρότυπο BS 8500-2 για τα Βρετανικά επίπεδα προτυποποίησης. Οι προσθήκες στο ανωτέρω πρότυπο απαιτούν συμμόρφωση αντίστοιχα με το κύριο πρότυπο BS EN 206-1. Για τον λόγο αυτό η συμμόρφωση με το ένα πρότυπο, αυτόματα συνιστά συμμόρφωση και με το άλλο.

4.7. Ενέργειες κατά την μη-συμμόρφωση

Όταν η μη συμμόρφωση της παραγωγής με το πρότυπο επαληθευτεί ο χρήστης του σκυροδέματος θα πρέπει να ειδοποιηθεί άμεσα από τον παραγωγό. Εφόσον η μη συμμόρφωση είναι εμφανής κατά την φάση της παράδοσης, ο χρήστης μπορεί να επιλέξει την αποδοχή ή όχι της παρτίδας. Μη ανιχνεύσιμες συμμορφώσεις συνήθως αφορούν στις παραμέτρους αντοχής σε θραύση, λόγου w/c ή περιεκτικότητας του σκυροδέματος σε τσιμέντο.

Ο παραγωγός σκυροδέματος είναι υπεύθυνος για τον έλεγχο των δεδομένων από τα δοκίμια σκυροδέματος και κατά πόσον αυτά εισάγονται σωστά ή όχι στα συστήματα του. Ο παραγωγός είναι επίσης υπεύθυνος για τον εντοπισμό/ανίχνευση της μη συμμόρφωσης καθώς και των χρονικών περιόδων όπου αυτή διαπιστώθηκε.

Το σκυρόδεμα δηλώνεται ως μη συμμορφούμενο στην περίπτωση που παραβιάζει τις προϋποθέσεις και τους όρους του προτύπου BS EN 206-1 απράγραφος 8.

Σε όλες τις περιπτώσεις ο παραγωγός σκυροδέματος είναι υπεύθυνος για την ανίχνευση, για την δήλωση αλλά και για τα απαιτούμενα μέτρα επαναφοράς της παραγωγής.

4.8. Ενέργειες αποκατάστασης

Στην περίπτωση που η αιτία μη συμμόρφωσης του σκυροδέματος ήταν αποτέλεσμα ύπαρξης νερού ή άλλων προσθηκών στο μίγμα, ο παραγωγός θα πρέπει να αναλάβει δράση αποκατάστασης εφόσον κάνει χρήση αυτών των προσθηκών στο μίγμα.

4.9. Βεβαιώσεις (Πιστοποιήσεις) συμμόρφωσης

Συνήθως η βεβαίωση συμμόρφωσης είναι σωστό να παρέχεται από τρίτους φορείς οι οποίοι δεν είναι άμεσα σχετιζόμενοι με την παραγωγό ή τον χρήστη. Στην περίπτωση

αυτή παρέχεται η μέγιστη διασφάλιση για τον παραγωγό σκυροδέματος όπως και για τον χρήστη αυτού.

4.10. Ταυτοποίηση Σκυροδέματος και σχέση με την συμμόρφωση

Ο έλεγχος ταυτοποίησης ενός σκυροδέματος δεν συνιστά μέρος των διαδικασιών συμμόρφωσης. Η συγκεκριμένη διαδικασία μπορεί να αναληφθεί είτε από τον παραγωγό (διαχειριστή του συστήματος ελέγχου παραγωγής), είτε από τον χρήστη.

Η ανωτέρω διαδικασία επαληθεύει ότι η παρτίδα σκυροδέματος προέρχεται από έναν συμμορφούμενο πληθυσμό.

Πρότυπα που σχετίζονται με την αντοχή θραύσης: BS EN 206-1.

Πρότυπα που σχετίζονται με την συμμόρφωση πυκνότητας, κάμψης, και εγκλωβισμένου αέρα: BS 8500-1, Annex B.

Όταν για τον έλεγχο και την ταυτοποίηση του σκυροδέματος χρησιμοποιούνται δευτερεύουσες παράμετροι όπως παράμετροι κάμψης, πυκνότητα και περιεκτικότητα μίγματος σε εγκλωβισμένο αέρα, τα κριτήρια συμμόρφωσης εφαρμόζονται με ανάλογο τρόπο όπως στην περίπτωση ενός διακριτού αριθμού δειγμάτων. Οι έλεγχοι ταυτοποίησης ενός σκυροδέματος ενδείκνυνται όταν υπάρχει αμφιβολία για την ποιότητα μιας παρτίδας σκυροδέματος, σε τοπικούς ελέγχους του παραγωγού, για ειδικού τύπου σκυροδέματα (π.χ. σκυρόδεμα υψηλής αντοχής). Τακτικοί έλεγχοι ταυτοποίησης δεν απαιτούνται.

