



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

«ΓΕΩΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ ΚΑΙ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ»

Μεταπτυχιακή Διατριβή

**Ανάπτυξη μεθοδολογίας στατιστικού ελέγχου ποιότητας πρώτων
υλών για την τσιμεντοβιομηχανία**

ΠΑΠΟΥΤΣΗ ΕΙΡΗΝΗ

Εξεταστική επιτροπή

- 1. Αν. Καθηγητής Μιχάλης Γαλετάκης (επιβλέπων)**
- 2. Καθηγητής Διονύσιος Χριστόπουλος**
- 3. Επικ. Καθηγητής Γεώργιος Αλεβίζος**

ΧΑΝΙΑ, 2013

Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια της επίτευξης των σπουδών μου στο Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών στο τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων στο Πολυτεχνείο Κρήτης.

Με αφορμή την διεκπεραίωση της θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή Αναπληρωτή Καθηγητή Μιχάλη Γαλετάκη, για την συνεργασία του και την υποστήριξη του της προσπάθειας αυτής.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Καθηγητή Χριστόπουλο Διονύσιο και τον Επίκουρο καθηγητή Αλεβίζο Γεώργιο για την συμμετοχή τους στην εξεταστική επιτροπή και την αξιολόγηση της εργασίας.

Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σ' αυτό το έγγραφο εκφράζουν τον συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι αντιπροσωπεύουν τις επίσημες θέσεις των εξεταστών.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	7
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	10
Περίληψη	12
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο Η παραγωγή του τσιμέντου και η τσιμεντοβιομηχανία σήμερα	14
1.1 Η εξέλιξη της ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας	14
1.2 Η παραγωγική ικανότητα της ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας	14
1.3 Η παραγωγή του τσιμέντου	17
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο Στατιστικός έλεγχος ποιότητας και έλεγχος διεργασιών	19
2.1 Ορισμός	19
2.2 Σημαντικά ιστορικά βήματα.....	19
2.3 Συνήθεις γραφικές μέθοδοι του στατιστικού ελέγχου ποιότητας	20
2.4 Προϋποθέσεις για την σωστή εφαρμογή	20
2.5 Παράγοντες για επιτυχημένη εφαρμογή του στατιστικού ελέγχου ποιότητας	21
2.6 Πλεονεκτήματα του στατιστικού ελέγχου ποιότητας.....	21
2.7 Δυσκολίες στην εφαρμογή	22
2.8 Διαγράμματα ελέγχου – Μεταβλητότητα και αιτίες	22
2.8.1 Μεταβλητότητα και αιτίες	22
2.9 Διαγράμματα ελέγχου μεταβλητών	27
2.10 Διαγράμματα ελέγχου μέσης τιμής – εύρους.....	27
2.11 Κατασκευή διαγράμματος ελέγχου μέσης τιμής – τυπικής απόκλισης.....	28
2.12 Διαγράμματα ελέγχου μεμονωμένων τιμών	28
2.17 Διαγράμματα πολλαπλών χαρακτηριστικών μέτρησης.....	29
2.18 Υπολογισμός του T^2 για αυτοσυσχετιζόμενες μεταβλητές	33
2.19 Σύγκριση διαγραμμάτων Hotelling με απλά διαγράμματα Shewhart.....	34
2.20 Εφαρμογές στη χημική βιομηχανία	34
2.21 Εφαρμογές στην μεταλλουργία, παραγωγή ενέργειας και περιβαλλοντική τεχνολογία	36
2.22 Εφαρμογές στη βιομηχανία ηλεκτρονικών	37
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο Έλεγχος σύνθεσης πρώτων υλών για την παραγωγή του τσιμέντου	38
3.1 Προσδιορισμός της σύνθεσης του φορτίου, ανάμειξη (ομοιογενοποίηση) και ελάττωση μεγέθους (θραύση, λειοτρίβηση) των πρώτων υλών	38
3.2 Η χρήση των on – line αναλυτών στην τσιμεντοβιομηχανία	42

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο Στατιστική ανάλυση των στοιχείων και κατασκευή διαγραμμάτων ελέγχου ποιότητας	46
4.1 Εισαγωγή στην ανάλυση των στοιχείων	46
4.2 Περιγραφή και έλεγχος των δεδομένων.....	46
4.3 Υπολογισμός βασικών στατιστικών παραμέτρων για οξείδια και δείκτες	47
4.3 Υπολογισμός της φυσικής διακύμανσης της διαδικασίας.....	52
4.4 Διαγράμματα ελέγχου μέσης τιμής - διασποράς (X-S)	57
4.5 Διάγραμμα ελέγχου πολλαπλών μεταβλητών (Hotelling)	61
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο Ανάπτυξη και εφαρμογή τροποποιημένων διαγραμμάτων Hotelling για την αντιμετώπιση της αυτοσυσχέτισης.....	64
5.1 Επίδραση της αυτοσυσχέτισης των παραμέτρων ποιότητας στην αποτελεσματικότητα των διαγραμμάτων Hotelling	64
5.2 Υπολογισμός των συντελεστών χρονικής συσχέτισης των δεικτών LSF, SM, AR και NaEq	64
5.3 Ανάπτυξη αυτοπαλινδρομικών μοντέλων	65
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο Συμπεράσματα – Προτάσεις	69
6.1 Συμπεράσματα	69
6.2 Προτάσεις.....	69
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	71
Ελληνική βιβλιογραφία	71
Διεθνής βιβλιογραφία.....	71
Ιστοσελίδες.....	74

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

- ✓ Σχήμα 1.1: Χάρτης ελληνικών τσιμεντοβιομηχανιών (www.hcia.gr).....15
- ✓ Σχήμα 1.2: Ετήσια παραγωγική ικανότητα τσιμέντου ανά εταιρία (www.hcia.gr)...15
- ✓ Σχήμα 1.3: Παραγωγή τσιμέντου κατά τα έτη 1999-2008 (www.hcia.gr).....16
- ✓ Σχήμα 1.4: Ισοζύγιο πρώτων υλών και προϊόντων στην παραγωγή 1 kg τσιμέντου (Τσακαλάκης, 2012).....17
- ✓ Σχήμα 1.5: Πρώτες ύλες, ενδιάμεσα προϊόντα και τελικό προϊόν στη διεργασία παραγωγής τσιμέντου(Τσακαλάκης, 2012).....18
- ✓ Σχήμα 1.6: Αναλυτικό διάγραμμα ροής διεργασιών παραγωγής τσιμέντου.....18

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

- ✓ Σχήμα 2.1: Ενδεικτικό διάγραμμα ελέγχου ποιότητας.....25
- ✓ Σχήμα 2.2: Διάγραμμα Shewhart με εμφάνιση των χαρακτηριστικών ζωνών A,B,C.26
- Σχήμα 2.3: Το πρόβλημα του ελέγχου πολλαπλών μεταβλητών με μεμονωμένα διαγράμματα ελέγχου Shewhart.....30
- ✓ Σχήμα 2.4: Κοινή κατανομή των μεταβλητών ελέγχου x_1 , x_231
- ✓ Σχήμα 2.5: Περιοχή ελέγχου για τα μεμονωμένα διαγράμματα Shewhart των x_1 και x_2 (αριστερά) και ελλειπτική περιοχή ελέγχου κατά Hotelling (δεξιά).....31
- ✓ Σχήμα 2.6: Μεταβολή του συντελεστή αυτοσυσχέτισης R_k για μια τυχαία μεταβλητή σε σχέση με τη χρονική υστέρηση k , οι συμμετρικές καμπύλες δίνουν τα όρια του διαστήματος εμπιστοσύνης του ϕ_k για $\alpha=0,05$33

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

- ✓ Σχήμα 3.1: Αναλογίες των βασικών πρώτων υλών για την παραγωγή του κοινού τσιμέντου τύπου Portland.....40
- ✓ Σχήμα 3.2: Σφαιρίδια (pellets) μεγέθους 15-25 mm του κλίνκερ τσιμέντου (προϊόν της διεργασίας πυροσυσσωμάτωσης στην περιστροφική κάμινο).....40
- ✓ Σχήμα 3.3: Βέλτιστα όρια μεταβολής των τιμών των ποιοτικών δεικτών ποιότητας της φαρίνας για εξασφάλιση κατάλληλων συνθηκών έψησης του κλίνκερ (Τσακαλάκης, 2010).....42
- ✓ Σχήμα 3.4: Διάταξη ελέγχου της χημικής σύστασης της τροφοδοσίας των πρώτων υλών (QUALITY CONTROL LOOP) στον περιστροφικό κλίβανο κατά την παραγωγή του κλίνκερ του τσιμέντου (Schofield, 1980).....43
- ✓ Σχήμα 3.5: on-line αναλυτές τοποθετημένοι σε μεταφορική ταινία (thermo.com).....44
- ✓ Σχήμα 3.6: Τυπική εικόνα παρουσίασης των μετρήσεων του on-line αναλυτή (thermo.com).....44

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

✓ Σχήμα 4.1: Ιστογράμματα και θηκογράμματα των δεικτών με βάση τις μετρήσεις ανά 10 λεπτά που πραγματοποιήθηκαν με τον on-line αναλυτή (500 μετρήσεις, No740 έως No1240).....	49
✓ Σχήμα 4.2: Διαγράμματα γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των κυρίων οξειδίων που μετρήθηκαν.....	50
✓ Σχήμα 4.3: Γραφική αναπαράσταση της γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των δεικτών.....	51
✓ Σχήμα 4.4: Διάγραμμα μέσης τιμής του δεκάλεπτου δείγματος ($\bar{x}$) του δείκτη (LSF) για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν.....	52
✓ Σχήμα 4.5: Διάγραμμα μέσης τιμής του δεκάλεπτου δείγματος ($\bar{x}$) του δείκτη (AR) για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν.....	52
✓ Σχήμα 4.6: Διάγραμμα μέσης τιμής του δεκάλεπτου δείγματος ($\bar{x}$) του ισοδύναμου του νατρίου (NaEq) για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No940).....	54
✓ Σχήμα 4.7: Διάγραμμα της τυπικής απόκλισης (S) του δεκάλεπτου δείγματος του ισοδύναμου του νατρίου (NaEq) για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No940).....	54
✓ Σχήμα 4.8: Διάγραμμα μέσης τιμής του δεκάλεπτου δείγματος ($\bar{x}$) του πυριτικού δείκτη (SM) για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No940).....	55
✓ Σχήμα 4.9: Διάγραμμα της τυπικής απόκλισης (S) του δεκάλεπτου δείγματος του πυριτικού δείκτη (SM) για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No940).....	55
✓ Σχήμα 4.10: Διάγραμμα μέσης τιμής του δεκάλεπτου δείγματος ($\bar{x}$) του αργλικού δείκτη (AR) για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (740-940).....	56
✓ Σχήμα 4.11: Διάγραμμα της τυπικής απόκλισης (S) του δεκάλεπτου δείγματος του αργλικού δείκτη (AR) για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No940).....	56
✓ Σχήμα 4.12: Διάγραμμα μέσης τιμής του δεκάλεπτου δείγματος ($\bar{x}$) του δείκτη κορεσμού σε άσβεστο (LSF) για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No940).....	56
✓ Σχήμα 4.13: Διάγραμμα της τυπικής απόκλισης (S) του δεκάλεπτου δείγματος του δείκτη κορεσμού σε άσβεστο (LSF) για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No940).....	56
✓ Σχήμα 4.14: Διάγραμμα μεταβολής της μέσης τιμής του δεκάλεπτου δείγματος ($\bar{x}$) του δείκτη NaEq για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No1240).....	58
✓ Σχήμα 4.15: Διάγραμμα μεταβολής της τυπικής απόκλισης (S) του δεκάλεπτου δείγματος του δείκτη NaEq για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No1240).....	58
✓ Σχήμα 4.16: Διάγραμμα μεταβολής της μέσης τιμής του δεκάλεπτου δείγματος ($\bar{x}$) του δείκτη (SM) για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No1240).....	59
✓ Σχήμα 4.17: Διάγραμμα μεταβολής της τυπικής απόκλισης (S) του δεκάλεπτου δείγματος του δείκτη (SM) για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No1240).....	59
✓ Σχήμα 4.18: Διάγραμμα μεταβολής της μέσης τιμής του δεκάλεπτου δείγματος ($\bar{x}$) του δείκτη (AR) για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No1240).....	60

✓ Σχήμα 4.19: Διάγραμμα μεταβολής της τυπικής απόκλισης (S) του δεκάλεπτου δείγματος του δείκτη (AR) για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No1240).....	60
✓ Σχήμα 4.20: Διάγραμμα μεταβολής της μέσης τιμής του δεκάλεπτου δείγματος ($\bar{x}$) του δείκτη (LSF) για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No1240).....	60
✓ Σχήμα 4.21: Διάγραμμα μεταβολής της τυπικής απόκλισης (S) του δεκάλεπτου δείγματος του δείκτη (LSF) για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No1240).....	61
✓ Σχήμα 4.22: Διάγραμμα πολυμεταβλητού ελέγχου Hotelling του δεκάλεπτου δείγματος όλων των δεικτών για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No1240).....	62

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

✓ Σχήμα 5.1: Μεταβολή του συντελεστή μερικής αυτοσυσχέτισης του LSF σε σχέση με την χρονική υστέρηση. Οι παράλληλες ευθείες είναι τα στατιστικά όρια και για στάθμη σημαντικότητας $\alpha=0,05$	64
✓ Σχήμα 5.2: Μεταβολή του συντελεστή μερικής αυτοσυσχέτισης του AR σε σχέση με την χρονική υστέρηση. Οι παράλληλες ευθείες είναι τα στατιστικά όρια και για στάθμη σημαντικότητας $\alpha=0,05$	65
✓ Σχήμα 5.3: Μεταβολή του συντελεστή μερικής αυτοσυσχέτισης του SM σε σχέση με την χρονική υστέρηση. Οι παράλληλες ευθείες είναι τα στατιστικά όρια και για στάθμη σημαντικότητας $\alpha=0,05$	65
✓ Σχήμα 5.4: Μεταβολή του συντελεστή μερικής αυτοσυσχέτισης του NaEq σε σχέση με την χρονική υστέρηση. Οι παράλληλες ευθείες είναι τα στατιστικά όρια και για στάθμη σημαντικότητας $\alpha=0,05$	65
✓ Σχήμα 5.5: Μεταβολή του συντελεστή μερικής αυτοσυσχέτισης του $\varepsilon_{LSF,t}$ σε σχέση με την χρονική υστέρηση. Οι παράλληλες ευθείες είναι τα στατιστικά όρια και για στάθμη σημαντικότητας $\alpha=0,05$	66
✓ Σχήμα 5.6: Μεταβολή του συντελεστή μερικής αυτοσυσχέτισης του $\varepsilon_{NaEq,t}$ σε σχέση με την χρονική υστέρηση. Οι παράλληλες ευθείες είναι τα στατιστικά όρια και για στάθμη σημαντικότητας $\alpha=0,05$	66
✓ Σχήμα 5.7: Μεταβολή του συντελεστή μερικής αυτοσυσχέτισης του $\varepsilon_{SM,t}$ σε σχέση με την χρονική υστέρηση. Οι παράλληλες ευθείες είναι τα στατιστικά όρια και για στάθμη σημαντικότητας $\alpha=0,05$	67
✓ Σχήμα 5.8: Μεταβολή του συντελεστή μερικής αυτοσυσχέτισης του $\varepsilon_{AR,t}$ σε σχέση με την χρονική υστέρηση. Οι παράλληλες ευθείες είναι τα στατιστικά όρια και για στάθμη σημαντικότητας $\alpha=0,05$	67
✓ Σχήμα 5.9: Τροποποιημένο διάγραμμα πολυμεταβλητού ελέγχου Hotelling του δεκάλεπτου των υπολοίπων των δεικτών.....	67

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

- ✓ Πίνακας 1.1 : Στατιστικά δεδομένα για τις εγχώριες πωλήσεις του τσιμέντου κατά τα έτη 2011-2012 (Στατιστική Υπηρεσία Ελλάδας, 2013).....16

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

- ✓ Πίνακας 2.1: Εφαρμογές του στατιστικού ελέγχου στη χημική βιομηχανία.....35
- ✓ Πίνακας 2.2: Εφαρμογές του στατιστικού ελέγχου στην μεταλλουργία, παραγωγή ενέργειας και περιβαλλοντική τεχνολογία.....36
- ✓ Πίνακας 2.3: Εφαρμογές του στατιστικού ελέγχου στη βιομηχανία ηλεκτρονικών...37

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

- ✓ Πίνακας 3.1: Όρια διακύμανσης και συνήθεις τιμές των ποιοτικών δεικτών LSF, SM, AR που συναντώνται κατά την παραγωγή του τσιμέντου (Τσακαλάκης, 2010).....40
- ✓ Πίνακας 3.2: Οι επιπτώσεις των ποιοτικών δεικτών της παραγωγής του τσιμέντου όταν οι τιμές τους ξεπερνούν τα όρια (Τσακαλάκης, 2010).....41

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

- ✓ Πίνακας 4.1: Διακινούμενες ποσότητες και ενδεικτική χημική σύσταση του ομογενοποιημένου μίγματος πριν το στάδιο της έψησης κατά την παραγωγή του τσιμέντου47
- ✓ Πίνακας 4.2: Περιεκτικότητα (%) και συντελεστής μεταβλητότητας των οξειδίων και δεικτών.....48
- ✓ Πίνακας 4.3: Ο συντελεστής συσχέτισης Pearson των βασικών οξειδίων.....50
- ✓ Πίνακας 4.4: Συντελεστές γραμμικής συσχέτισης Pearson των δεικτών.....51
- ✓ Πίνακας 4.5: Συντελεστές συσχέτισης Spearman των δεικτών που συναντώνται κατά την παραγωγική διαδικασία.....52
- ✓ Πίνακας 4.6: Βασικά στατιστικά μεγέθη των δεικτών για το ομαδοποιημένο δείγμα δεκαλέπτου που εξετάστηκε (No740-No940).....53
- ✓ Πίνακας 4.7: Τιμές στατιστικών ορίων των διαγραμμάτων μέσης τιμής ($\bar{X}$) – τυπικής απόκλισης (S) για τους ποιοτικούς δείκτες του δεκάλεπτου δείγματος των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No940).....53
- ✓ Πίνακας 4.8: Υπολογισμός της τυπικής απόκλισης (S) για το δείγμα των μετρήσεων (No740-No940).....57
- ✓ Πίνακας 4.9: Τιμές στατιστικών ορίων ελέγχου των διαγραμμάτων X-S για τους δείκτες του δεκάλεπτου δείγματος.....57
- ✓ Πίνακας 4.10: Συγκριτικός πίνακας της τιμής της τυπικής απόκλισης (S) του δεκάλεπτου δείγματος (No740-No940) που η διαδικασία είναι υπό έλεγχο και του δεκάλεπτου δείγματος (No740-No1240).....58
- ✓ Πίνακας 4.11: Συντεταγμένες των σημείων εκτός ορίων στα διαγράμματα X-S για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No1240).....61

✓ Πίνακας 4.12: Συμβολή των μετρούμενων παραμέτρων ελέγχου στη διαμόρφωση του T^2	62
---	----

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

✓ Πίνακας 5.1: Συμβολή των μετρούμενων παραμέτρων ελέγχου στη διαμόρφωση του T^2	68
--	----

Περίληψη

Στις σύγχρονες επιχειρήσεις κρίνεται απαραίτητη η χρήση των τεχνικών του στατιστικού ελέγχου ποιότητας προκειμένου να παράγονται προϊόντα που ακολουθούν συγκεκριμένες προδιαγραφές και έχουν σταθερή και επαναλήψιμη ποιότητα. Με τον στατιστικό έλεγχο ποιότητας εντοπίζονται αποκλίσεις στην παραγωγική διαδικασία που προέρχονται από βλάβες ή άλλες αιτίες έγκαιρα συμβάλλοντας έτσι στην αποφυγή παραγωγής ελαττωματικών προϊόντων. Οι υπάρχουσες τεχνικές και οι παραλλαγές του είναι αρκετές και έτσι είναι σημαντικό να επιλέγεται κάθε φορά η χρήση εκείνης της τεχνικής στατιστικού ελέγχου που ανταποκρίνεται καλύτερα στις ανάγκες της διαδικασίας.