4.11. Μηχανισμοί Διασφάλισης Ποιότητας Παραγωγής (ISO) και τα πρότυπα παραγωγής σκυροδέματος

Η διαδικασία διασφάλισης Ποιότητας Παραγωγής (ISO) για την παραγωγή σκυροδέματος βασίζεται στο πρότυπο EN 206-1. Το εν λόγω πρότυπο δεν ακολουθεί τους κανονισμούς συμμόρφωσης CEN, παρά το γεγονός ότι το ISO standard μπορεί να θεωρηθεί συμβατό με τις οδηγίες συμμόρφωσης κατά CEN. Επεκτάσεις του μηχανισμού συμμόρφωσης οι οποίες βασίζονται στην Επιλογή B (Option B), απαιτούν ο παραγωγός σκυροδέματος να διατηρεί τα επίπεδα παραγωγής σκυροδέματος εντός των ορίων του στατιστικού ελέγχου.

Από τις γενικές αρχές που ρυθμίζουν την λειτουργία υπό το πρότυπο ISO είναι εμφανές ότι το ανωτέρω πρότυπο συμφωνεί και καθιερώνει μια μεθοδολογία για την επίτευξη μιας εργασίας αλλά δεν μπορεί να ορίσει συγκεκριμένες τιμές για την συμμόρφωση. Στην περίπτωση που το κενό αυτό δεν ρυθμίζεται από Κανονισμούς σε Εθνικό Επίπεδο, μπορούν να χρησιμοποιηθούν οι αντίστοιχες τιμές από το πρότυπο συμμόρφωσης (π.χ. πρότυπο EN 206-1 Επιλογή A/B Option A/B).

Η Επιλογή A χρησιμοποιεί μη επικαλυπτόμενες ομάδες δειγμάτων ανά 3 και δεν επιτρέπει την χρήση των οικογενειών σκυροδέματος (εκτός σαν προαναφορές της μεθοδολογίας για την Επιλογή B), Στην Επιλογή B δεν χρησιμοποιούνται ειδικά κριτήρια συμμόρφωσης στην παραγωγή του σκυροδέματος αλλά βασίζεται στο γεγονός ότι η παραγωγή στο εργοστάσιο βρίσκεται σε κατάσταση «εντός στατιστικού ελέγχου». Προσεγγίσεις ειδικού τύπου για το σύστημα ελέγχου της παραγωγής μπορούν να βρεθούν στο ISO DIS 22965. Ο οπτικός/ανιχνευτικός έλεγχος αποτελεί επίσης κατά την Επιλογή B ένα ικανό κριτήριο ελέγχου.

4.12. Συστήματα Ελέγχου και Παραγωγή

Σκοπός αυτών των συστημάτων είναι η ανίχνευση τιμών παραγωγής που δεν αναμένονται. Το σύστημα ελέγχου θα πρέπει να διακρίνει φυσικές και μη, μεταβλητότητες που επιδρούν στην παραγωγή. Τα συστήματα που βασίζονται στην CUSUM καθώς και τις παραλλαγές αυτής, που παρουσιάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας, χρησιμοποιούνται ευρέως στην Μεγάλη Βρετανία. Τα ανώτερα και κατώτερα όρια ελέγχου της παραγωγής αφορούν και τον χρήστη αλλά και τον παραγωγό σκυροδέματος. Ο χρήστης ενδιαφέρεται για το ενδεχόμενο αστοχίας από την πλευρά του χαμηλού ορίου αξιολόγησης, ενώ ο παραγωγός από εμπορικής απόψεως ενδιαφέρεται για το ενδεχόμενο παραγωγής το οποίο υπερβαίνει το ανώτερο όριο ελέγχου.

4.12.1. Χρονικά πλαίσια ωρίμανσης δειγμάτων

Τα συστήματα ελέγχου αξιολογούν τα δοκίμια όσον αφορά την αντοχή τους σε θραύση που αντιστοιχεί σε επίπεδα αντοχής ωρίμανσης 28 ημερών βασισμένα όμως σε δοκίμια πρώιμης ωρίμανσης. Τα μοντέλα που βασίζονται σε δοκίμια πρώιμης ωρίμανσης

των 7 ημερών είναι αρκετά αξιόπιστα και τα περισσότερα συστήματα αξιολόγησης αντοχής σε θραύση βασίζονται σε αυτά, ενώ τα αντίστοιχα των 3 ημερών έχουν γενικά κριθεί ως αναξιόπιστα για εκτιμήσεις αντοχής.

4.12.2. Το πρότυπο ISO και το σύστημα ελέγχου

Ο διαρκής έλεγχος της παραγωγής πρέπει να βασίζεται σε εκτιμήτριες της μέσης αντοχής θραύσεως και της τυπικής απόκλισης αυτής, επικεντρώνοντας σε δοκίμια ελέγχου πρώιμης ωρίμανσης. Ισχυρά συστήνεται η χρήση οικογενειών όπου αυτό είναι δυνατόν για την διασφάλιση της παραγωγής. Αξίζει να σημειωθεί ότι από πλευράς ασφάλειας του χρήστη όταν η παρατηρούμενη μέση αντοχή δειγμάτων είναι μεγαλύτερη του απαιτούμενου ελαχίστου, η ενεργοποίηση του συστήματος ελέγχου είναι προαιρετική.

4.13. Γενικά Συμπεράσματα

Ο χώρος παραγωγής σκυροδέματος αποτελεί μία δυναμική βιομηχανία επάνω στην οποία βασίζεται το μεγαλύτερο μέρος της παγκόσμιας αγοράς κατασκευών. Οι τομείς της βιομηχανίας σκυροδέματος απλώνονται σε ένα ευρύ πεδίο εφαρμογών που δεν επικεντρώνεται μόνο σε κτηριακές κατασκευές αλλά επεκτείνεται και σε κατασκευές κτισμάτων κοινής ωφελείας όπως εργοστάσια παραγωγής ηλεκτρικής ενέργειας, φράγματα, οδοποιΐα (λιμάνια, αυτοκινητόδρομοι, αεροδρόμια, κλπ).

Για τον λόγο αυτό η βιομηχανία παραγωγής σκυροδέματος είναι ένας χώρος ο οποίος χρήζει εφαρμογής σύγχρονων τεχνικών για την διασφάλιση της ποιότητας παραγωγής, διότι ενδεχόμενες αστοχίες σε επίπεδα ποιότητας μπορούν να οδηγήσουν σε αστοχίες και καταστροφές μεγάλης κλίμακας (θέτοντας σε κίνδυνο την ζωή πολλών ανθρώπων, προκαλώντας παράλληλα οικονομικές καταστροφές μεγάλης κλίμακας).

Όπως ιστορικά παρουσιάστηκε στα πλαίσια της διπλωματικής, οι τεχνικές ελέγχου της παραγωγής και επικεντρωμένα ο Στατιστικός Έλεγχος Διεργασιών (Σ.Ε.Δ.) αποτελεί μία τεχνική που έχει ευρύ πεδίο εφαρμογών φθάνοντας τις τελευταίες δεκαετίες να εφαρμόζεται και στην παραγωγή σκυροδέματος. Οι τεχνικές Σ.Ε.Δ. ξεκινώντας από τα διαγράμματα Shewart και φθάνοντας με σύγχρονη αιχμή την μεθοδολογία Risk Adjusted CUSUM, βρίσκουν ένα ιδανικό πεδίο εφαρμογής, συνδιάζοντας μαθηματικά από το

θεωρητικό στο πρακτικό πεδίο εφαρμογών. Οι μέθοδοι αυτές δίνουν αξιοπιστία στην παραγωγή επικεντρώνοντας στην ποιότητα του παραγόμενου σκυροδέματος.

Οι μεθοδολογίες που παρουσιάστηκαν στα πλαίσια της διπλωματικής δεν ασχολήθηκαν μόνο με την θεωρητική περιγραφή των μεθόδων ελέγχου, αλλά επικέντρωσαν και στα πρακτικά ζητήματα της παραγωγής σκυροδέματος, λαμβάνοντας υπόψη τις παραμέτρους ελέγχου της παραγωγής που υφίστανται στην πραγματική βιομηχανία.