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία διερευνά τη δυνατότητα χρήσης του στατιστικού ελέγχου ποιότητας πολλαπλών μεταβλητών στην τσιμεντοβιομηχανία και πιο συγκεκριμένα στον έλεγχο ποιότητας του υλικού τροφοδοσίας του κλιβάνου παραγωγής του κλίνκερ. Το υλικό τροφοδοσίας προκύπτει μέσω διεργασιών ανάμιξης και ομογενοποίησης των πρώτων υλών (κυρίως ασβεστολίθου και σχιστολίθου) ενώ η χημική του σύσταση του ελέγχεται και διορθώνεται μέσω αυτοματοποιημένου συστήματος χημικής ανάλυσης.

Για τον ποιοτικό έλεγχο παραγωγής που βασίζεται σε μετρήσεις δύο ή και περισσότερων συσχετιζόμενων παραμέτρων (όπως συμβαίνει στην περίπτωση της τσιμεντοβιομηχανίας), τα συνήθη διαγράμματα ελέγχου Shewhart δεν θεωρούνται αξιόπιστα εργαλεία ελέγχου και συνήθως συνδυάζονται με διαγράμματα ταυτόχρονου ελέγχου πολλαπλών μεταβλητών, γνωστά ως διαγράμματα Hotelling. Στα διαγράμματα Hotelling αντί του ελέγχου κάθε μιας παραμέτρου χωριστά ελέγχεται το στατιστικό μέγεθος T^2 . Σε περιπτώσεις όμως όπου οι μετρήσεις των παραμέτρων ποιότητας λαμβάνονται με αυτοματοποιημένα συστήματα με μεγάλη συχνότητα ή προηγούνται ειδικές διαδικασίες, όπως η ομογενοποίηση, είναι πιθανόν να εμφανιστούν χρονικές εξαρτήσεις στις σειρές των μετρήσεων. Η χρονική αυτή συσχέτιση οδηγεί σε εσφαλμένη εκτίμηση της διακύμανσης της ποιότητας και συνεπώς σε λανθασμένη εκτίμηση των ορίων ελέγχου των διαγραμμάτων. Στην εργασία αυτή αναπτύσσονται και εφαρμόζονται κατάλληλα τροποποιημένα διαγράμματα ελέγχου Hotelling για τον έλεγχο παραγωγής του υλικού τροφοδοσίας τσιμεντοβιομηχανίας που έχει προηγουμένως υποστεί ανάμιξη και ομογενοποίηση. Ως βασικές παράμετροι ελέγχου της ποιότητας επιλέχθηκαν οι κλασικοί δείκτες καθορισμού της σύνθεσης τροφοδοσίας (SM, AR, LSF, και NaEq), που υπολογίζονται από τη χημική ανάλυση του μίγματος τροφοδοσίας. Η χημική ανάλυση του μίγματος στην τσιμεντοβιομηχανία που μελετήθηκε λαμβάνεται με on-line αναλυτή τοποθετημένο επί της μεταφορικής ταινίας με συχνότητα μια πλήρη χημική ανάλυση ανά λεπτό.

Αρχικά πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος της ορθότητας των μετρήσεων και υπολογίστηκαν οι βασικές στατιστικές παράμετροι για τα τη χημική σύσταση (εκφρασμένη σε μορφή οξειδίων) και για τους δείκτες ελέγχου της σύνθεσης της τροφοδοσίας του κλιβάνου παραγωγής του κλίνκερ. Στη συνέχεια έγινε εκτίμηση της φυσικής διακύμανσης της διαδικασίας μέσα από ένα δείγμα 200 συνεχών μετρήσεων. Κατά το χρονικό διάστημα λήψης των μετρήσεων αυτών θεωρήθηκε ότι η διαδικασία ήταν υπό στατιστικό έλεγχο (ομαλή λειτουργία του συστήματος χωρίς εμφάνιση δυσλειτουργιών και σφαλμάτων).

Με βάση την φυσική διακύμανση που εκτιμήθηκε, κατασκευάστηκαν τα μεμονωμένα διαγράμματα μέσης τιμής – διασποράς καθώς και τα διαγράμματα πολυμεταβλητού ελέγχου Hotelling για τον έλεγχο της τροφοδοσίας του κλιβάνου του κλίνκερ. Ακολούθως αναπτύχθηκε και εφαρμόστηκε μεθοδολογία ελέγχου με βάση τα τροποποιημένα

διαγράμματα ελέγχου πολλαπλών μεταβλητών Hotelling (εξάλειψη της χρονικής συσχέτισης) και συγκρίθηκε η απόδοσή τους με τα συμβατικά.

Η εφαρμογή των τροποποιημένων αυτών διαγραμμάτων ελέγχου έδειξε ότι αυξάνεται η ευαισθησία και αξιοπιστία του ελέγχου σε σχέση με τα συμβατικά. Τα μεμονωμένα διαγράμματα Shewhart αποδείχτηκαν χρήσιμα για να ερμηνεύσουν τις εκτός ελέγχου περιπτώσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Η παραγωγή του τσιμέντου και η τσιμεντοβιομηχανία σήμερα

1.1 Η εξέλιξη της ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας

Η ελληνική τσιμεντοβιομηχανία γεννήθηκε στις αρχές του περασμένου αιώνα με την ίδρυση των 4 εταιριών σε διάστημα 32 ετών:

- 1902 Ίδρυση της Ανωνύμου Εταιρίας Τσιμέντων «ΤΙΤΑΝ»
- 1911 Ίδρυση της Ανωνύμου Γενικής Εταιρίας Τσιμέντων «ΗΡΑΚΛΗΣ»
- 1926 Ίδρυση της Εταιρίας «ΤΣΙΜΕΝΤΑ ΧΑΛΚΙΔΟΣ Α.Ε.»
- 1934 Πρώτη ίδρυση της Εταιρίας με την Επωνυμία «Σ. ΚΟΤΣΙΡΑΣ & ΣΙΑ Ε.Π.Ε.» με νέα επωνυμία «ΕΤΑΙΡΙΑ ΤΣΙΜΕΝΤΩΝ ΧΑΛΥΨ Α.Ε.»
- 2001 Συγχώνευση της Ανωνύμου Γενικής Εταιρίας Τσιμέντων «ΗΡΑΚΛΗΣ» και «ΤΣΙΜΕΝΤΑ ΧΑΛΚΙΔΟΣ Α.Ε.»

Η ίδρυση και εκκίνηση παραγωγής των ελληνικών τσιμεντοβιομηχανιών ήταν επακόλουθο της συνεχώς αυξανόμενης ζήτησης τσιμέντου στην Ελλάδα. Ακολούθησαν και οι πρώτες εξαγωγές που έγιναν πριν από τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο.

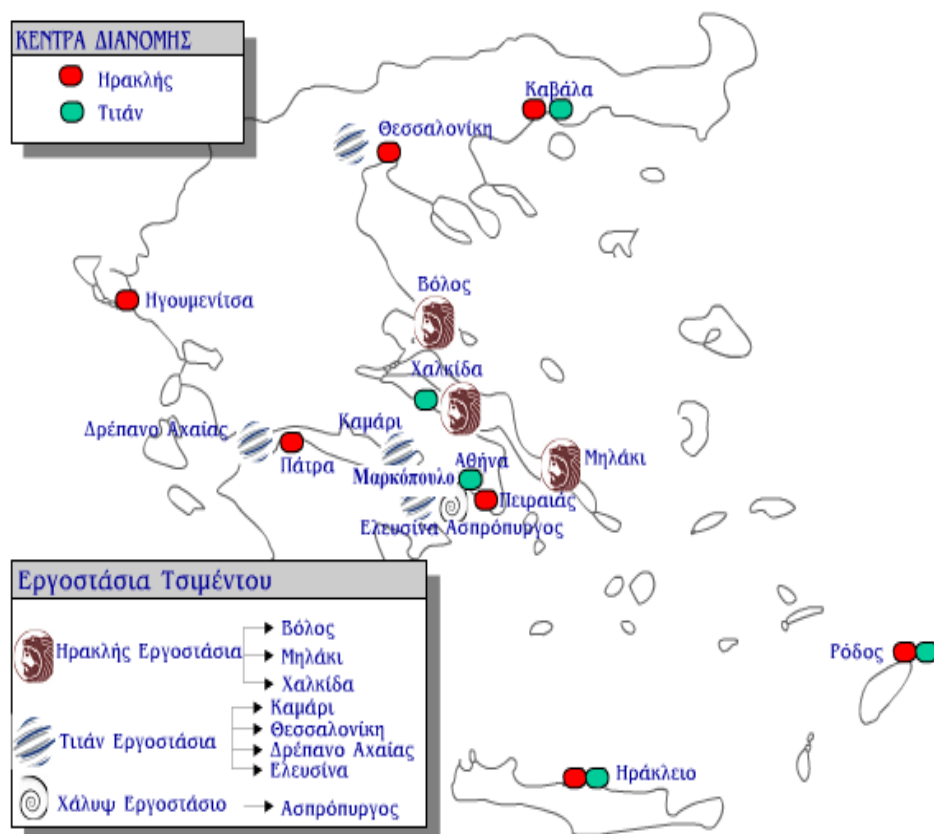
Στην μεταπολεμική περίοδο και μέχρι το 1983 οι ρυθμοί ανάπτυξης της τσιμεντοβιομηχανίας ήσαν ραγδαίοι ακολουθώντας τις ανάγκες ανάπτυξης και ανοικοδόμησης της χώρας μας, αλλά και την αυξανόμενη ζήτηση των αγορών εξωτερικού σε κοντινές περιοχές (Περσικός Κόλπος, Ερυθρά Θάλασσα, χώρες Βορείου και Δυτικής Αφρικής) κυρίως μετά την πρώτη εκτίναξη των τιμών πετρελαίου το 1973. Η δημιουργία πόρων στις πετρελαιοπαραγωγές χώρες οδήγησαν σε πρώτη φάση στην κάλυψη των αναγκών τους σε τσιμέντο λόγω ανάπτυξης με εισαγωγές τσιμέντου κυρίως από Ελλάδα και μετέπειτα σε δημιουργία ιδίων τσιμεντοβιομηχανιών. Το τελευταίο σε συνδυασμό με την οικονομική κρίση των ανεπτυγμένων χωρών λόγω των δύο πετρελαϊκών κρίσεων οδήγησε τις διεθνείς τιμές πώλησης του τσιμέντου σε κάθετη πτώση (οι τιμές 1986 έως και 50% χαμηλότερες από το 1979). Έτσι η ελληνική τσιμεντοβιομηχανία βασισμένη

- ✓ στην υψηλή τεχνολογία και τεχνογνωσία που διαθέτει
- ✓ στην άριστη ποιότητα του προϊόντος αλλά και στην υποστήριξη του πελάτη από τα εξειδικευμένα στελέχη της και
- ✓ στον έλεγχο και κατά συνέπεια στη μείωση του κόστους

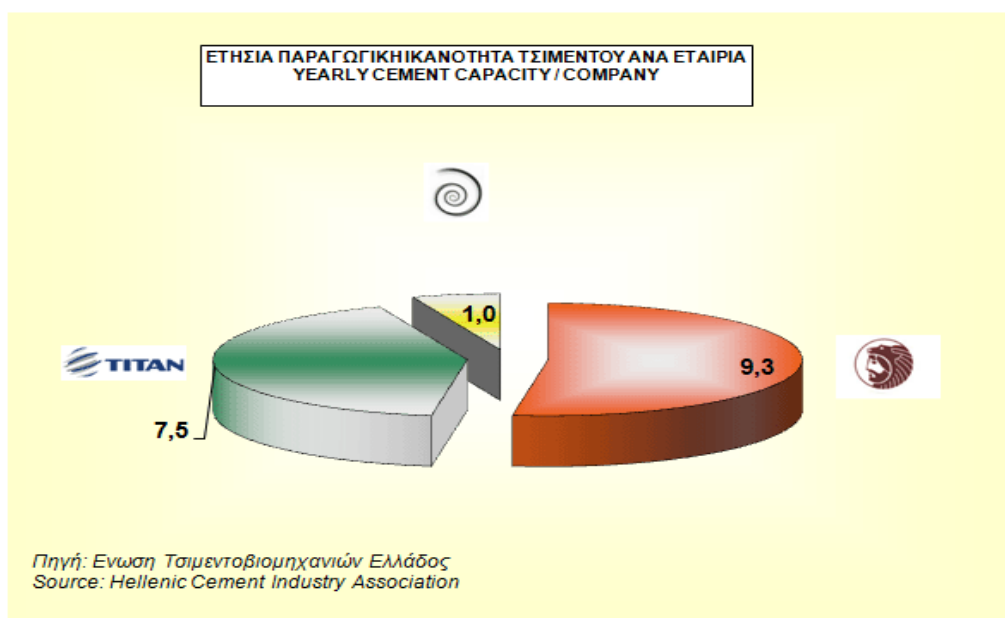
έστρεψε την εξαγωγική της δραστηριότητα σε νέες ανεπτυγμένες αγορές (Η.Π.Α., χώρες Δυτικής Ευρώπης) αλλά και σε άλλες χώρες της Αφρικής και Ασίας, παραμένοντας μία από τις ισχυρότερες εξαγωγικές χώρες (Τσακαλάκης, 2012).

1.2 Η παραγωγική ικανότητα της ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας

Τα εργοστάσια που δραστηριοποιούνται στον ελληνικό χώρο εδώ και πολλά χρόνια παρατίθενται στον χάρτη (Σχήμα 1.1) όπως επίσης και η ετήσια παραγωγικότητα μέχρι το 2008 (Σχήμα 1.2).

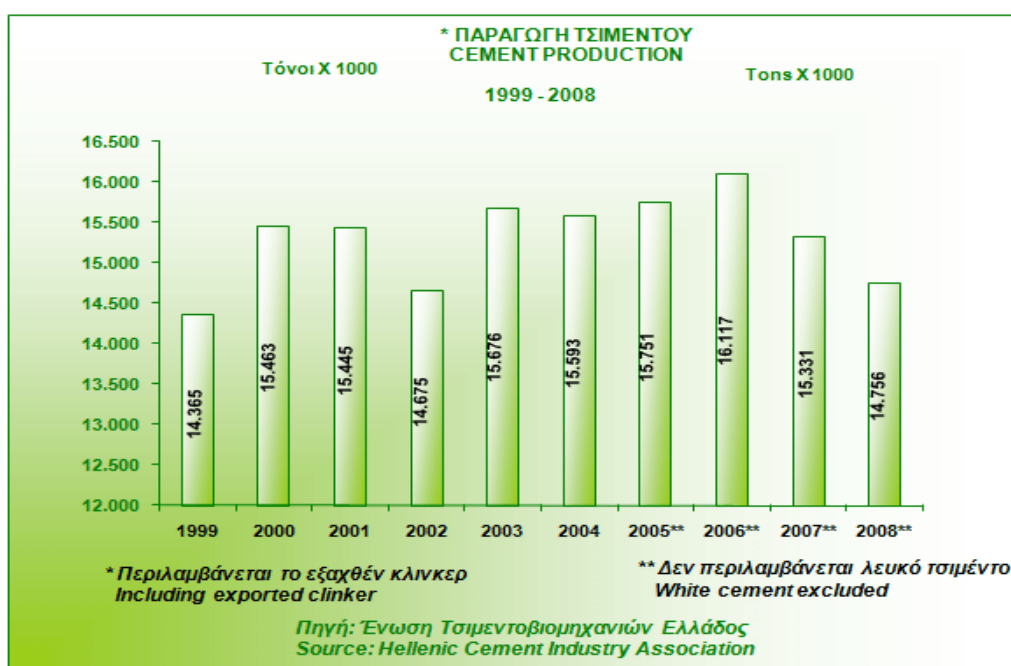


Σχήμα 1.1: Χάρτης ελληνικών τσιμεντοβιομηχανιών (www.hcia.gr)



Σχήμα 1.2: Ετήσια παραγωγική ικανότητα τσιμέντου ανά εταιρία (www.hcia.gr)

Η μεγαλύτερη παραγωγή τσιμέντου κατά τα έτη 1999-2008 παρουσιάστηκε το 2006 αγγίζοντας τους 16,1 εκατ. τόνους ενώ η χαμηλότερη εμφανίστηκε το 1999 (Σχήμα 1.3). Μετά το 2006 η παραγωγή του τσιμέντου κυμαίνεται πτωτικά μέχρι το 2008 που η παραγωγή αγγίζει τα επίπεδα του 1999.



Σχήμα 1.3: Παραγωγή τσιμέντου κατά τα έτη 1999-2008 (www.hcia.gr)

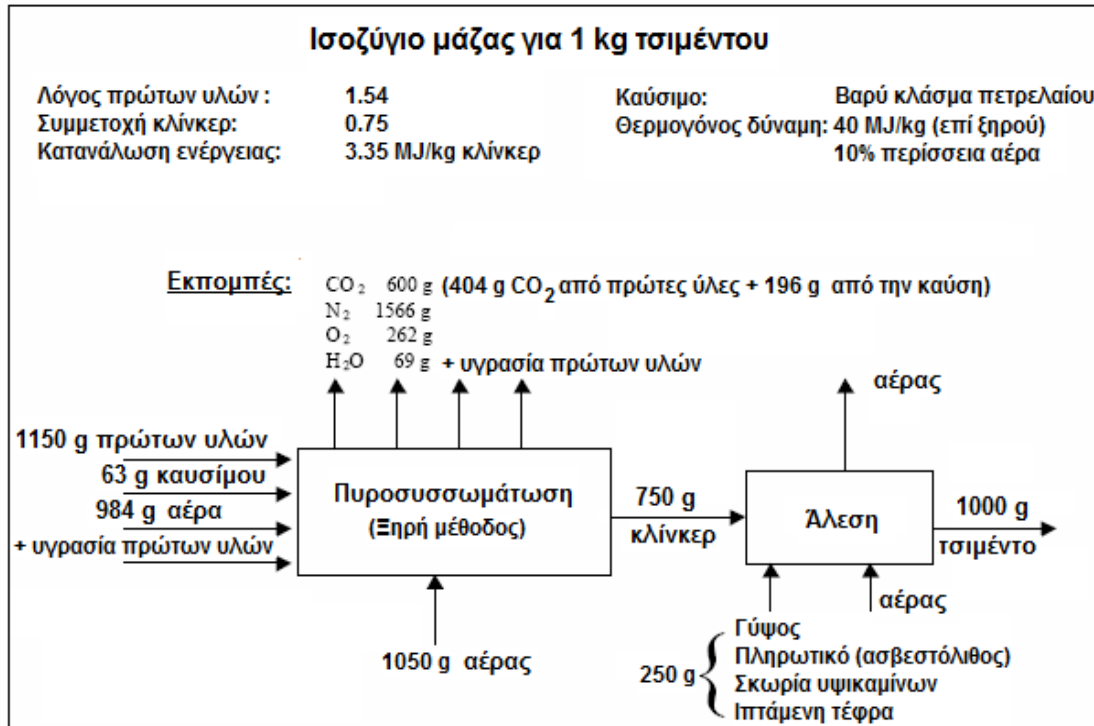
Όμως η πτωτική τάση συνεχίζεται από το 2009 μέχρι και σήμερα, όπου η μεγάλη συρρίκνωση της κατασκευαστικής δραστηριότητας είχε ως αποτέλεσμα την μείωση και της παραγωγής του τσιμέντου αλλά και των πωλήσεων. Η μείωση στην παραγωγή κυμάνθηκε από 20-30% και σε ορισμένες περιπτώσεις άγγιξε το 50% σε σχέση με το 2008 (Πίνακας 1.1). Αντίστοιχα όπως προκύπτει με δεδομένα της στατιστικής υπηρεσίας οι πωλήσεις στην εγχώρια αγορά είχαν πτώση από 25-35% τα τελευταία δυο χρόνια ενώ τον Μάρτιο του 2012 η πτώση έφτασε το 50%.

Πίνακας 1.1: Στατιστικά δεδομένα για τις εγχώριες πωλήσεις του τσιμέντου κατά τα έτη 2011-2012 (Στατιστική Υπηρεσία της Ελλάδας, 2013)

Πωλήσεις τσιμέντου στην εγχώρια αγορά (χιλ.τόνοι)			
Μήνας	2012	2011	%
Ιανουάριος	60,1	90,3	-33,4
Φεβρουάριος	65,4	98,6	-33,7
Μάρτιος	58,9	117,7	-50,0
Απρίλιος	68,3	87,2	-21,7
Μάιος	83,9	119,8	-29,9
Ιούνιος	72,5	111,3	-34,9
Ιούλιος	84,9	113,0	-24,8
Αύγουστος	34,7	45,3	-23,3
Σεπτέμβριος	63,2	99,3	-36,3
Οκτώβριος	73,4	96,7	-24,0
Ιαν – Οκτ.	665,3	979,1	-32,0

1.3 Η παραγωγή του τσιμέντου

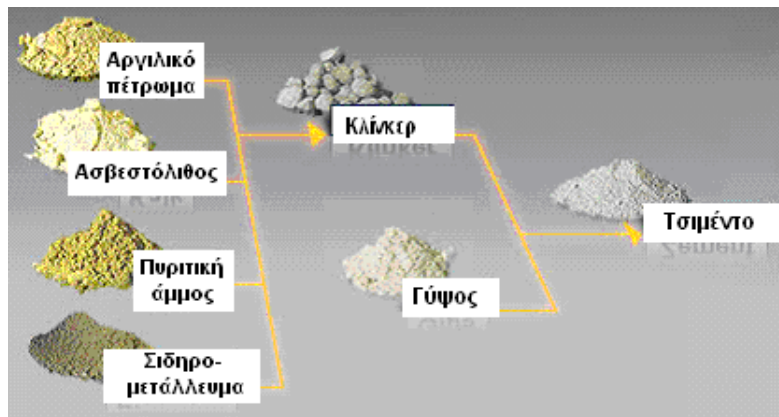
Η σημαντικότερη πρώτη ύλη για την παραγωγή τσιμέντου είναι τα ασβεστολιθικά πετρώματα. Μια τσιμεντοβιομηχανία για να παράγει 1 τόνο κλίνκερ χρειάζεται 1,50-1,65 τόνους πρώτων υλών εκ των οποίων το 80% είναι ασβεστολιθικό υλικό. Ως εκ τούτου είναι πολύ σημαντικό η πηγή εξόρυξης ασβεστολιθικών πετρωμάτων να είναι πολύ κοντά στην μονάδα επεξεργασίας. Ενδεικτικό ισοζύγιο των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται για την παρασκευή τσιμέντου παρουσιάζονται στο Σχήμα (1.4) (Τσακαλάκης, 2012):



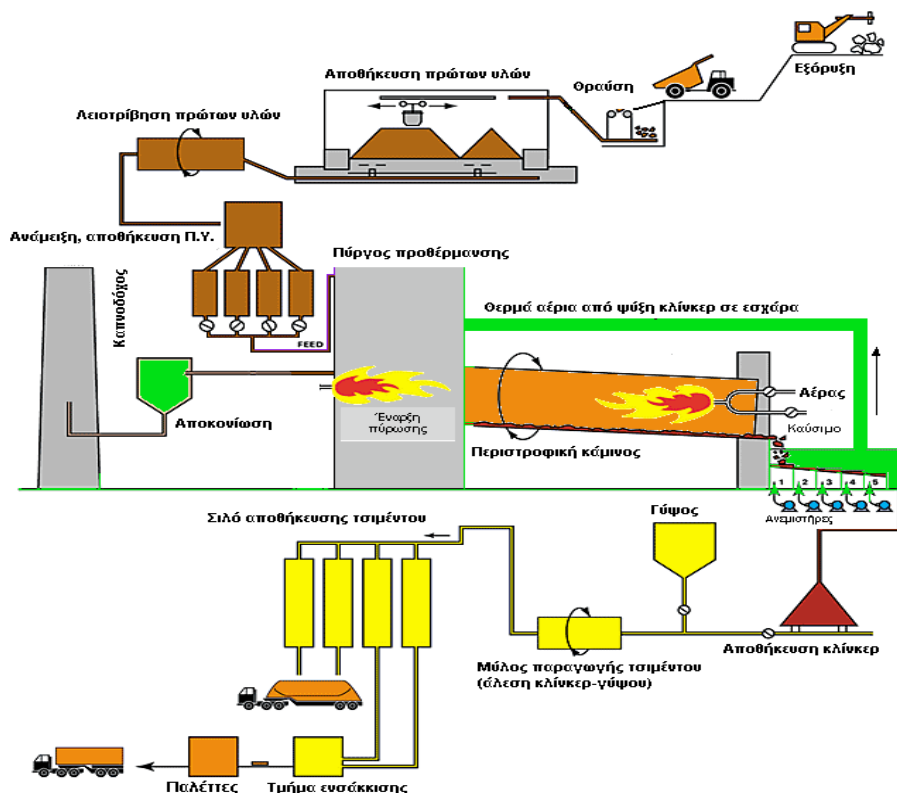
Σχήμα 1.4: Ισοζύγιο πρώτων υλών και προϊόντων στην παραγωγή 1 kg τσιμέντου (Τσακαλάκης, 2012)

Οι πρώτες ύλες αποτελούνται κυρίως από αργιλικά πετρώματα, σιδηρομεταλλεύματα, χαλαζιακά πετρώματα, βωξίτη και θραυσμένο ασβεστόλιθο (Σχήμα 1.5). Η εξόρυξή τους γίνεται με ισχυρά εσκαπτικά μηχανήματα ή με τη χρήση εκρηκτικών υλών. Στην συνέχεια οι ύλες που έχουν εξορυχθεί θραύονται σε μεγάλους θραυστήρες σε μικρότερα τεμάχια συνήθως με μέγεθος περίπου 30 χιλιοστών (Σχήμα 1.6). Ακολουθεί το στάδιο της αποθήκευσης των υλικών αφού πρώτα γίνει η ανάμιξη ανά κατηγορία. Επόμενο βήμα είναι η συνάλεση του μίγματος με αυστηρά καθορισμένη και συνεχώς ελεγχόμενη δοσολογία. Οι μύλοι που πραγματοποιείται η συνάλεση είναι μεταλλικοί κύλινδροι, με ισχυρή εσωτερική μεταλλική θωράκιση και περιέχουν πολλούς τόνους από σφαιρικά χαλύβδινα αλεστικά σώματα. Κατά την περιστροφική κίνηση των μύλων οι σφαίρες κονιοποιούν τις προθραυσμένες πρώτες ύλες σε κόκκους μέσης διαμέτρου. Το προϊόν που προκύπτει από αυτήν τη διαδικασία ονομάζεται φαρίνα η οποία τοποθετείται σε ειδικά σιλό και εκεί πραγματοποιείται η ομογενοποίηση. Στη συνέχεια ακολουθεί το στάδιο της έψησης όπου η φαρίνα περνάει από ένα σύστημα κυκλώνων (προθερμαντής) και υφίσταται μια προοδευτική θερμική κατεργασία σε θερμοκρασίες που φτάνουν τους 900 °C. Για τη θέρμανση της φαρίνας χρησιμοποιούνται καύσιμα όπως πετρέλαιο, γαιάνθρακες, φυσικό αέριο και εναλλακτικά καύσιμα. Στο επόμενο βήμα στους περιστροφικούς κλίβανους (rotary kiln), οι οποίοι είναι μεταλλικοί με μήκος 50-200 μέτρα και διάμετρο 3-5 μέτρα και εσωτερικά επενδυμένοι από πυρότουβλα συντελείται το στάδιο της έψησης. Η περιστροφική κίνηση του κλίβανου γίνεται υπό κλίση έτσι ώστε η φαρίνα να κινείται προς

την έξοδο αφού οι θερμοκρασίες έχουν αγγίξει και τους 1400 °C. Το αποτέλεσμα από την διεργασία αυτή είναι η φαρίνα να μετατραπεί σε κοκκώδες υλικό και το οποίο ονομάζεται κλίνκερ. Το κλίνκερ έχει γκριζοπράσινο χρώμα και τα σφαιρίδια που το αποτελούν έχουν διάμετρο 10-25mm και παίζει καθοριστικό ρόλο στην ποιότητα του τσιμέντου. Πλησιάζοντας προς τα τελευταία στάδια λαμβάνει χώρα η συνάλεση του κλίνκερ με γύψο, ποζολάνες και άλλα φυσικά και τεχνητά υλικά που στόχο έχουν να αυξήσουν την ποιότητα και τις ιδιότητες του τσιμέντου. Το τσιμέντο οδηγείται σε σιλό αποθήκευσης όπου και παραμένει για ένα χρονικό διάστημα ενώ στη συνέχεια είτε συσκευάζεται είτε διατίθεται χύμα και μεταφέρεται με ειδικά φορτηγά αυτοκίνητα (σιλοφόρα) ή πλοία. Ο κύκλος του τσιμέντου ολοκληρώνεται με την κατανάλωσή του (Μαγκανάρη, 2006).



Σχήμα 1.5: Πρώτες ύλες, ενδιάμεσα προϊόντα και τελικό προϊόν στη διεργασία παραγωγής τσιμέντου (Τσακαλάκης, 2012)



Σχήμα 1.6: Αναλυτικό διάγραμμα ροής διεργασιών παραγωγής τσιμέντου (Τσακαλάκης, 2012)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Στατιστικός έλεγχος ποιότητας και έλεγχος διεργασιών

2.1 Ορισμός

Ο στατιστικός έλεγχος ποιότητας (statistical process control) είναι μια συλλογή από πανίσχυρα εργαλεία, χρήσιμα για τον εντοπισμό αιτιών που ευθύνονται για τη μεταβλητότητα μιας παραγωγικής διαδικασίας. Κάνοντας χρήση των εργαλείων αυτών παρέχεται και η δυνατότητα προσδιορισμού της ικανότητας μιας διαδικασίας να παράγει προϊόντα και διεργασίες σύμφωνα με τις απαιτούμενες προδιαγραφές. Βασική προϋπόθεση για την αποτελεσματικότητα των εργαλείων αυτών είναι όλοι οι εμπλεκόμενοι (εργάτες, υπεύθυνοι ποιότητας, μηχανικοί) και η διοίκηση να αναγνωρίζουν την ανάγκη για συνεχή βελτίωση της ποιότητας και παραγωγικότητας (Oakland, 1993).

Ο στατιστικός έλεγχος ποιότητας διακρίνεται στο στατιστικό έλεγχο αποδοχής και τον στατιστικό έλεγχο παραγωγικής διαδικασίας. Ο στατιστικός έλεγχος αποδοχής χρησιμοποιείται προκειμένου να ελεγχθεί αν μια παρτίδα παραγωγής ικανοποιεί τις προδιαγραφές τις προδιαγραφές ποιότητας, ενώ ο στατιστικός έλεγχος της παραγωγικής διαδικασίας ή στατιστικός έλεγχος διεργασιών, έχει στόχο να προλάβει την παραγωγή ελαττωματικών προϊόντων – παρτίδων ελέγχοντας την παραγωγική διαδικασία. Ο στατιστικός έλεγχος της παραγωγικής διαδικασίας αποτελεί σήμερα την ευρύτερα χρησιμοποιούμενη μέθοδο ελέγχου και διασφάλισης της ποιότητας και βελτίωσή της. Αυτό συμβαίνει γιατί μεταφέρει τις ενέργειες ελέγχου ένα βήμα πιο έγκαιρα στον κύκλο σχεδίασης – παραγωγής – αποστολής του προϊόντος (Γαλετάκης, 2000).

Αν αποτύχει η εφαρμογή του στατιστικού ελέγχου ποιότητας μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένες ανακλήσεις προϊόντων, περισσότερα ελαττωματικά, αυξημένο αριθμό παραπόνων πελατών, κόστη εγγυήσεων και μειωμένα περιθώρια κέρδους, μείωση παραγωγικότητας και μεριδίου αγοράς (Little, 2001). Ενώ αν η εφαρμογή του στατιστικού ελέγχου είναι επιτυχής τότε τα οφέλη είναι πολλά όπως λιγότερες ποσότητες ελαττωματικών, μικρό κόστος απωλειών, αύξηση αποδοτικότητας, μείωση κόστους ποιότητας και σε μακροπρόθεσμο πλάνο έχουμε μείωση παραπόνων, αύξηση μεριδίου της αγοράς, δημιουργία φήμης προϊόντων υψηλής ποιότητας (Mason και Antony, 2000).

2.2 Σημαντικά ιστορικά βήματα

Ο ποιοτικός έλεγχος της παραγωγής είναι τόσο παλιός όσο και η ίδια η παραγωγική διαδικασία. Στον Μεσαίωνα και μέχρι τις αρχές της βιομηχανικής επανάστασης η ποιότητα των προϊόντων προσδιοριζόταν με βάση την ικανότητα και την τεχνική του συγκεκριμένου τεχνίτη, του οποίου η ποιότητα παραγωγής αλλά και η παραγωγικότητα καθορίζονταν από το ταλέντο του και την εμπειρία του (Αυλωνίτης, 2009). Αργότερα τη δεκαετία του 1920 έχουμε την εμφάνιση του ελέγχου ποιότητας αποδοχής (acceptance sampling) που σχετίζεται με τη ανάπτυξη δειγματοληπτικών σχημάτων ελέγχου παρτίδων παραγωγής σύμφωνα με τα οποία η απόφαση για αποδοχή ή απόρριψη συγκεκριμένης παρτίδας εξαρτάται από την ποιότητα περιορισμένου αριθμού μονάδων που ανήκουν σε τυχαίο δείγμα από την παρτίδα αυτή (Ταγαράς, 2000).

Η εισαγωγή των διαγραμμάτων ελέγχου για τις μεταβλητές της παραγωγικής διαδικασίας ανήκει στον Walter Shewhart (1924). Ο Shewhart συνειδητοποίησε ότι η διασπορά τιμών ενός χαρακτηριστικού ποιότητας είναι αναπόφευκτη κατά την παραγωγή αλλά ένα μέρος

οφείλεται σε τυχαίες μη ελεγχόμενες αιτίες και ένα άλλο μέρος σε συγκεκριμένα αίτια τα οποία μπορούμε να εντοπίσουμε και να διορθώσουμε. Το 1960 εισάγονται οι κύκλοι ελέγχου ποιότητας στην Ιαπωνία από τον K.Ishikawa και το μάθημα του ποιοτικού ελέγχου αρχίζει να εισάγεται στα προγράμματα των πανεπιστημίων. Τη δεκαετία του '80 εισάγονται και υιοθετούνται μέθοδοι σχεδιασμού πειραμάτων στην Μηχανική της Ποιότητας (engineering quality) σε όλους τους τομείς της βιομηχανικής παραγωγής. Τέλος η εισαγωγή της σειράς ISO 9000 γίνεται αποδεκτή και τελικά αποβαίνει απαραίτητη για όλο το βιομηχανικό κόσμο, έτσι ώστε να υιοθετείται από όλες τις βιομηχανίες που στοχεύουν στη διεθνή αγορά (Αυλωνίτης, 2009).