Οι μέθοδοι αυτές συνιστούν ένα εργαλείο ελέγχου ποιότητας της παραγωγής σκυροδέματος το οποίο δεν συντελεί μόνο στην βελτίωση των τεχνικών χαρακτηριστικών του σκυροδέματος αλλά ταυτόχρονα επιτυγχάνει την μείωση του κόστους παραγωγής του. Το τελευταίο με την σειρά του συντελεί καθοριστικά στην μείωση του συνολικού κόστους στον τομέα των κατασκευών, δίνοντας την δυνατότητα για περαιτέρω ανάπτυξη, εκμετάλλευση και χρήση των κατασκευών ενώ ταυτόχρονα βελτιώνει τα επίπεδα παρεχόμενης ασφάλειας για την επιστήμη της Δομοστατικής.

Θα πρέπει να τονισθεί ότι η ανάπτυξη των τεχνολογιών προϋποθέτει ως βάση την επίτευξη ακρίβειας (είτε σε πολύ μικρή είτε σε πολύ μεγάλη κλίμακα), η οποία είναι δυνατόν να επιτευχθεί μόνο εφόσον μπορεί αξιόπιστα να διασφαλισθεί η ποιότητα και τα τεχνικά χαρακτηριστικά των δομικών υλικών στα οποία βασίζεται.

Επιπλέον η εφαρμογή των θεωρητικών μεθόδων του Σ.Ε.Δ. στον έλεγχο και τον προγραμματισμό των επιπέδων παραγωγής σκυροδέματος συντελεί καθοριστικά στην περαιτέρω βελτίωση των υλικών, δημιουργώντας την βάση για περαιτέρω ανάπτυξη των τεχνολογικών εφαρμογών στον τομέα των κατασκευών. Ο τομέας των κατασκευών αποτελεί ένα ανοιχτό χώρο δραστηριοποίησης και ανάπτυξης γεγονός που συνηγορεί στην μεγαλύτερη ερευνητική επικέντρωση και επιπλέον εξέλιξη των μεθόδων Σ.Ε.Δ. που σχετίζονται με την πρακτική και εφαρμοσμένη παραγωγή.

Έτσι η εφαρμογή των μεθοδολογιών Σ.Ε.Δ. έχει ένα μεγάλο δρόμο περαιτέρω συνεισφοράς στην βελτίωση και στην ανάπτυξη νέων τεχνικών για την μεγαλύτερη διασφάλιση των επιπέδων ποιότητας της παραγωγής σκυροδέματος αλλά και γενικότερα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] Akaike, H. (1977). On entropy maximization principle. *Applications of Statistics* (Krishnaiah, P.R., ed.), North Holland: Amsterdam, pp. 27-41.
- [2] Antoniadis, A. (1997). Wavelets in statistics: a review (with discussion). *J. Italian Statist. Assoc.*, **6**, pp. 97-144.
- [3] Bird, J. (2007). *Engineering Mathematics*, 5th edn, Elsevier.
- [4] British Organization. (2002). Concrete-Complementary British Standard to BS EN 206-1, Method of specifying and guidance for the specifier.
- [5] British Standard Institution. (2000). Concrete - Part 1: Specification, performance, production and conformity, *EN 206-1*.
- [6] British Standards Institution. (2003). *Guide to data analysis and quality control using CUSUM techniques*, BS 5703:2003.
- [7] British Standards Institution. (2004). *Process control using quality control chart methods and CUSUM techniques*, BS5700, pp. 32-34.
- [8] Brown, B.V. (1984). *Monitoring concrete by the CUSUM system*, Concrete Society Digest No.6, pp. 7-15.
- [9] Brown, B.V. (1984). *Monitoring concrete by the cusum method*, London:Concrete Society (Concrete Society no.6) , pp. 40-87.
- [10] Bruker, AXS. (2007). *Process and Quality Control in Cement Production* (ASTM C 114), Lab Report XRF 79, pp. 113-155.
- [11] BSEN 206-1. (2000), *Concrete specification, performance, production and conformity*. British Standard Institute , pp. 12-24.
- [12] Laungrungrong, B., Mobasher, B., Montgomery, D. and Borrer. C.M. (2010). Hybrid Control Charts for Active Control and Monitoring of Concrete Strength, *Journal of Materials in Civil Engineering*, pp. 77-87.
- [13] Caspell, R. and Taerwe, L. (2010). *Combined production and conformity control of concrete with acceptance CUSUM control charts*, Proceedings of the 7th International Probabilistic Workshop, pp.73-86.