2.3 Συνήθεις γραφικές μέθοδοι του στατιστικού ελέγχου ποιότητας

Ο ρόλος των γραφικών μεθόδων είναι να μετασχηματίζουν μεγάλο όγκο αριθμητικών συνήθως στοιχείων σε απλές γραφικές παραστάσεις, που είναι χρήσιμες και κατανοητές σε όλα τα κλιμάκια της επιχείρησης. Η σωστή εφαρμογή τους αποφέρει τα ακόλουθα άμεσα και έμμεσα οφέλη (Ταγαράς, 2001):

- Μείωση του κόστους εσωτερικών αστοχιών και αύξηση της παραγωγικότητας, αποφυγή ελαττωματικών προϊόντων
- Βελτίωση της απόδοσης και ποιότητας της παραγωγικής διαδικασίας
- Αποφυγή υπερβολικά συχνών και όχι απαραίτητων επεμβάσεων στην παραγωγή
- Αξιόπιστη ανάλυση δυνατοτήτων παραγωγικής διαδικασίας
- Συστηματική παρακολούθηση των διαδικασιών, καταγραφή μετρήσεων και δημιουργία αρχείου για την αξιολόγηση διαδικασιών
- Έμφαση στην πρόληψη δημιουργίας ελαττωματικών προϊόντων

Τα συνηθέστερα γραφήματα που συναντάμε στον στατιστικό έλεγχο ποιότητας είναι:

- Διαγράμματα Διαδικασίας (flow charts)
- Διάγραμμα Αιτίας – Αποτελέσματος (cause and effects diagram)
- Διάγραμμα Συγκέντρωσης Ελαττωμάτων
- Διάγραμμα Διασποράς (scatterplot)
- Διάγραμμα Διαδοχικών Τιμών (run chart)
- Φύλλο Καταχώρισης (check sheet)
- Ιστόγραμμα και Διάγραμμα Μίσχου- Φύλλων
- Διάγραμμα Pareto
- Διάγραμμα Ελέγχου (control chart)

2.4 Προϋποθέσεις για την σωστή εφαρμογή

Ο στατιστικός έλεγχος ποιότητας δεν είναι απλά η εφαρμογή από μια σειρά στατιστικών εργαλείων. Στην πραγματικότητα περιλαμβάνει και ένα σύνολο υποθέσεων σχετικά με τη φιλοσοφία διαχείρισης της ποιότητας. Οι κυριότερες από αυτές είναι:

- Τα σημαντικά χαρακτηριστικά της ποιότητας μπορούν και πρέπει να είναι μετρήσιμα. Όταν δεν μπορούν να μετρηθούν αποτελεσματικά προκύπτουν κίνδυνοι όπως για παράδειγμα τα προβλήματα μπορεί να μη διαπιστωθούν, οι αλλαγές να εφαρμοστούν χωρίς ακριβή ανάλυση και συνεπώς να μην υπάρξουν εμφανή σημάδια βελτίωσης.
- Σκοπός πρέπει να είναι η αποτροπή των προβλημάτων πριν αυτά προκληθούν και όχι η διάγνυσή τους όταν αυτά επέλθουν, ή αλλιώς στόχος πρέπει να είναι η βελτίωση του μέλλοντος και όχι η μέτρηση του παρελθόντος. Με τη βελτίωση της

διαδικασίας, ιδανικό αποτέλεσμα είναι να μην είναι απαραίτητη η επιθεώρηση επειδή δεν υπάρχουν και ελαττωματικά. Ταυτόχρονα επιτυγχάνεται οικονομία σε χρόνο και χρήμα που θα δίνονταν σε επιδιορθώσεις και ελέγχους κτλ.

- Όταν είναι δυνατή η ανάλυση, πρέπει να επικεντρώνεται στη διαδικασία και όχι στο αποτέλεσμα. Έμφαση στο αποτέλεσμα δεν προσφέρει πληροφορίες και δεν δίνει τη δυνατότητα παρέμβασης ώστε να επιδιορθωθεί κάποιο ενδεχόμενο πρόβλημα.
- Οι πόροι που αφιερώνονται για τη δοκιμή, τον έλεγχο και την επιθεώρηση πρέπει να είναι οι λιγότεροι δυνατοί. Έτσι πρέπει να χρησιμοποιούνται τα λιγότερα δυνατά δεδομένα ώστε να επιτευχθεί ο στόχος.
- Υποστήριξη της εφαρμογής του στατιστικού ελέγχου ποιότητας (SPC) από τη διοίκηση με κατάλληλες ενέργειες και στρατηγική.
- Προσδιορισμός των χαρακτηριστικών του προϊόντος που επηρεάζουν την ποιότητα στα κρίσιμα στάδια μιας διεργασίας.
- Προσεκτική επιλογή των μεθόδων δειγματοληψίας.
- Επαλήθευση των συμπερασμάτων από τα διαγράμματα ελέγχου.
- Έλεγχος της αξιοπιστίας και της ακρίβειας του συστήματος μέτρησης για την λήψη δεδομένων (Κουλούρη, Μουρελάτου, 2007.)

2.5 Παράγοντες για επιτυχημένη εφαρμογή του στατιστικού ελέγχου ποιότητας

Οι Bird και Dale (1994) προτείνουν να δοθεί ιδιαίτερη έμφαση σε τρία σημεία: ένα ικανό σύστημα μέτρησης, κατάλληλη εκπαίδευση και υποστήριξη από τη διοίκηση για επιτυχημένη εφαρμογή του στατιστικού ελέγχου. Αντίθετα οι Xie και Goh (1999) πιστεύουν ότι για μια επιτυχημένη εφαρμογή του στατιστικού ελέγχου είναι απαραίτητη η συμβολή πολλών παραγόντων και γι' αυτό τους χώρισαν σε τρεις κατηγορίες. Η πρώτη κατηγορία αφορά τη διοίκηση, η δεύτερη αφορά τον εργαζόμενο και η τρίτη αναφέρεται σε παράγοντες που σχετίζονται με την ίδια την διαδικασία. Άλλοι ερευνητές εντοπίζουν άλλα χαρακτηριστικά όπως υποστήριξη από τη διοίκηση (Robinson, 2000), κατάλληλη εκπαίδευση για το στατιστικό έλεγχο (Harry, 1994), συνεργασία και ιεράρχηση των διαδικασιών (Δημητρακόπουλος, 1999), επιλογή κατάλληλων χαρακτηριστικών ποιότητας (Antony, 1997) αλλά και χρήση κατάλληλου λογισμικού (Owen, 1993).

2.6 Πλεονεκτήματα του στατιστικού ελέγχου ποιότητας

Τα πλεονεκτήματα που προσφέρει η ορθή εφαρμογή του στατιστικού ελέγχου ποιότητας (SPC) είναι πολλά και ουσιαστικά. Σ' αυτά συμπεριλαμβάνονται τα εξής:

- Μείωση της παραγωγής ελαττωματικών προϊόντων, με επακόλουθη μείωση των αποτυχημένων προσπαθειών
- Μείωση του κόστους ποιότητας και αύξηση του μεριδίου αγοράς
- Αύξηση της παραγωγικότητας
- Μείωση της μεταβλητότητας με συνέπεια τη βελτίωση της ποιότητας
- Καλύτερη κατανόηση της διεργασίας
- Η διεργασία γίνεται προβλέψιμη και το αποτέλεσμα να προσελκύονται συνεχώς νέοι πελάτες
- Ο χειριστής διαθέτει περισσότερες και πιο ακριβείς πληροφορίες όσον αφορά το πότε και πως πρέπει να επέμβει στη διεργασία και πότε όχι
- Βελτιώνεται το ηθικό των εργαζομένων καθώς αισθάνονται ότι έχουν τον πλήρη έλεγχο της διεργασίας, με επακόλουθο την καλύτερη απόδοσή τους
- Περιορίζεται η ανάγκη για έλεγχο και επιθεώρηση μετά την παραγωγή του προϊόντος, με απώτερο σκοπό την κατάργησή της

- Συλλέγονται αξιόπιστα δεδομένα που βοηθούν στην καταγραφή της βελτίωσης της ποιότητας
- Η διοίκηση γίνεται πιο αποτελεσματική
- Μειώνεται ο χρόνος που αφιερώνεται στην αντιμετώπιση των προβλημάτων ποιότητας
- Διευκολύνεται η συμμόρφωση με τα Πρότυπα Ποιότητας (Mason και Antony, 2000).

2.7 Δυσκολίες στην εφαρμογή

Εφαρμόζοντας τον στατιστικό έλεγχο ποιότητας συναντά κανείς δυο ειδών δυσκολίες. Δυσκολίες που προκύπτουν κατά την εισαγωγή του στατιστικού ελέγχου σε μια διαδικασία γενικά είτε δυσκολίες που αφορούν τα εμπόδια που εμφανίζονται όταν γίνεται η προσπάθεια να εφαρμοστούν πρόσθετα μέτρα ελέγχου ποιότητας (Δημητρακόπουλος, 2009).

Τα κυριότερα εμπόδια που μπορούμε να συναντήσουμε είναι:

- Έλλειψη εμπειρίας και εκπαίδευσης σε όλο το εύρος των εργαζομένων σε μια εταιρία, από τους χειριστές έως τους μάνατζερ, η οποία παρουσιάζεται ως έλλειψη κατανόησης του λόγου που εφαρμόζεται ο έλεγχος
- Έλλειψη αφοσίωσης από τους μάνατζερ, η οποία οδηγεί σε ανεπαρκείς πόρους που διατίθενται για την εφαρμογή του ελέγχου
- Έλλειψη κατανόησης των πιθανών ωφελειών
- Αποτυχημένη ερμηνεία των διαγραμμάτων ελέγχου
- Έλλειψη γνώσης σχετικά με το ποια μεγέθη θα τεθούν υπό παρακολούθηση
- Ανεπαρκές σύστημα μετρήσεων
- Έλλειψη επικοινωνίας μεταξύ μηχανικών, χειριστών και διοικητικών στελεχών

Εργαζόμενοι που δεν είναι σε θέση να διορθώσουν τη διαδικασία αλλά καταλαβαίνουν τη γλώσσα των διαγραμμάτων ελέγχου και εργαζόμενοι που μπορούν διορθώσουν τη διαδικασία χωρίς να αντιλαμβάνονται την ερμηνεία ενός διαγράμματος ελέγχου (Robinson et al, 2000).

2.8 Διαγράμματα ελέγχου – Μεταβλητότητα και αιτίες

2.8.1 Μεταβλητότητα και αιτίες

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 στα δύο προϊόντα). Αυτή η φυσική μεταβλητότητα είναι το αθροιστικό αποτέλεσμα πολλών μικρών αιτιών οι οποίες αναφέρονται ως κοινές ή συνήθης ή τυχαίες αιτίες μεταβλητότητας (common or chance causes of variation).

Η φυσική μεταβλητότητα είναι συνήθως μικρή σε μέγεθος και δεν μπορεί να αποδοθεί σε ελέγχιμους 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 μεταβλητότητα 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 (specifications limits) των ποιοτικών χαρακτηριστικών (quality characteristics) 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 αποδεκτά. Επίσης, στη φάση σχεδιασμού του προϊόντος ορίζεται και μια επιθυμητή τιμή για το ποιοτικό χαρακτηριστικό που ονομάζεται τιμή στόχος (target value, 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.

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 τιμή 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 (Αντζουλάτος, 2008).

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)

Καταρχήν πρέπει να εξηγήσουμε ότι 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 δεν 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.

Αλλιώς μπορούμε να διακρίνουμε 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.

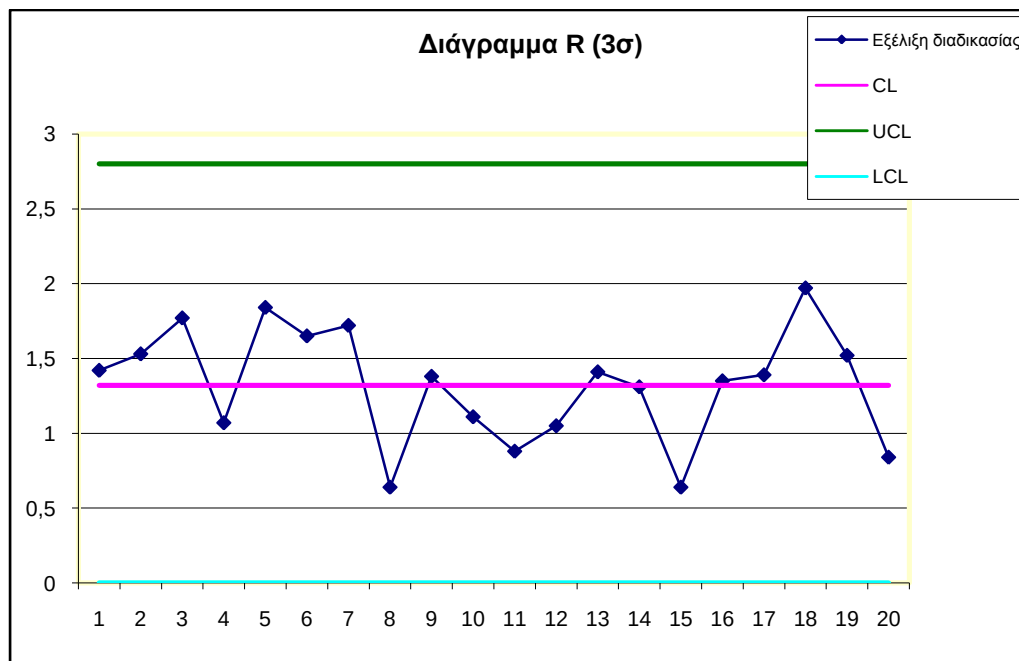
2.8.2 Κατασκευή και ερμηνεία ενός διαγράμματος

Τα διαγράμματα ελέγχου (control chart) είναι το σημαντικότερο εργαλείο για τον στατιστικό έλεγχο παραγωγικής διαδικασίας. Η κύρια χρήση των διαγραμμάτων είναι στον εντοπισμό συστηματικών μεταβολών της διαδικασιών (Ταγαράς, 2001).

Σύμφωνα με το σχήμα ελέγχου που προτάθηκε από τον Shewhart, λαμβάνονται ισομεγέθη δείγματα ανά σταθερά χρονικά διαστήματα από μια παραγωγική διαδικασία και, ανάλογα με την ένδειξη του δείγματος, αποκτάται πληροφορία για το εάν έχει επιδράσει κάποια συστηματική αιτία στην παραγωγική διαδικασία και αποφασίζεται επέμβαση ή όχι σε αυτήν. Στην περίπτωση ελέγχου της μέσης τιμής ενός συνεχούς χαρακτηριστικού ποιότητας το διάγραμμα Shewhart έχει τη μορφή του Σχήματος (2.1) (Νενές, 2006).

Το χαρακτηριστικό ποιότητας θεωρείται πως ακολουθεί την κανονική κατανομή με μέση τιμή μ_0 και τυπική απόκλιση σ (εφόσον δεν έχει επιδράσει κάποια συστηματική αιτία). Ανά σταθερά χρονικά διαστήματα χρονικής διάρκειας h λαμβάνονται δείγματα μεγέθους n και υπολογίζεται η μέση τιμή δείγματος $\bar{x}$ του μετρούμενου χαρακτηριστικού ποιότητας. Η μέση τιμή δείγματος ακολουθεί επίσης κανονική κατανομή με μέση τιμή μ_0 και τυπική απόκλιση $\sigma/\sqrt{n}$. Σε περίπτωση που η τιμή αυτή, η οποία σημειώνεται σε διάγραμμα, βρίσκεται ανάμεσα στα όρια ελέγχου $\pm k\sigma/\sqrt{n}$, η παραγωγική διαδικασία συνεχίζεται κανονικά ενώ αν υπερβεί το άνω όριο ελέγχου (AOE ή Upper Limit Control - UCL ή άνω όριο προδιαγραφών - USL) ή είναι μικρότερη από το κάτω όριο ελέγχου (KOE ή Lower Limit Control - LCL ή κάτω όριο προδιαγραφών - LSL) η διαδικασία διακόπτεται προς έρευνα ύπαρξης συστηματικής αιτίας και αποκατάσταση της ομαλής λειτουργίας.

Λόγω της αδυναμίας του διαγράμματος Shewhart να εντοπίσει συστηματικές αιτίες που προκαλούν μικρή μετατόπιση στη μέση τιμή του χαρακτηριστικού ποιότητας (ιδίως για διαγράμματα με όρια τριών τυπικών αποκλίσεων, $k = 3$, όπως προτάθηκε αρχικά από τον Shewhart), έχουν προταθεί κατά καιρούς τροποποιήσεις στη λειτουργία των διαγραμμάτων Shewhart είτε με κανόνες σειρών είτε με προειδοποιητικά όρια.



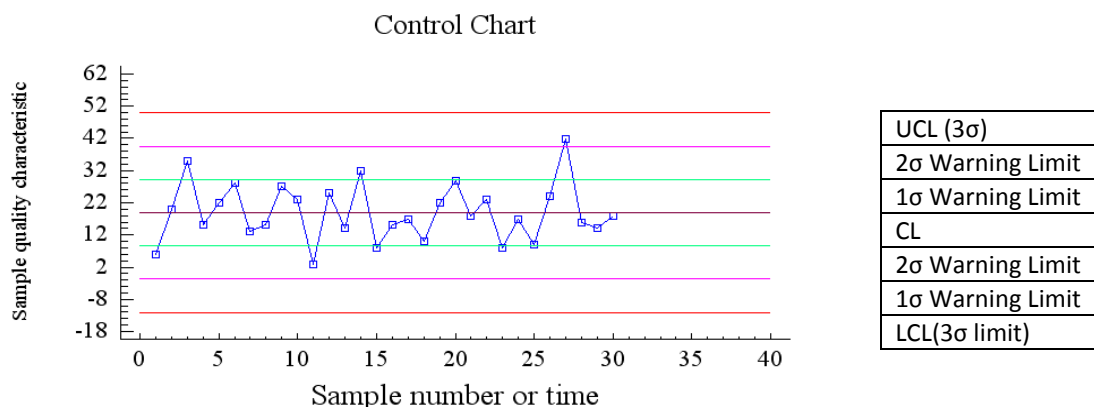
Σχήμα 2.1: Ενδεικτικό διάγραμμα ελέγχου ποιότητας

Εκτεταμένη αναφορά στα διαγράμματα ελέγχου με κανόνες σειρών πραγματοποιεί ο Montgomery (2001) ενώ χαρακτηριστικές εργασίες διαγραμμάτων ελέγχου με προειδοποιητικά όρια είναι αυτές των Page (1962) και Weindling et al (1970).

Τα προειδοποιητικά όρια (warning limits) 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 (Σχήμα 2.2):

- ✓ Ένα ή περισσότερα σημεία εκτός των ορίων ελέγχου
- ✓ Δύο από τρία συνεχόμενα σημεία στην ζώνη A (σε μια από τις δύο ζώνες A / η A ζώνη βρίσκεται μεταξύ του UCL και του ορίου των 2σ και αντίστοιχα μεταξύ του LCL και του 1σ)
- ✓ Τέσσερα από πέντε συνεχόμενα σημεία πέραν της ζώνης C (σε μια από τις δύο περιοχές / η ζώνη C βρίσκεται μεταξύ του CL και του 1σ και αντίστοιχα μεταξύ του CL και του 2σ , δηλαδή οι περιοχές άνω και κάτω της κεντρικής γραμμής)
- ✓ Οκτώ συνεχόμενα σημεία στην ίδια μεριά (επάνω ή κάτω) της κεντρικής γραμμής
- ✓ Έξι συνεχόμενα σημεία σε αύξουσα ή φθίνουσα διάταξη
- ✓ Δεκαπέντε συνεχόμενα σημεία στην ολική ζώνη C
- ✓ Δεκατέσσερα συνεχόμενα σημεία σε εναλλασσόμενη μορφή “πάνω-κάτω”
- ✓ Οκτώ συνεχόμενα σημεία εκτός της ολικής ζώνης C
- ✓ Οποιαδήποτε ασυνήθιστη ή μη τυχαία ακολουθία σημείων

✓ Ένα ή περισσότερα σημεία κοντά στα προειδοποιητικά όρια ή τα όρια ελέγχου.
Οι πρώτοι τέσσερις κανόνες είναι γνωστοί ως Western Electric Rules (Αντζουλάκος, 2008).



Σχήμα 2.2: Διάγραμμα Shewhart με εμφάνιση των χαρακτηριστικών ζωνών A,B,C

Αρκετά χρόνια μετά την εισαγωγή του διαγράμματος Shewhart, προτάθηκαν διαγράμματα ελέγχου με κριτήρια σχεδίασης τη μεγιστοποίηση του κέρδους ή την ελαχιστοποίηση του μέσου συνολικού κόστους ελέγχου ποιότητας. Το κόστος ποιότητας συνίσταται σε κόστος ελέγχων, ελαττωματικών προϊόντων που διαφεύγουν από το σύστημα ελέγχου, λανθασμένης εκτίμησης ότι η παραγωγή λειτουργεί εκτός στατιστικού ελέγχου και σε κόστος διακοπής της παραγωγής και απομάκρυνσης της συστηματικής αιτίας, όταν αυτή υφίσταται (Νενές, 2006). Πρωτοπόρος στη σχεδίαση διαγραμμάτων ελέγχου με οικονομικά κριτήρια, υπήρξε ο Duncan (1956), ο οποίος διαμόρφωσε μαθηματικό πρότυπο υπολογισμού του μέσου κόστους ανά μονάδα χρόνου σε παραγωγική διαδικασία που παρακολουθείται από διάγραμμα Shewhart ελέγχου μέσης τιμής. Με την οικονομική βελτιστοποίηση των διαγραμμάτων ασχολήθηκαν επίσης, μεταξύ άλλων, οι Bather (1963), Knappenberg and Grandage (1969) και von Collani (1987, 1988). Οι Goel et al (1968) προτείνουν τρόπους για την εύρεση των βέλτιστων παραμέτρων στο μοντέλο του Duncan. Ο Duncan (1971) επεκτείνει το δικό του μοντέλο προς την ύπαρξη πολλαπλών συστηματικών αιτιών. Ο Gibra (1971) παρουσιάζει ένα οικονομικό μοντέλο αντίστοιχο του Duncan (1956) και βρίσκει με αναλυτικό τρόπο τις βέλτιστες παραμέτρους σχεδίασης. Οι Saniga και Montgomery (1977) παρουσιάζουν τέσσερις διαφορετικούς τύπους παρακολούθησης παραγωγικών διαδικασιών, βρίσκουν τα βέλτιστα οικονομικά αποτελέσματα κάθε τύπου και πραγματοποιούν οικονομικές συγκρίσεις. Ένα πολύ ευέλικτο οικονομικά σχεδιασμένο πρότυπο που μπορεί να χρησιμοποιηθεί είτε για διαγράμματα Shewhart, είτε για αθροιστικά και εκθετικής εξομάλυνσης, προτείνεται από τους Lorenzen και Vance (1986).

Η οικονομική σχεδίαση διαγραμμάτων ελέγχου μέσης τιμής για παραγωγική διαδικασία περιορισμένης χρονικής διάρκειας μελετήθηκε από τον Crowder (1992), ο οποίος παρουσιάζει στην εργασία του ένα διάγραμμα Shewhart στο οποίο τα όρια ελέγχου γίνονται πιο πλατιά όσο η παραγωγική διαδικασία πλησιάζει προς την ολοκλήρωσή της. Η μορφή αυτή οφείλεται στο ότι το αναμενόμενο κέρδος από την αποκατάσταση της διαδικασίας όταν αυτή είναι κοντά στην ολοκλήρωσή της μπορεί να μη δικαιολογεί το κόστος επέμβασης και άρα τα όρια γίνονται λιγότερο αυστηρά. Οι Del Castillo και Montgomery (1993, 1996) παρουσιάζουν και βελτιστοποιούν το διάγραμμα Shewhart, ενώ αντίστοιχη οικονομική σχεδίαση διαγραμμάτων ποσοστού ελαττωματικών για παραγωγική διαδικασία περιορισμένης χρονικής διάρκειας είχε προταθεί προηγουμένως από τον Ladany (1973). Οι Ladany and Bedi (1976) επεκτείνουν το μοντέλο του Ladany (1973)

θεωρώντας ως παράμετρο σχεδίασης και τη διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας. Ο Tagaras (1996) προσαρμόζει το μοντέλο του Ladany (1973) και παρουσιάζει ακριβέστερη συνάρτηση κόστους στην περίπτωση διαγράμματος ελέγχου μέσης τιμής. Ο Montgomery (1980) και οι Hoand, Case (1994) συνοψίζουν στις εργασίες τους τα οικονομικά σχεδιασμένα διαγράμματα που είχαν προταθεί μέχρι τη δημοσίευση των εργασιών (Νενές, 2006).

2.9 Διαγράμματα ελέγχου μεταβλητών

Τα διαγράμματα ελέγχου μεταβλητών ή αλλιώς διαγράμματα ελέγχου χαρακτηριστικών μέτρησης, χρησιμοποιούνται όταν η μετρούμενη παράμετρος ποιότητας είναι ένα αριθμητικό μέγεθος που μπορεί να λάβει μετρούμενες αριθμητικές τιμές, όπως βάρος, πίεση, θερμοκρασία, μήκος, διάμετρος κ.α. Για την κατασκευή ενός διαγράμματος ελέγχου γίνεται μέτρηση της παραμέτρου ποιότητας x με λήψη ενός καθορισμένου αριθμού δειγμάτων κάθε φορά (Γαλετάκης, 2000).

2.10 Διαγράμματα ελέγχου μέσης τιμής – εύρους

Για να κατασκευάσουμε ένα διάγραμμα μέσης τιμής – εύρους λαμβάνονται k δείγματα μεγέθους n το καθένα κατά την παραγωγική διαδικασία. Οι συνηθέστερες τιμές των k και n είναι αντίστοιχα 20 και 5, ώστε να εξασφαλίζεται ότι η ενυπάρχουσα μεταβλητότητα στην παραγωγή απεικονίζεται ικανοποιητικά από τα δείγματα. Στο επόμενο βήμα υπολογίζεται ο μέσος όρος $\bar{x}$ και το εύρος R από τις Σχέσεις (2.1, 2.2) (Γαλετάκης, 2000):

$$R = x_{\max} - x_{\min} \text{ όπου } i=1,2,3,\dots,n \quad (2.1)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x \quad (2.2)$$

Στη συνέχεια ο γενικός μέσος $\bar{\bar{x}}$ και το μέσο εύρος διακύμανσης $\bar{R}$ από τους αντίστοιχους τύπους:

$$\bar{\bar{x}} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \bar{x} \quad (2.3)$$

$$\bar{R} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k R_i \quad (2.4)$$

Τα ανώτερα (UCL) και κατώτερα (LCL) όρια ελέγχου υπολογίζονται ξεχωριστά για το διάγραμμα $\bar{x}$ και το διάγραμμα R σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις (Aft, 1998):

$$\text{➤ Διάγραμμα } \bar{x}: UCL_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} + A_2 R \quad (2.5)$$

$$LCL_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} - A_2 R \quad (2.6)$$

$$\text{➤ Διάγραμμα } \bar{R}: UCL_R = D_4 R \quad (2.7)$$

$$LCL_R = D_3 R \quad (2.8)$$

$$\text{Τυπική απόκλιση } \hat{\sigma}: \hat{\sigma} = \frac{R}{d_2} \quad (2.9)$$

Οι συντελεστές D_4 , R , D_3 είναι συνάρτηση του μεγέθους n του δείγματος.

2.11 Κατασκευή διαγράμματος ελέγχου μέσης τιμής – τυπικής απόκλισης

Η μόνη διαφορά στη λειτουργία του διαγράμματος ελέγχου τυπικής απόκλισης σε σχέση με το διάγραμμα R έγκειται στην χρησιμοποιούμενη στατιστική δείγματος, η οποία στο διάγραμμα S είναι η τυπική απόκλιση δείγματος. Το διάγραμμα αυτό χρησιμοποιείται για μεγάλα σχετικά μεγέθη δείγματος $n \geq 12$ και κατασκευάζεται όπως το διάγραμμα $(\bar{x}-R)$.

Η τυπική απόκλιση S και η μέση τυπική απόκλιση $\bar{S}$ υπολογίζονται από τις σχέσεις (2.10, 2.11) (Ταγαράς, 2001):

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x - x_i)^2}{n-1}} \quad \text{για } i=1,2,\dots,n \quad (2.10)$$

$$\bar{S} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k S_j \quad \text{για } j=1,2,\dots,k \quad (2.11)$$

Τα ανώτερα (UCL) και κατώτερα όρια (LCL) υπολογίζονται ξεχωριστά για το διάγραμμα $\bar{x}$ και το διάγραμμα S σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις (Aft. 1998):

$$\text{➤ Διάγραμμα } \bar{x} : UCL_{\bar{x}} = \bar{x} + A_3 \bar{S} \quad (2.12)$$

$$LCL_{\bar{x}} = \bar{x} - A_3 \bar{S} \quad (2.13)$$

$$\text{➤ Διάγραμμα S: } UCL_S = B_4 \bar{S} \quad (2.14)$$

$$LCL_S = B_3 \bar{S} \quad (2.15)$$

$$\text{Τυπική απόκλιση } \hat{\sigma}: \hat{\sigma} = \frac{\bar{S}}{c_4} \quad (2.16)$$

2.12 Διαγράμματα ελέγχου μεμονωμένων τιμών

Σε πολλές παραγωγικές διαδικασίες το κάθε δείγμα που λαμβάνεται για τον στατιστικό έλεγχο της διαδικασίας αποτελείται από μια μόνο μέτρηση ($n=1$). Οι σημαντικότεροι λόγοι που καθιστούν τη λήψη μεγαλύτερων δειγμάτων είτε αδύνατη είτε άσκοπη είναι οι ακόλουθοι (Ταγαράς, 2001):

- Η διαδικασία χαρακτηρίζεται από την συνεχή ροή ενός απολύτως ομογενούς προϊόντος οπότε περισσότερες μετρήσεις του χαρακτηριστικού ποιότητας θα έδιναν ακριβώς το ίδιο αποτέλεσμα
- Η διαδικασία υποστηρίζεται από μέθοδο αυτόματου ελέγχου και μετρήσεων (on-line) οπότε το χαρακτηριστικό ποιότητας κάθε παραγόμενης μονάδας μετρείται ούτως ή άλλως
- Ο ρυθμός παραγωγής είναι ιδιαίτερα χαμηλός και επομένως δεν είναι σκόπιμη η δημιουργία μεγάλων δειγμάτων, διότι οι μετρήσεις θα έχουν σημαντική χρονική απόσταση

Σε αυτές τις παραγωγικές διαδικασίες δεν πληρούνται οι προϋποθέσεις για χρήση διαγραμμάτων $\bar{x}-R$ ή $\bar{x}-s$ επειδή $n=1$. Στις περιπτώσεις αυτές σχηματίζεται ένα ψευδές δείγμα που απαρτίζεται από την τρέχουσα τιμή και την προηγούμενη και ο μέσος $\bar{x}$ υπολογίζεται ως ο κινητός μέσος εύρους m και το R ή το S, από τα m δείγματα σύμφωνα με τις σχέσεις (2.17, 2.18) (Bissel, 1994):

$$\bar{X}_i = \frac{X_{i-m+1} + X_{i-m+2} + \dots + X_i}{m} \quad (2.17)$$

$$R_i = X_{\max} - X_{\min} \quad (2.18)$$

Για την πιο συνηθισμένη περίπτωση όπου $m=2$ οι σχέσεις υπολογισμών μετατρέπονται στις παρακάτω:

$$\bar{X}_i = \frac{x_{i-1} + x_i}{2} \quad (2.19)$$

$$R_i = |x_i - x_{i-1}| \quad (2.20)$$

Τα άνω και κάτω όρια υπολογίζονται όπως στα συνήθη διαγράμματα ενώ οι συντελεστές επιλέγονται στο μέγεθος δείγματος που αντιστοιχεί στο πλάτος του κινητού μέσου που έχει χρησιμοποιηθεί (Γαλετάκης, 2000).

Λόγω της μικρής ισχύος τους, τα διαγράμματα αυτά χρησιμοποιούνται όταν δεν υπάρχουν υψηλές απαιτήσεις ικανότητας ανίχνευσης μεταβολών της μέσης τιμής. Όταν είναι αναγκαίο να ανιχνεύονται γρήγορα ακόμα και τέτοιες μικρές μεταβολές αλλά και με μέγεθος δείγματος $n=1$ τότε μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ειδικά διαγράμματα όπως το αθροιστικό διάγραμμα και το διάγραμμα εκθετικής εξομάλυνσης.

2.17 Διαγράμματα πολλαπλών χαρακτηριστικών μέτρησης

Όταν τα προϊόντα μιας παραγωγικής διαδικασίας έχουν περισσότερα από ένα χαρακτηριστικά μέτρησης που συσχετίζονται για τον έλεγχο της παραγωγικής διαδικασίας χρησιμοποιείται το διάγραμμα Hotelling T^2 που προτάθηκαν από τον Hotelling το 1947. Μέχρι τότε γινόταν ευρεία χρήση των διαγραμμάτων Shewhart για p ποιοτικά χαρακτηριστικά που το καθένα εμφανίζει πιθανότητα $1 - \alpha$ (αν α είναι η στάθμη σημαντικότητας) να λάβει τιμή εντός των ορίων $\mu \pm 3\sigma$ (διαδικασία ελεγχόμενη). Η πιθανότητα να είναι όλα τα ποιοτικά χαρακτηριστικά εντός της περιοχής $\mu \pm 3\sigma$ είναι (Γαλετάκης, 2001):

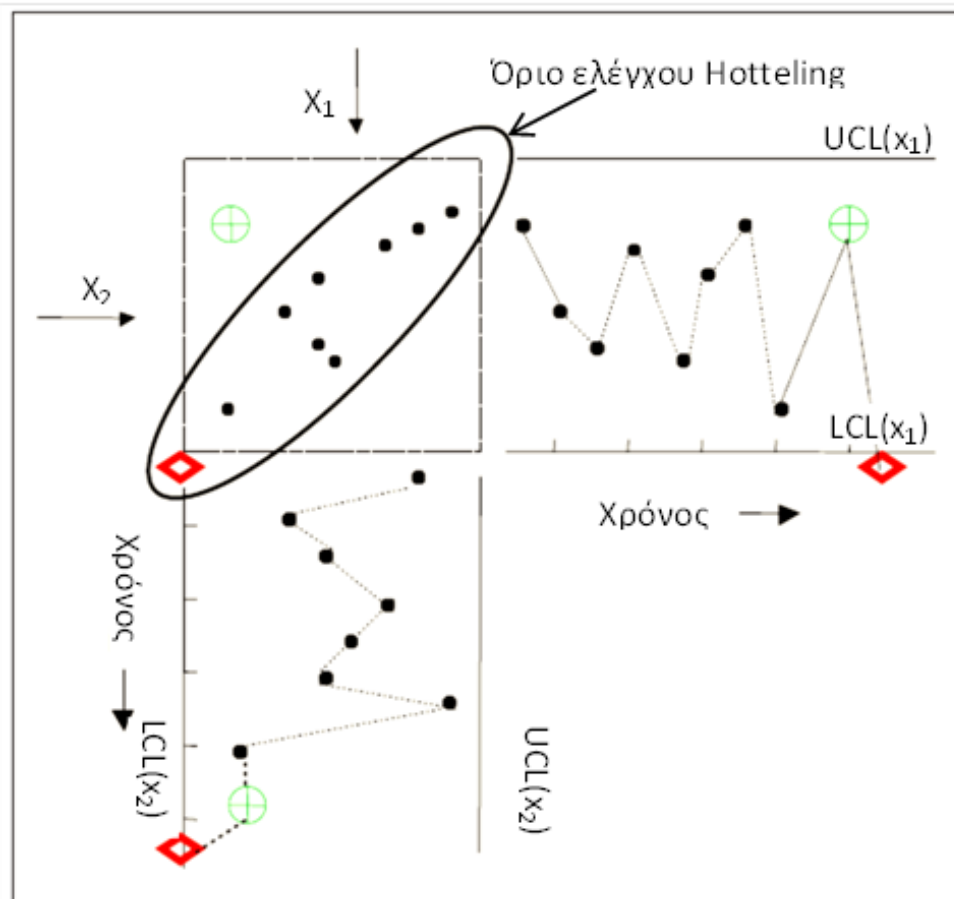
$$P(\mu - 3\sigma \leq \bar{x} \leq \mu + 3\sigma) = (1 - \alpha)^p \quad (2.21)$$

Η πιθανότητα αυτή ελαττώνεται σημαντικά με την αύξηση του p . Αν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά δεν είναι ανεξάρτητα τότε η παραπάνω σχέση δεν ισχύει με αποτέλεσμα τα αποτελέσματα του ελέγχου με χρήση πολλαπλών διαγραμμάτων Shewhart να είναι εσφαλμένα. Την λύση έδωσαν τα διαγράμματα Hotelling όπου γίνεται ο έλεγχος μιας μεταβλητής, της T^2 , παρουσιάζοντας έτσι το πλεονέκτημα να μην επηρεάζεται η στάθμη σημαντικότητας του ελέγχου από τον αριθμό των παραμέτρων ποιότητας και να απαιτείται η κατασκευή ενός μόνο διαγράμματος ελέγχου. Όριο ελέγχου για την μεταβλητή Hotelling λαμβάνει υπόψη τη μορφή της κοινής κατανομής των μεταβλητών ποιότητας x_i που ενσωματώνει την τυχόν υπάρχουσα συσχέτιση.

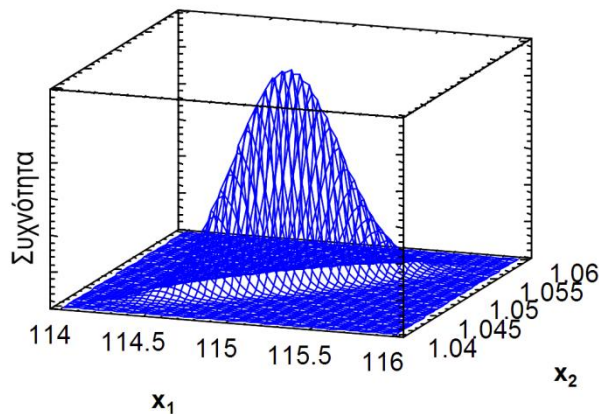
Το πρόβλημα αυτό παρουσιάζεται παραστατικά στο Σχήμα (2.10) για την περίπτωση του ταυτόχρονου ελέγχου δυο μεταβλητών, των x_1 και x_2 (Kourti, 2002). Η χρήση δύο μεμονωμένων διαγραμμάτων ελέγχου Shewhart με όρια στατιστικού ελέγχου $UCL(x_1)$, $LCL(x_1)$, $UCL(x_2)$ και $LCL(x_2)$ για τις x_1 και x_2 αντίστοιχα δίνει διαφορετικές εκτός στατιστικού ελέγχου περιπτώσεις συγκρινόμενη με το έλεγχο Hotelling. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι

η περιοχή ελέγχου Hotelling, με βάση την από κοινού κατανομή των x_1 και x_2 , (Σχήμα 2.3) είναι μια έλλειψη, ενώ η οριζόμενη από τα μεμονωμένα διαγράμματα Shewhart είναι το ορθογώνιο που ορίζεται από τα $UCL(x_1)$, $LCL(x_1)$, $UCL(x_2)$ και $LCL(x_2)$ (Σχήμα 2.3). Έτσι μετρήσεις που εμφανίζονται στο Σχήμα (2.10) εντός στατιστικού ελέγχου με βάση τα μεμονωμένα διαγράμματα Shewhart (πράσινος κύκλος με σταυρό), είναι εκτός στατιστικού ελέγχου κατά Hotelling. Στον αντίποδα μετρήσεις που εμφανίζονται εντός στατιστικού ελέγχου με βάση τα μεμονωμένα διαγράμματα Shewhart (κόκκινος ρόμβος) είναι εντός στατιστικού ελέγχου κατά Hotelling.