- [14] CEN. (2000). *Product standards and conformity assessment guideline, CEN/BT N6287, 1109.*
- [15] Chen, K. S., Sung, W. P., and Shih, M. H. (2005). *Reliable evaluation method of quality control for compressive strength of concrete. J. Zhejiang Univ., Sci., 6A(8) , pp. 836-843.*
- [16] Commonwealth of Pennsylvania Department of Transportation. (2011). *Concrete Field Testing Technician Certification Training Manual*, pp. 10-47.
- [17] Cook, J. (2002). *Evaluation of Strength Test Results of Concrete*, American Concrete Institute.
- [18] Cox, D. R. (1972). Regression models and life-tables. *J.Roy. Statist. Soc. Ser. B.*, 34, pp. 187-220.
- [19] Day, K. W. (1999), *Concrete mix design, quality control and specification*, 2nd edition, pp. 56-68.
- [20] Day, K. W. (2006). *Multigrademultivariable CUSUM quality control*, 8th CANMET/ACI International Conference on advances in concrete technology, Montreal, pp. 89-124.
- [21] Day, K. W. (2007). *Concrete mix design, quality control and specification*, 3rd edition, pp. 82-105.
- [22] Debasis, S. (2008). *Design and Application Of Risk Adjusted Cumulative Sum (RACUSUM) for Online Strength Monitoring of Ready Mixed Concrete*, Indian Institute of Management Ahmedabad-India, pp. 23-34.
- [23] Dewar, J. D., and Anderson, R. (2003). *Manual of Ready-Mixed concrete*, 2nd edition, pp. 17-45.
- [24] Dr. Talib S. J. (2008). *Applying Some Quality Controls Charts to Study the strength of Building Concrete Blocks and Clay Buildings Bricks*, University of Sulaimani, pp. 30-65.
- [25] Dowell A., and Prof. Cramer, S. (2002). *Field Measurement of Water-Cement Ratio for Portland Cement Concrete – Phase II Field Evaluation and Development*. University of Wisconsin-Madison Department of Civil and Environmental Engineering, pp. 27-55.
- [26] Fu, W. J. (1998). Penalized Regression: The Bridge Versus the LASSO. *Journal of Computational and Graphical Statistics*, 7, pp. 397–416.
- [27] Gibb, I., and Harrison, T. (2010). *Use of Control charts in the production of concrete* , ERMCO Report , European Ready Mixed Concrete Organization, pp. 53-54.

- [28] Hardin J. W., and Hilbe, J. M. (2007). *Generalized Linear Models and Extensions*, 2nd Ed., College Station, TX: Stata Press, pp. 82-104.
- [29] Harrison T. (2003). Modern concept and approach to control of quality of production of concrete, pp. 39–41.
- [30] Harrison T. et al, (2001). *Guidance on the application of the EN 206-1 conformity rules*, Quarry Products Association, (available for free downloading from the MPA-BRMCA web site), pp. 37–52.
- [31] Hurvich, C. M., and Tsai, C. L. (1989). Regression and time series model selection in small samples. *Biometrika*, 76, pp. 297-307.
- [32] International Standards Organization. (1993) *Acceptance control charts*, ISO7966.
- [33] International Standards Organization. (1991). *Shewhart control charts*, ISO8258.
- [34] International Standards Organisation. (1997). *Cumulative sum charts - Guidance on quality control and data analysis using CUSUM techniques*, ISO/TR 7871, pp. 14-17.
- [35] Jackson, N., and Dhir, R. K. (1997). *Civil Engineering Materials*, 5th Edn, Palgrave, 1997.
- [36] Koukouvinos, C., Mylona, K., and Vonta, F. (2008). A Comparative study of variable selection procedures applied in high dimensional medical problems. *Journal of Applied Probability & Statistics*, 3, pp. 195-209.
- [37] Lawson, C. L., and Hanson, R. J. (1974). *Solving least-squares problems*. Prentice Hall, New Jersey, pp. 14-17.
- [38] Linhart, H., and Zucchini, W. (1986). *Model selection*, John Wiley, New York, pp. 37-56.
- [39] Mallows, C. L. (1973). Some comments on C_p . *Technometrics*, 15, pp. 661-675.
- [40] Newman, H., and Choo, J. (2003). *Advanced Concrete Technology - Testing and Quality, Chapter 9*, pp. 62-75.
- [41] Delatte, N., Chen S., Davidson J., Sehdev A., Amer N., and Endfinger M. (2001). *Design and Quality Control of Concrete Overlays*, University Transportation Center for Alabama, pp. 3-18.
- [42] Quality Scheme For Ready Mixed Concrete. (2003). *Quality and product conformity regulations*.
- [43] Quiroga, P., and Fowler, D. (2003). The Effects of Aggregates Characteristics on the Performance of Portland Cement Concrete, International Center for Aggregates Research Aggregates Foundation for Technology, Research, and Education, pp. 16-25.
- [44] Sear, L. (2010). *A combined CUSUM system for controlling OPC and OPC/PFA concretes*, ACT Project 89.