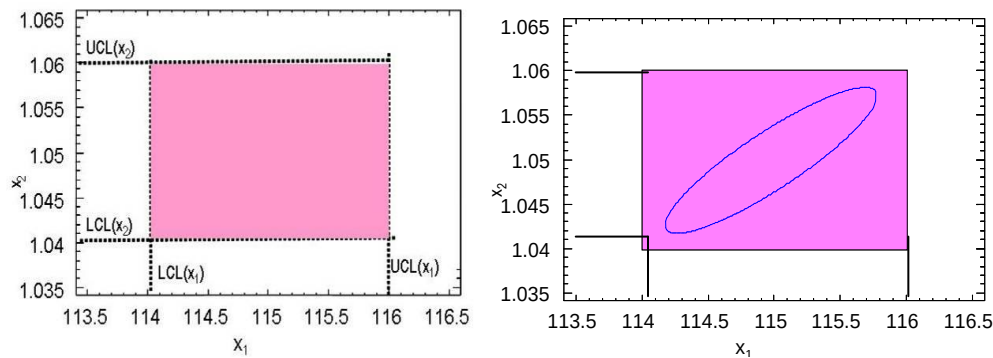
Οι υπολογιστικές δυσκολίες που υπήρχαν στο παρελθόν λόγω της πολυπλοκότητας των σχέσεων υπολογισμού T^2 δεν υφίστανται πλέον με την καθιέρωση των υπολογιστών και την ανάπτυξη λογισμικού. Η δυσκολία που υπάρχει είναι να ερμηνευθεί η εκτός στατιστικού ελέγχου κατάσταση που έχει εντοπισθεί με τα διαγράμματα Hotelling επειδή το μέγεθος T^2 δεν αποτελεί φυσικό ποιοτικό χαρακτηριστικό. Για να βρεθεί ποιες παράμετροι ποιότητας οδήγησαν σε εκτός ελέγχου κατάσταση, απαιτείται συνήθως η κατασκευή και των μεμονωμένων διαγραμμάτων ελέγχου κάθε μιας παραμέτρου ξεχωριστά (Γαλετάκης, 2001).



Σχήμα 2.3: Το πρόβλημα του ελέγχου πολλαπλών μεταβλητών με μεμονωμένα διαγράμματα ελέγχου Shewhart



Σχήμα 2.4: Κοινή κατανομή των μεταβλητών ελέγχου x_1, x_2



Σχήμα 2.5: Περιοχή ελέγχου για τα μεμονωμένα διαγράμματα Shewhart των x_1 και x_2 (αριστερά) και ελλειπτική περιοχή ελέγχου κατά Hotelling (δεξιά)

Για τον υπολογισμό του T^2 απαιτείται η χρήση των ακόλουθων παραμέτρων που συμβολίζονται ως εξής:

α = στάθμη σημαντικότητας (στατιστικό σφάλμα τύπου I)

n = μέγεθος δείγματος

p = αριθμός μετρούμενων χαρακτηριστικών ανά δείγμα

s = τυπική απόκλιση

T^2 = στατιστική παράμετρος

x = διάνυσμα ποιοτικών χαρακτηριστικών (διάνυσμα ποιότητας)

$\bar{x}$ = μέση τιμή διανύσματος ποιότητας δείγματος

S = πίνακας συνδιακυμάνσεων

$\bar{\bar{x}}$ = τελική μέση τιμή ποιότητας όλων των δειγμάτων

m = αριθμός των δειγμάτων

F = η τιμή της κατανομής

Αν για την εκτίμηση της ποιότητας μετρούνται p διαφορετικά χαρακτηριστικά σε m δείγματα, μεγέθους n , τότε η μέση τιμή $\bar{x}$ κάθε δείγματος είναι:

$$\bar{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \\ \vdots \\ \bar{x}_p \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Σύμφωνα με τον Hotelling, ο δείκτης ελέγχου ποιότητας T^2 ορίζεται όπως παρακάτω (Montgomery, 1985):

$$T^2 = n((\bar{\mathbf{x}} - \bar{\bar{\mathbf{x}}})S^{-1}(\bar{\mathbf{x}} - \bar{\bar{\mathbf{x}}})) \quad (2.23)$$

Όπου:

$$\bar{\bar{\mathbf{x}}} = [\bar{\bar{x}}_1, \bar{\bar{x}}_2, \dots, \bar{\bar{x}}_p] \quad (2.24)$$

Είναι ο πίνακας των τελικών μέσων τιμών των δειγμάτων για τα ποιοτικά χαρακτηριστικά x_1, x_2, x_p , και S είναι ο πίνακας ($p \times p$) των συνδιακυμάνσεων των p χαρακτηριστικών ποιότητας.

Το διάγραμμα ελέγχου για το T^2 έχει ένα ανώτερο όριο (Upper Control Limit ή UCL) που ορίζεται σύμφωνα με τη σχέση (Montgomery, 1985):

$$UCL = \left(\frac{mnp - mp - np + 1}{mn - m - p + 1} \right) F_{a,p,(mn-m+p+1)} \text{ για } n \geq p \quad (2.25)$$

Όπου $F_{a,p,(mn-m+p+1)}$ η τιμή που προκύπτει από τους πίνακες της κατανομής F για βαθμούς ελευθερίας $p, (mn-m+p+1)$ και στάθμη σημαντικότητας α .

Ο υπολογισμός των $\bar{x}$ και S βασίζεται στα δείγματα μεγέθους n που ελήφθησαν με την παραδοχή ότι κατά τη χρονική διάρκεια λήψης των, η παραγωγική διαδικασία ήταν υπό έλεγχο. Αν ελήφθησαν m τέτοια δείγματα τότε οι υπολογισμοί βασίζονται στις παρακάτω σχέσεις:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{ijk} \quad (2.26)$$

$$S_{ij}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{ijk} - \bar{x}_{ij})^2 \quad (2.27)$$

Όπου $i=1,2,3,\dots,p, j=1,2,3,\dots,m$ και $k=1,2,3,\dots,n$

Η συνδιακύμανση μεταξύ του ποιοτικού χαρακτηριστικού i και h στο δείγμα j είναι:

$$S_{ihj} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{ijk} - \bar{x}_{ij})(x_{ihk} - \bar{x}_{ih}) \text{ όπου } j=1,2,3,\dots,p, j=1,2,3,\dots,m \text{ και } h \neq i \quad (2.28)$$

Οι μέσες τιμές για τα μεγέθη $\bar{x}_{ij}$, S_{ij}^2 και S_{ihj} για όλα τα δείγματα m είναι:

$$\bar{\bar{x}} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \bar{x}_{ij} \quad (2.29)$$

$$s_i^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m S_{ij}^2 \quad (2.30)$$

$$s_{ih} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m s_{ihj} \quad (2.31)$$

Τα στοιχεία του πίνακα $\bar{\bar{X}}$ είναι τα $\bar{\bar{x}}_i$ ενώ ο πίνακας συνδιακυμάνσεων S είναι:

$$S = \begin{bmatrix} s_1^2 & s_{12} & s_{13} \\ & s_2^2 & s_{23} \\ & & s_p^2 \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

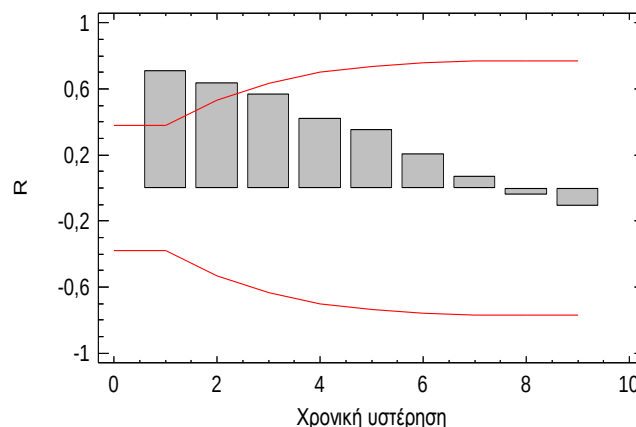
2.18 Υπολογισμός του T^2 για αυτοσυσχετιζόμενες μεταβλητές

Ο υπολογισμός των παραμέτρων των διαγραμμάτων ελέγχου Hotelling βασίζεται στην παραδοχή ότι οι μετρήσεις δεν εμφανίζουν χρονική εξάρτηση (αυτοσυσχέτιση). Στην περίπτωση ύπαρξης αυτοσυσχέτισης απαιτείται να μετασχηματιστούν οι αρχικές μετρήσεις και να απομακρυνθεί η επίδραση της αυτοσυσχέτισης που οδηγεί σε εσφαλμένη εκτίμηση των στατιστικών παραμέτρων (μ , σ) της διαδικασίας και κατά συνέπεια σε λανθασμένο υπολογισμό του T^2 (Γαλετάκης, 2010). Σύμφωνα με τους Johnson και Bagshaw (1974) ο ενδεδειγμένος τρόπος για την αντιμετώπιση του προβλήματος της αυτοσυσχέτισης για απλά διαγράμματα ελέγχου (έλεγχος μιας μεταβλητής) περιλαμβάνει τον προσδιορισμό ενός αυτοπαλινδρομικού μοντέλου k τάξης για χρονοσειρές και εφαρμογή του ελέγχου στα υπόλοιπα του μοντέλου (Σχέση 2.33). Η μορφή ενός τέτοιου μοντέλου δίνεται από τη Σχέση (2.33):

$$x_t = \varphi_0 + \varphi_1 x_{t-1} + \varphi_2 x_{t-2} + \dots + \varphi_k x_{t-k} + \varepsilon_t \quad (2.33)$$

όπου x_t η μέτρηση κατά τη χρονική στιγμή t , φ_k οι όροι του αυτοπαλινδρομικού μοντέλου για τις μετρήσεις που απέχουν k χρονικά διαστήματα (υστέρηση) και ε_t το σφάλμα (υπόλοιπο) που δεν επεξηγείται από το μοντέλο. Για την επιλογή της τάξης k του μοντέλου συνήθως προσδιορίζονται οι τιμές των συντελεστών αυτοσυσχέτισης R_k και υπολογίζεται η ανώτερη τάξη της οποίας οι συντελεστές είναι στατιστικά σημαντικοί. Ο υπολογισμός των γίνεται R_k με βάση την Σχέση (2.34) (Montgomery, 1985):

$$R_k = \frac{\frac{1}{n-k} \sum_{t=1}^{n-k} (x_{t-k} - \bar{x})(x_t - \bar{x})}{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n-k} (x_t - \bar{x})^2} \quad (2.34)$$



Σχήμα 2.6: Μεταβολή του συντελεστή αυτοσυσχέτισης R_k για μια τυχαία μεταβλητή σε σχέση με τη χρονική υστέρηση k . Οι συμμετρικές καμπύλες δίνουν τα όρια του διαστήματος εμπιστοσύνης του R_k για $\alpha=0,05$

Οι όροι φ_k του αυτοπαλινδρομικού μοντέλου υπολογίζονται με τη χρήση των τεχνικών της πολλαπλής γραμμικής παλινδρόμησης. Ως εξαρτημένη μεταβλητή θεωρείται η σειρά των μετρήσεων $(x_k, x_{k+1}, \dots, x_n)$ ενώ ως ανεξάρτητες μεταβλητές θεωρούνται οι k σειρές μετρήσεων $(x_1, x_2, \dots, x_{n-k}), (x_2, x_3, \dots, x_{n-k+1})$. Στην πράξη, οι περισσότερες περιπτώσεις σειρών μετρήσεων $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ με χρονική εξάρτηση που η συνάρτηση πυκνότητας πιθανότητας του x_t δεν μεταβάλλεται χρονικά (στασιμότητα), μπορούν να περιγραφούν με ικανοποιητική ακρίβεια με απλά αυτοπαλινδρομικά μοντέλα χαμηλής τάξης (συνήθως $k=1$ ή $k=2$).

Για τις περιπτώσεις ελέγχου πολλαπλών μεταβλητών με διαγράμματα Hotelling απαιτείται η ανάπτυξη αυτοπαλινδρομικών μοντέλων για κάθε μια από τις μεταβλητές ελέγχου. Το νέο μέγεθος T^2 για τα υπόλοιπα e_t υπολογίζεται και πάλι με βάση τη σχέση που έχει ήδη αναφερθεί ενώ το όριο ελέγχου (UCL) υπολογίζεται από την εξίσωση 2.35), (Montgomery, 1985).

$$UCL = \left(\frac{mnp - mp - np + 1}{mn - m - p + 1} \right) F_{\alpha, p, (mn - m + p + 1)} \text{ για } n \geq p \quad (2.35)$$

2.19 Σύγκριση διαγραμμάτων Hotelling με απλά διαγράμματα Shewhart

Τα διαγράμματα Hotelling έχουν την δυνατότητα να ελέγχουν περισσότερα του ενός χαρακτηριστικά ενώ ταυτόχρονα αυξάνουν την ευαισθησία του ποιοτικού ελέγχου. Σ' αντίθεση με ένα απλό διάγραμμα Shewhart που δεν μπορεί να είναι το ίδιο αποτελεσματικό και πολλές φορές να μην μπορεί να ανιχνεύσει αιτίες που οδηγούν την παραγωγική διαδικασία εκτός ελέγχου αφού κάθε φορά μελετούν μια παράμετρο χωρίς να λαμβάνουν υπόψη τους τις υπόλοιπες.

Ένα μειονέκτημα των διαγραμμάτων Hotelling που υπήρχε στο παρελθόν ήταν ο σχετικά πολύπλοκος υπολογισμός του μεγέθους T^2 . Το εμπόδιο αυτό ξεπεράστηκε όμως με την χρήση των ηλεκτρονικών υπολογιστών και την ανάπτυξη ειδικού λογισμικού. Επίσης υπάρχει δυσκολία στο να ερμηνευτούν εκτός στατιστικού ελέγχου καταστάσεις αφού το μέγεθος T^2 δεν αποτελεί ένα φυσικό ποιοτικό χαρακτηριστικό. Σε τέτοιες περιπτώσεις κρίνεται απαραίτητο να υπολογιστεί η συνεισφορά κάθε μιας μεταβλητής ποιότητας x_i στην διαμόρφωση της τιμής του T^2 και να συνδυαστεί το διάγραμμα Hotelling με τα απλά διαγράμματα Shewhart (Γαλετάκης, 2001).

2.20 Εφαρμογές στη χημική βιομηχανία

Με στόχο πάντοτε την παραγωγή προϊόντων υψηλής ποιότητας και την ικανοποίηση των αναγκών του τελικού αποδέκτη με παράλληλη μείωση του κόστους, η εφαρμογή του στατιστικού ελέγχου ποιότητας αποδεικνύεται πολύτιμη. Μερικές από τις δυνατότητες που προσφέρει ο SPC στη βιομηχανία χημικών είναι η παρακολούθηση και ο έλεγχος διεργασιών, ο προσδιορισμός βελτιωτικών ενεργειών και αποδόσεων και η ανάλυση προϊόντων και διεργασιών προκειμένου να εξασφαλιστεί η διαρκής συμμόρφωση με τις προδιαγραφές. Επιπλέον ο SPC μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την αξιολόγηση εργαστηριακού εξοπλισμού ελέγχου, την παρακολούθηση αποδόσεων, τη διαχείριση εφοδιαστικής αλυσίδας και την παρακολούθηση περιβαλλοντικών ρυπαντών (Κουλούρη, Μουρελάτου, 2007). Ο Πίνακας (2.1) παρουσιάζει χαρακτηριστικές περιπτώσεις της

βιομηχανίας χημικών υλών που για την μελέτη τους γίνεται χρήση των εργαλείων που παρέχει ο στατιστικός έλεγχος ποιότητας.

Πίνακας 2.1: Εφαρμογές του στατιστικού ελέγχου στη χημική βιομηχανία

Εφαρμογή	Τύπος διαγράμματος ελέγχου	Ερευνητές
Παρακολούθηση της ποιότητας του νερού	X, MR	Zimmerman et al (1996)
Αντιδραστήρας πολυμερισμού	MSPC	P. Nomikos και J. Mac Gregor (1995)
Χημικές αναλύσεις	$\bar{x}$ και R, CuSum	V.I. Dvorkin (2000)
Καταλυτική διάσπαση και κλασματική απόσταξη σε διυλιστήριο πετρελαίου	PCA και PLS	C. Slama (1991)
Παρακολούθηση της ποιότητας αποθηκευμένου ύδατος	CUSUM	R. Mac Nally και B.T. Hart (1997)
Σύγκριση παρτίδων PVC με προηγούμενες αποδεκτές παρτίδες	MSPC	Tates et al (1999)
Ανάλυση διεργασίας πολυμερισμού γαλακτώματος	PLS	D. Neogi, C.E. Schlags(1998)
Παρακολούθηση παρτίδων σε διεργασίες πολυμερισμού, σε πραγματικό χρόνο	Διαγράμματα T^2	H. Albazzaz, X.Z. Wang (2004)
Παρακολούθηση βιομηχανικής διεργασίας πολυμερισμού	PCA, PLS	M.J.Piovosio (1992)
Διάγνωση προβλημάτων κατά την παραγωγή φωτογραφικού χαρτιού	PCA, PLS	J.N. Miller (1993)
Παρακολούθηση διεργασίας σχηματισμού πολυμερικής μεμβράνης	PCA	Lane et al (2003)
Παρακολούθηση γραμμής παραγωγής πολυμερικής μεμβράνης υψηλών ταχυτήτων	MSPC	Weighell et al (2001)
*Επεξήγηση συντομεύσεων: Διάγραμμα T^2: Διάγραμμα Hotelling, MSPC: Στατιστικός έλεγχος πολλαπλών μεταβλητών (Multiple Statistical Process Control), $\bar{x}$ - R: Διάγραμμα Μέσης τιμής – Εύρους, PLS: Μέθοδος Μερικών Ελαχίστων Τετραγώνων (Partial Least Square), PCA:Μέθοδος Ανάλυσης σε Κύριες Συνιστώσες (Principal Component Analysis), CuSum: Σωρευτικό ή Αθροιστικό Διάγραμμα Ελέγχου (Cumulative Control Chart), X: Διάγραμμα μεμονωμένων τιμών, MR: Διάγραμμα Κινούμενου Μέσου		

Παρατηρούμε ότι σε αυτές τις εφαρμογές χρησιμοποιούνται κυρίως μέθοδοι πολυμεταβλητού ελέγχου ποιότητας, όπως η μέθοδος ανάλυσης σε κύριες συνιστώσες και η μέθοδος των μερικών ελαχίστων τετραγώνων που έχουν ως κύριο χαρακτηριστικό τη συμπύκνωση μεγάλου όγκου πληροφοριών, που προκύπτουν από μεταβλητές με υψηλό βαθμό συσχέτισης σε μια συνοπτική μορφή, η οποία περιγράφει ικανοποιητικά το σημαντικότερο μέρος της μεταβλητότητας των δεδομένων. Με τον τρόπο αυτό δίνουν τη δυνατότητα ανάπτυξης απλών και ταυτόχρονα εξαιρετικά αποτελεσματικών διαδικασιών στατιστικού ελέγχου πολύπλοκων συστημάτων.

2.21 Εφαρμογές στην μεταλλουργία, παραγωγή ενέργειας και περιβαλλοντική τεχνολογία

Ο στατιστικός έλεγχος ποιότητας στη βιομηχανία υλικών δεν θα μπορούσε να έχει διαφορετικό ρόλο από την ανάλυση της μεταβλητότητας μιας διεργασίας, τον προσδιορισμό των αιτιών της και τη μείωση του κόστους (Κουλούρη και Μουρελάτου, 2007). Χαρακτηριστικές εφαρμογές του SPC στους τομείς που μελετήθηκαν είναι η παρακολούθηση της διεργασίας μεταλλικών συγκολλήσεων (Maul et al, 1996), η παρακολούθηση διεργασίας σχηματισμού λεπτού στρώματος υλικού με εφαρμογή σε βιομηχανίες χαρτιού, πολυμερών, μεταλλικών κυλίνδρων (Arkun και Kayihan, 1998) και η παρακολούθηση διεργασιών πολυμερισμού σε παρτίδες (Schlags και Popule, 2001). Στον πίνακα αναφέρονται χαρακτηριστικές εφαρμογές στην μεταλλουργία, την παραγωγή ενέργειας και την περιβαλλοντική βιομηχανία.

Πίνακας 2.2: Εφαρμογές του στατιστικού ελέγχου στην μεταλλουργία, στην παραγωγή ενέργειας και στην περιβαλλοντική τεχνολογία

Εφαρμογή	Τύπος διαγράμματος ελέγχου	Ερευνητές
Παρακολούθηση της διεργασίας οξυγονοκόλλησης	$\bar{x}$, R, s	Cook et al (1997)
Παρακολούθηση συγκεντρώσεων B ₂ O ₃ σε ορυκτά βορίου	$\bar{x}$, R	Ipek et al (1999)
Σε διεργασία παρασκευής μιγμάτων κόνεως με στόχο τη βελτίωση ομοιογένειας, ελέγχοντας το βασικό συστατικό, που είναι η κόνις σιδήρου	Cusum	Semel et al (1988)
Παρακολούθηση αποθήκευσης πυρηνικών αποβλήτων	MSPC	Gallagher et al (1996)
Ανάλυση και παρακολούθηση της λειτουργίας μιας βιομηχανικής κεραμικής συσκευής τήξεως	PCA, PLS	Wise et al (1991)
Παρακολούθηση ρυπαντών	$\bar{x}$, R	Maurer et al (1988)
Παρακολούθηση της θερμοκρασίας κλιβάνου χαλυβουργίας	Διαγράμματα T ²	B. Lennox και D. Sandez (2002)
Έλεγχος περιεκτικότητας του χάλυβα σε άνθρακα	Διαγράμματα T ²	B. Lennox και D. Sandez (2002) στην εταιρία SSAB Oxelosund-Swedish Steel
Παρακολούθηση διεργασίας παραγωγής φωτοβολταϊκών κυττάρων	MEWMA	J.L.Coleman, J.Nickerson (2005)

*Επεξήγηση συντομεύσεων: $\bar{x}$ - R: Διάγραμμα Μέσης τιμής – Εύρους – Τυπικής απόκλισης, Διάγραμμα T²: Διάγραμμα Hotelling, MSPC: Στατιστικός έλεγχος πολλαπλών μεταβλητών (Multiple Statistical Process Control), PCA: Μέθοδος Ανάλυσης σε Κύριες Συνιστώσες (Principal Component Analysis), PLS: Μέθοδος Μερικών Ελαχίστων Τετραγώνων (Partial Least Square), CuSum: Σωρευτικό ή Αθροιστικό Διάγραμμα Ελέγχου (Cumulative Control)

Chart), MEWMA: Διάγραμμα Εκθετικής Εξομάλυνσης πολλαπλών μεταβλητών (Multiple Exponentially Weighted Moving Average)

Οι εφαρμογές που σχετίζονται με τη μεταλλουργία, την περιβαλλοντική τεχνολογία και την παραγωγή ενέργειας αναφέρονται τόσο στα μονομεταβλητά όσο και στα πολυμεταβλητά διαγράμματα ελέγχου.

2.22 Εφαρμογές στη βιομηχανία ηλεκτρονικών

Στον τομέα αυτό η σωστή εφαρμογή του στατιστικού ελέγχου ποιότητας βοηθάει στην (Κουλούρη, Μουρελάτου, 2007):

- Μείωση των ελαττωματικών προϊόντων που απορρίπτονται ή επανακατεργάζονται
- Βελτίωση της απόδοσης της διεργασίας
- Ταυτοποίηση ελαττωμάτων
- Συμμόρφωση με πρότυπα ποιότητας

Ο στατιστικός έλεγχος διεργασιών (SPC) στη βιομηχανία ηλεκτρονικών έχει εφαρμοστεί σε διεργασίες κατασκευής ιατρικών συσκευών για μηχανήματα θεραπείας με ακτινοβολία (S.M. Hanna, 2003), στην παρακολούθηση διεργασιών που εμπλέκονται για την παραγωγή VLSI chips (Limapond et al, 1998) και σε διεργασίες της βιομηχανίας ημιαγωγών με εφαρμογή τεχνικών MSPC. Τυπικές εφαρμογές του SPC στον τομέα των ηλεκτρονικών παρατίθενται στον Πίνακα (2.3).

Πίνακας 2.3: Εφαρμογές του στατιστικού ελέγχου στη βιομηχανία ηλεκτρονικών

Εφαρμογή	Τύπος διαγράμματος ελέγχου	Ερευνητές
Μηχανική και ηλεκτρική συγκόλληση εξαρτημάτων σε ηλεκτρικό κύκλωμα	$\bar{x}$, R, EWMA	Wu Zhao-hua (2005)
Παρακολούθηση κρίσιμων παραμέτρων και χαρακτηριστικών ποιότητας κατά την παραγωγή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων	$\bar{x}$	J. Mittendorf και P. Zwanziger (2000)
Παρακολούθηση αυτοματοποιημένης σύνδεσης μαγνητικής ταινίας στην τεχνολογία υγρών κρυστάλλων	$\bar{x}$, R	M.H. Caleb και S.M. Hong (2004)
Παρακολούθηση ελαττωμάτων κατά την παραγωγή ολοκληρωμένων κυκλωμάτων	Διαγράμματα T^2	Tong et al (2005)
Παρακολούθηση διεργασίας παραγωγής ημιαγωγών με πολλές πηγές μεταβλητότητας	Διαγράμματα T^2	Chen et al (2000)
Παρακολούθηση της ποιότητας συγκόλλησης σε ημιαγωγούς	EWMA	Feng Zhang (2006)
Προσαρμογή ρυθμίσεων μηχανημάτων κατά την εμφάνιση τάσεων στα διαγράμματα ελέγχου	EWMA	Guo et al (1997)
* Επεξήγηση συντομεύσεων: EWMA: Διάγραμμα Εκθετικής Εξομάλυνσης (Exponentially Weighted Moving Average), Διάγραμμα T^2 : Διάγραμμα Hotelling, $\bar{x}$ - R: Διάγραμμα Μέσης τιμής – Εύρους		

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Έλεγχος σύνθεσης πρώτων υλών για την παραγωγή του τσιμέντου

3.1 Προσδιορισμός της σύνθεσης του φορτίου, ανάμειξη (ομοιογενοποίηση) και ελάττωση μεγέθους (θραύση, λειοτρίβηση) των πρώτων υλών

Τα αργιλικά και πυριτικά πετρώματα, τα σιδηρομεταλλεύματα και ο ασβεστόλιθος είναι τα βασικά συστατικά για την παραγωγή του τσιμέντου. Κατά συνέπεια η χημική σύσταση του κλίνκερ που αποτελεί το αποτέλεσμα της έψησης της φαρίνας εξαρτάται από τις ποσότητες των πρώτων υλών που θα χρησιμοποιηθούν και τις χημικές και ορυκτολογικές ιδιότητες τους (Σχήμα 3.1). Παράλληλα σημαντικό ρόλο παίζει και η λειοτρίβηση του μίγματος που θα μας δώσει ένα ομοιόμορφο μίγμα φαρίνας. Κατά συνέπεια ο ακριβής προσδιορισμός της αναλογίας των πρώτων υλών που θα μας οδηγήσει στο επιθυμητό αποτέλεσμα πραγματοποιείται μέσα από τον υπολογισμό τριών δεικτών ποιότητας:

- το δείκτη κορεσμού ασβέστου, LSF (Lime Saturation Factor)
- τον πυριτικό δείκτη, SR (Silica Ratio) ή και SM (Silica Modulus)
- τον αργιλικό δείκτη, AR (Alumina Ratio) ή και AM (Alumina Modulus)
- το ισοδύναμο του νατρίου NaEq

Στο εξής η αναφορά στους δείκτες θα γίνεται με χρήση των συντομογραφιών LSF για τον δείκτη κορεσμού σε άσβεστο, SM για τον πυριτικό, AR για τον αργιλικό και NaEq για το ισοδύναμο του νατρίου.

Τα επιθυμητά όρια μεταβολής των δεικτών είναι:

0,92-0,98 για τον LSF

2,2-2,8 για τον SM,

1,2-2,0 για τον AR και

0,7-1,1 για το NaEq

Οι χημικοί τύποι υπολογισμού των δεικτών αυτών με βάση τη χημική σύσταση των υλικών εκφρασμένη σε οξείδια είναι (Τσακαλάκης, 2010):

$$LSF = \frac{1,0(\%CaO) - 0,7(\%SO_3)}{2,8(\%SiO_2) + 1,2(\%Al_2O_3) + 0,65(\%Fe_2O_3)} \quad (3.1)$$

$$SR/SM = \frac{\%SiO_2}{\%Al_2O_3 + \%Fe_2O_3} \quad (3.2)$$

$$AR/AM = \frac{\%Al_2O_3}{\%Fe_2O_3} \quad (3.3)$$

$$Leq = \frac{CaO \%}{(SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3)(\%)} \quad (3.4)$$

$$NaEq = Na_2O + 0,658K_2O \quad (3.5)$$

Η σχέση που συνδέει όλους τους δείκτες ποιότητας του κλίνκερ μεταξύ τους είναι:

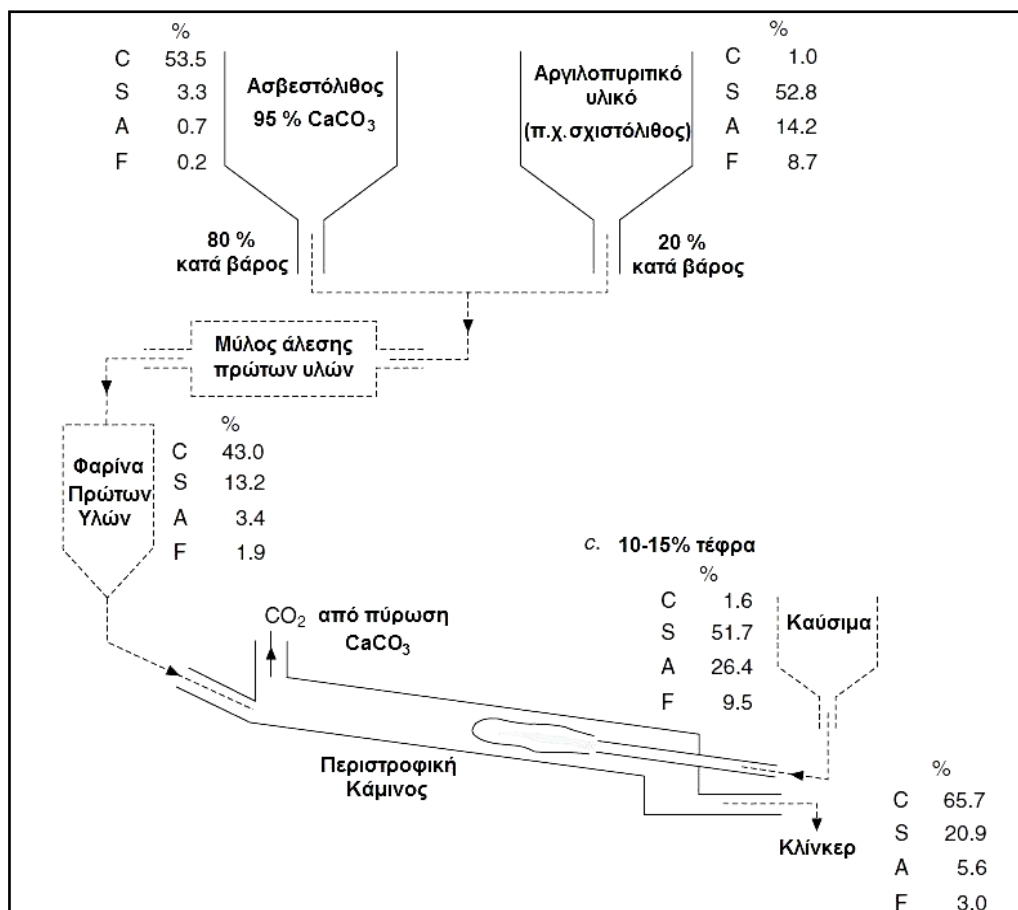
$$LSF = \frac{100 \text{Leq} (AR + 1)(SR + 1)}{2,8SR (AR + 1) + 1.18AR + 0,65} \quad (3.6)$$

Ο δείκτης LSF είναι ο σημαντικότερος δείκτης για τον χαρακτηρισμό της ποιότητας του τσιμέντου και οι τιμές του μπορούν να κυμαίνονται μεταξύ 0,66 – 1,02 (Πίνακας 3.1). Το ανώτερο όριο του LSF (1,02) εξασφαλίζει ότι, κατά τη μετατροπή των πρώτων υλών σε κλίνκερ δεν παραμένει ελεύθερο οξείδιο του ασβεστίου (CaO_{free}), που έχει ως αποτέλεσμα την παρουσία του και τη συμμετοχή του κατά τη διεργασία ενυδάτωσης του τσιμέντου (Πίνακας 3.2). Αντίθετα όταν η τιμή είναι μικρότερη του κατώτερου ορίου τότε έχουμε σοβαρά προβλήματα κατά την πυροσυσσωμάτωση και έχει ως αποτέλεσμα χαμηλό ποσοστό C_3S στο παραγόμενο κλίνκερ.

Ο πυριτικός δείκτης SM δίνει τη σχετική τιμή του συνόλου των πυριτικών φάσεων ($\text{C}_3\text{S} + \text{C}_2\text{S}$)% προς τις φάσεις C_3A και C_4AF που υπάρχουν στο κλίνκερ. Όταν η τιμή του SM αυξάνεται, έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των περιεχόμενων πυριτικών φάσεων εις βάρος των C_3A και C_4AF που καθορίζουν την ποσότητα της υγρής φάσης κατά την τήξη των πρώτων υλών (Πίνακας 3.2). Ενώ ο λόγος AR ελέγχει τη σύνθεση του κλίνκερ όσον αφορά τις αναλογίες μεταξύ των C_3A και C_4AF . Η συνολική % περιεκτικότητα του κλίνκερ του τσιμέντου στις πυριτικές φάσεις C_3S και C_2S κυμαίνεται μεταξύ 70 – 82%, ενώ εκτός των παραπάνω φάσεων υπάρχουν και τα παρακάτω:

- 0 – 17% C_3A
- 1 – 17% C_4AF
- 0,5 – 6% MgO
- 0,5 – 3% Na_2SO_4 , K_2SO_4 και ενώσεις που περιέχουν αυτές
- 0,2 – 4% ελεύθερη άσβεστο (CaO_{free})

Τα σύμβολα για τη σύσταση του κλίνκερ σε συντομογραφία είναι: (S= SiO_2 , A= Al_2O_3 , F= Fe_2O_3 και C= CaO)



Σχήμα 3.1: Αναλογίες των βασικών πρώτων υλών για την παραγωγή του κοινού τσιμέντου τύπου Portland (Τσακαλάκης, 2010)

Ο υπολογισμός των δεικτών εξαρτάται άμεσα από τις πρώτες ύλες. Οι δείκτες LSF και SM επηρεάζονται σημαντικά και από την τέφρα του καυσίμου. Η μορφή της φαρίνας που προκύπτει από την διεργασία της πυροσυσσωμάτωσης φαίνεται στο Σχήμα (3.2).