- [45] Shewart, W. A. (1931). *Economic Control of Quality of Manufactured Product*.
- [46] The Irish Concrete Society. (2004). *The New Concrete Standards-An Introduction to EN, 206-1*.
- [47] The Royal Academy of Engineering. (2012). *The Mathematics of Material Quality Control*.
- [48] Troy, J. (2010), *Private communication*, pp. 9–40.
- [49] Tsamatsoulis, D. (2005). *Control Charts and Models Predicting Cement Strength: A Strong Tool Improving Quality Control of Cement Production*, Athens-Greece.
- [50] Woodland, W. H., and Adams, B.M. (1993). *The Statistical Design of CUSUM Charts Quality Engineering*, Vol 5, pp.559-570.
- [51] Woodland, W. H. (1985). *The Statistical Design of Quality Control Charts. The Statistician*. Vol. 34 pp.155-160, pp. 7-14.
- [52] Wrosley, K. J. (1983). *The Power of Lilelyhood Ratio and Cummulative Sum Tests for a Change in a Binormal Probability. Biometrica*, Vol. 70, pp.455-464.
- [53] Yeh, A. B., Lin, D. K. J., and Venkataramani C. (2004). *Unified CUSUM Charts for Monitoring Process Mean and Variability. Quality Technology & Quantitative Management*, Vol. 1, pp.65-86.
- [54] Αντζουλάκος, Δ. (2006). *Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, ΠΜΣ «Εφαρμοσμένη Στατιστική»*.
- [55] Βουδικλάρης, Θ. (2004), *ΕΛΟΤ EN 206-1, Δυνατότητες και Προβλήματα εφαρμογής*.
- [56] Δαμμανού, Χ.Χ. (1996). *Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας και Αξιοπιστία, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Τμήμα Μαθηματικών, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών*.
- [57] Κανιτάκη, Ε. (2012). *ΕΛΟΤ - ΤΕΕ, Ευροκόδικας και ΕΛΟΤ EN 206-1*.
- [58] Καρώνη, Χ. (2005). *Μοντέλα Αξιοπιστίας και Επιβίωσης*. Ε.Μ.Π.
- [59] Κουκουβίνος, Χ. (2005). *Γραμμικά μοντέλα και Σχεδιασμοί*, Ε.Μ.Π.
- [60] Κουκουβίνος, Χ. (2008). *Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας*.
- [61] Κούτρας, Μ. Β. (2001). *Εισαγωγή στη Συνδυαστική*, Εκδόσεις Α.Σταμούλης.
- [62] Κούτρας, Μ. Β. (2002). *Εισαγωγή στις Πιθανότητες, Θεωρία και Εφαρμογές: Μέρος Ι*, Εκδόσεις Α. Σταμούλης.
- [63] Κούτρας, Μ. Β. (2004). *Εισαγωγή στις Πιθανότητες, Θεωρία και Εφαρμογές: Μέρος ΙΙ*, Εκδόσεις Α. Σταμούλης.

- [64] Κούτρας, Μ. Β. (2007). Στατιστική Θεωρία αξιοπιστίας και έλεγχοι χρόνων ζωής, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, ΠΜΣ «Εφαρμοσμένη Στατιστική».
- [65] <http://books.google.gr>-*Quality Control Measurements*.
- [66] <http://www.academia.edu>-A lot of engineering samples for concrete production.
- [67] <http://www.cnci.org.za> *Cement & Concrete Institute. (1996). Monitoring concrete strength, pp. 1-15.*