Σχήμα 3.2: Σφαιρίδια (pellets) μεγέθους 15-25 mm του κλίνκερ τσιμέντου (προϊόν της διεργασίας πυροσυσσωμάτωσης στην περιστροφική κάμινος)

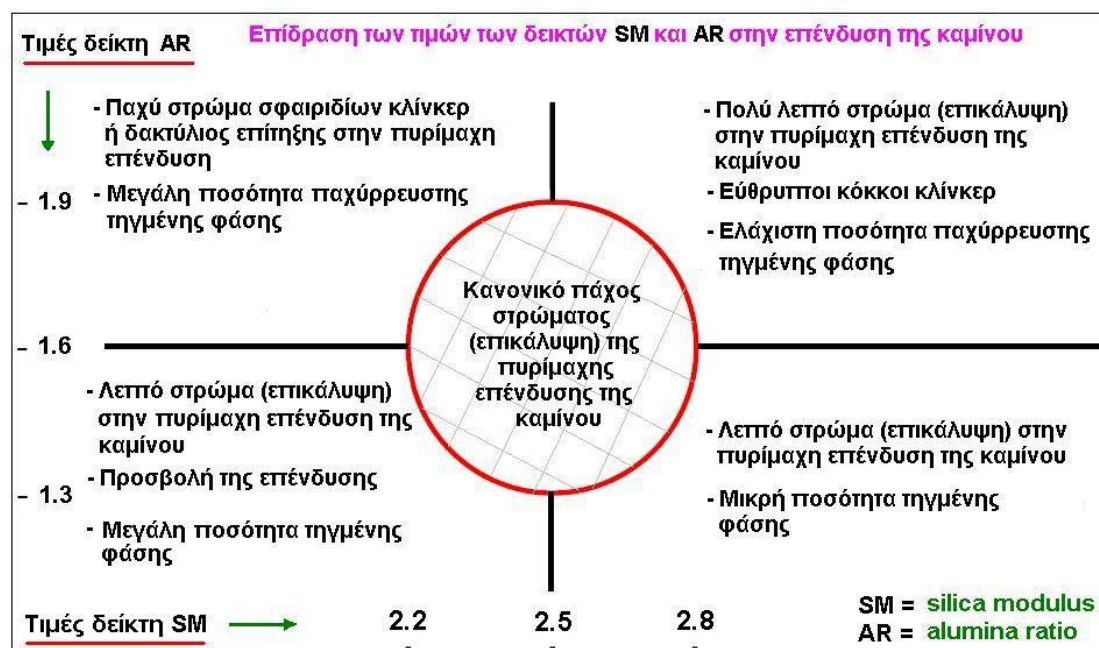
Πίνακας 3.1: Όρια διακύμανσης και συνήθεις τιμές των ποιοτικών δεικτών LSF, SM, AR που συναντώνται κατά την παραγωγή του τσιμέντου (Τσακαλάκης, 2010)

Δείκτης Όρια διακύμανσης
LSF Όρια διακύμανσης 0,66 – 1,02 Συνήθεις τιμές 0,92 – 0,98
SM / SR Όρια διακύμανσης 1,9 – 3,2 Επιθυμητές 2.2 - 2.8
AR / AM Όρια διακύμανσης 1,0-2,5 Επιθυμητή τιμή ≈1,4

Πίνακας 3.2: Οι επιπτώσεις των ποιοτικών δεικτών της παραγωγής του τσιμέντου όταν οι τιμές τους ξεπερνούν τα όρια (Τσακαλάκης, 2010)

Δείκτης	Επιπτώσεις όταν οι τιμές είναι μεγαλύτερες από τις συνήθεις
LSF	1. Δυσκολεύει την εψισιμότητα της φαρίνας 2. Οδηγεί στην παραγωγή κακής ποιότητας τσιμέντου (με μεγάλη περιεκτικότητα σε ελεύθερη άσβεστο CaO_{free}) 3. Αυξάνει την ποσότητα του παραγόμενου C_3S εις βάρος του C_2S 4. Έχει ως αποτέλεσμα την αργή πήξη, άλλα με μεγάλη ανάπτυξη αρχικής αντοχής 5. Αν η τιμή του είναι μικρότερη από 0,66 τότε δημιουργούνται σοβαρά προβλήματα κατά την πυροσυσσωμάτωση (έψηση) και έχει ως αποτέλεσμα χαμηλό ποσοστό C_3S στο παραγόμενο κλίνκερ και το σκυρόδεμα δεν μπορεί να αποκτήσει την πρώιμη αντοχή του
SM / SR	1. Δυσκολεύει την εψισιμότητα της φαρίνας και αυξάνει την κατανάλωση καυσίμων 2. Οδηγεί στην παραγωγή κακής ποιότητας τσιμέντου λόγω μεγάλης περιεκτικότητας σε ελεύθερη άσβεστο CaO_{free} 3. Δυσκολεύει το σχηματισμό δαχτυλιοειδούς επένδυσης εσωτερικά (θωράκισης) της καμίνου με αποτέλεσμα την απώλεια θερμότητας λόγω ακτινοβολιών 4. Μειώνει την διάρκεια ζωής των πυρίμαχων τούβλων της καμίνου 5. Έχει ως αποτελέσματα την αργή πήξη και τη σκλήρυνση του τσιμέντου 6. Αυξημένες τιμές του SR έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση των πυριτικών φάσεων σε βάρος των C_3A και C_4AF
AM / AR	1. Δυσκολεύει την εψισιμότητα της φαρίνας και αυξάνει την κατανάλωση καυσίμων 2. Αυξάνει τα ποσοστά των C_3S και των C_2S 3. Αυξάνει τα ποσοστά των C_3A και μειώνει το ποσοστό του C_4AF 4. Αυξάνει το ιξώδες της υγρής φάσης υπό σταθερή θερμοκρασία 5. Προσδίδει ιδιότητες ταχείας αρχικής πήξης και ανάπτυξης αρχικής αντοχής στο τσιμέντο 6. Μειώνει την ποσότητα της υγρής φάσης και της δυναμικότητας της καμίνου

Οι τιμές των δεικτών μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά ή θετικά την πυρίμαχη επένδυση της καμίνου, όπου εισέρχονται οι πρώτες ύλες για τον στάδιο της κλινκεροποίησης και κατά συνέπεια να επηρεάσουν το στάδιο της εψησιμότητας (Σχήμα 3.3).



Σχήμα 3.3: Βέλτιστα όρια μεταβολής των τιμών των ποιοτικών δεικτών ποιότητας της φαρίνας για εξασφάλιση κατάλληλων συνθηκών έψησης του κλινκερ (Τσακαλάκης, 2010)

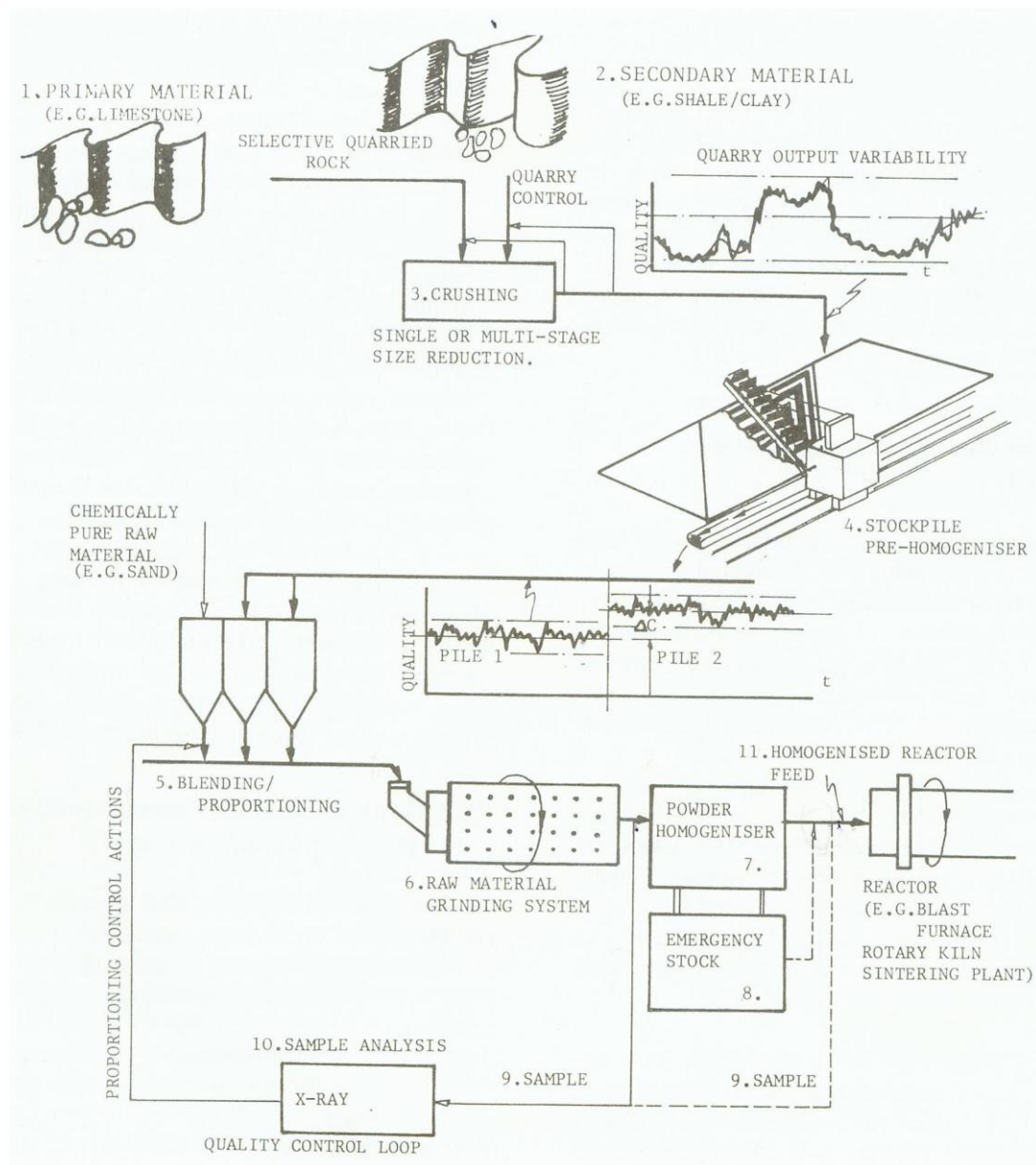
Πιο αναλυτικά όταν η τιμή του δείκτη κορεσμού ασβέστου (LSF) είναι υψηλή αυτό έχει ως αποτέλεσμα τη δύσκολη εψησιμότητα της φαρίνας. Αν ο αργλικός δείκτης έχει υψηλή τιμή τότε η χαμηλή περιεκτικότητα της υγρής φάσης έχει ως αποτέλεσμα την αυξημένη κατανάλωση ενέργειας στην άλεση και κατ' επέκταση η εψησιμότητα παρουσιάζει δυσκολίες. Ενώ όταν η τιμή του αργλικού δείκτη βρίσκεται στην περιοχή του 1,4, η φαρίνα ψήνεται πιο εύκολα από επειδή σε χαμηλές θερμοκρασίες η ποσότητα της υγρής φάσης είναι μεγαλύτερη λόγω της παρουσίας του Fe_2O_3 . Επιπρόσθετα η παρουσία του MgO στη φαρίνα μπορεί να μεταβάλλει ελαφρά την τιμή του AR όταν είναι 1,4.

3.2 Η χρήση των on – line αναλυτών στην τσιμεντοβιομηχανία

Οι on-line αναλυτές είναι μας παρέχουν δίνουν πληροφορίες για τη χημική σύσταση των υλικών μιας παραγωγικής διαδικασίας σε πραγματικό χρόνο. Ο πρώτος εμπορικός on-line αναλυτής για την παραγωγή του τσιμέντου κατασκευάστηκε από την εταιρεία Thermo Electron Corporation. Σήμερα υπάρχει πληθώρα τέτοιων αναλυτών και η τσιμεντοβιομηχανία αποτελεί ένα από τους βιομηχανικούς κλάδους που τους αξιοποιεί σε μεγάλο βαθμό. Η χρήση τους συμβάλλει στην αύξηση της απόδοσης της παραγωγικής διαδικασίας στην παραγωγή προϊόντων υψηλής ποιότητας, στην μειωμένη κατανάλωση ενέργειας, στην πρόληψη αστοχιών στον περιστροφικό κλίβανο και στην αύξηση της ζωής του λατομείου (εξασφαλίζεται ορθολογική εξόρυξη και διαχείριση των πρώτων υλών).

Οι αναλυτές έχουν την δυνατότητα να τοποθετηθούν κατευθείαν στην ήδη υπάρχουσα μεταφορική ταινία και να πραγματοποιούν στοιχειακή χημική ανάλυση των πρώτων υλών ανά λεπτό. Μπορούν να τοποθετηθούν είτε στη ταινία που μεταφέρει τα υλικά από το λατομείο στο χώρο ομογενοποίησης/ανάμιξης για να ελέγξουν και να βελτιστοποιήσουν τις διαδικασίες εξόρυξης-απόθεσης-απόληψης, είτε στη μεταφορική ταινία της φαρίνας για

τον έλεγχο της τροφοδοσίας του περιστροφικού κλιβάνου του κλίνκερ. Μπορούν να τοποθετηθούν εύκολα και σε κυκλική και σε γραμμική διάταξη ομογενοποίησης. Ο έλεγχος που πραγματοποιείται μέσω των αναλυτών έχει ως αποτέλεσμα να τροφοδοτείται ο κλίβανος συνεχώς μ' ένα ομοιογενές μίγμα (Σχήμα 3.4) που τηρούνται οι προδιαγραφές ποιότητας ενώ ταυτόχρονα μειώνεται το κόστος προθήκης καθαρών ουσιών στο μίγμα που εκτινάσσουν το κόστος παραγωγής, αφού το κόστος τους ξεπερνά 50-60 φορές το κόστος των πρώτων υλών.



Σχήμα 3.4: Διάταξη ελέγχου της χημικής σύστασης της τροφοδοσίας των πρώτων υλών (QUALITY CONTROL LOOP) στον περιστροφικό κλίβανο κατά την παραγωγή του κλίνκερ του τσιμέντου (Schofield, 1980)

Οι υπάρχοντες εμπορικοί on-line αναλυτές είναι σε θέση να μετρήσουν τα κύρια στοιχεία των οποίων τις συγκεντρώσεις εκφράζουν συνήθως σε μορφή των αντίστοιχων οξειδίων τους ως: SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O , SO_3 , TiO_2 , Mn_2O_3 . Επιπρόσθετα αρκετοί on-line αναλυτές μπορούν να μετρήσουν το Cl καθώς και την υγρασία. Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα αυτά μπορούν να υπολογιστούν στη συνέχεια οι συνήθεις δείκτες ποιότητας

όπως οι LSF, SM, AR, NaEq αλλά και μεγέθη όπως η απώλεια πύρωσης, η συνολική ποσότητα αλκαλίων και το ποσοστό υγρασίας.

Διατάξεις on-line ανάλυσης με τον αναλυτή τοποθετημένο σε μεταφορική ταινία παρουσιάζονται στο Σχήμα (3.5), ενώ η τυπική μορφή των πληροφοριών που δίνει ο αναλυτής φαίνεται στο Σχήμα (3.6).



Σχήμα 3.5: On-line αναλυτές τοποθετημένοι σε μεταφορικές ταινίες (thermo.com)



Σχήμα 3.6: Τυπική εικόνα παρουσίασης των μετρήσεων του on-line αναλυτή (thermo.com)

Μερικά από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των on-line αναλυτών είναι:

- ✓ Παράταση της ζωής των πυρότουβλων της επένδυσης του κλιβάνου
- ✓ Βελτίωση ενεργειακής απόδοσης του κλιβάνου
- ✓ Μείωση της χρήσης πρόσθετων χημικών
- ✓ Μείωση των εκπομπών CO₂
- ✓ Παράταση ζωής του λατομείου λόγω καλύτερης διαχείρισης των παραγόμενων υλικών

- ✓ Μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο
- ✓ Πλήρης αυτοματοποίηση του συστήματος
- ✓ Ασφαλής παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο, χωρίς να απαιτείται επαφή με επικίνδυνα υλικά
- ✓ Δεν απαιτείται προετοιμασία για τη συλλογή δεδομένων
- ✓ Μείωση του κόστους των ελαττωματικών προϊόντων και διατήρηση σταθερής ποιότητας εντός των προδιαγραφών

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Στατιστική ανάλυση των στοιχείων και κατασκευή διαγραμμάτων ελέγχου ποιότητας

4.1 Εισαγωγή στην ανάλυση των στοιχείων

Στο κεφάλαιο αυτό γίνεται η περιγραφή των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν (χρόνος και μέθοδος συλλογής), ο έλεγχος της ορθότητας τους, ο υπολογισμός των βασικών στατιστικών μεγεθών τους, η συσχέτιση των παραμέτρων ποιότητας που μελετήθηκαν και ο έλεγχος για ύπαρξη αυτοσυσχέτισης. Επίσης εκτιμήθηκε η φυσική μεταβλητότητα τους και έγινε η κατασκευή των μεμονωμένων διαγραμμάτων στατιστικού ελέγχου ποιότητας.

4.2 Περιγραφή και έλεγχος των δεδομένων

Τα δεδομένα παραχωρήθηκαν από μια τσιμεντοβιομηχανία που η παρουσία της είναι σημαντική τόσο στην Ελλάδα όσο και διεθνώς για περισσότερο από 100 χρόνια με ετήσιο δυναμικό παραγωγής τους έξι εκατομμύρια τόνους στην Ελλάδα. Ο στόχος της εταιρίας είναι η συνεχή εφαρμογή καινοτόμων μεθόδων σε όλο το εύρος των επιχειρηματικών δραστηριοτήτων με στόχο τη μείωση του κόστους και την βελτίωση της ανταγωνιστικότητας με σεβασμό προς τον άνθρωπο, την κοινωνία και το περιβάλλον. Το κόστος για κάθε αστοχία στην παραγωγική διαδικασία είναι πολύ σημαντικό για κάθε εταιρία, γι' αυτό κρίνεται απαραίτητη η συνεχής βελτίωση των διεργασιών προκειμένου να προλαμβάνονται τυχόν αποκλίσεις ή να εντοπίζονται εγκαίρως και να διορθώνονται. Στην παραγωγή του τσιμέντου η χημική σύσταση των πρώτων υλών που διακινούνται μετράται με on-line αναλυτές προκειμένου να ελέγχεται η ποιότητα του υλικού που τροφοδοτούνται από τους σωρούς και αν χρειαστεί να προστίθενται υλικά με γνωστή πιστοποιημένη σύσταση (όπως: βωξίτης, σιδηρομετάλλευμα, χαλαζίτης, καθαρός ασβεστόλιθος κ.α) για να διορθώνεται η σύσταση του μίγματος τροφοδοσίας σύμφωνα με τις απαιτήσεις των προδιαγραφών. Οι αναλυτές τοποθετούνται συνήθως μετά το στάδιο της ομογενοποίησης των υλικών και πριν το στάδιο εισόδου περιστροφική κάμινο έψησης. Οι πληροφορίες που μας δίνουν είναι η χημική ανάλυση του μίγματος, εκφρασμένη σε οξειδία και οι ποσότητες των διακινούμενων υλικών. Οι τιμές των δεικτών LSF, SM, AR και Na_{eq} υπολογίζονται από τις περιεκτικότητες των οξειδίων με βάση του τύπου που έχουν αναφερθεί παραπάνω.

Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία δόθηκαν σε μορφή λογιστικού φύλλου Excel και περιλαμβάνουν την ημερομηνία και ώρα της μέτρησης, τις ποσότητες των διακινούμενων υλικών (t/h), τις περιεκτικότητες των βασικών χημικών στοιχείων των πρώτων υλών σε μορφή οξειδίων και τις τιμές των δεικτών που υπολογίστηκαν. Τα οξείδια που μετρώνται από τον on-line αναλυτή στην παραγωγική διαδικασία του τσιμέντου είναι: το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2), το οξείδιο του αργιλίου (Al_2O_3), το οξείδιο του ασβεστίου (CaO), το οξείδιο του μαγνησίου (MgO), το τριοξείδιο του θείου (SO_3), το οξείδιο του καλίου (K_2O), το οξείδιο του νατρίου (Na_2O), το οξείδιο του σιδήρου (Fe_2O_3). Η απώλεια πύρωσης (LOI) συνήθως υπολογίζεται ως διαφορά του συνόλου των οξειδίων από το 100. Οι υπολογιζόμενοι δείκτες είναι το ισοδύναμο του νατρίου (Na_{eq}), ο δείκτης κορεσμού σε άσβεστο (LSF), ο αργιλικός δείκτης (AR) και ο πυριτικός δείκτης (SM). Το πλήθος των μετρήσεων είναι 2.340, ξεκινούν στις 15/3/2005 και ολοκληρώνονται στις 19/3/2005 και απέχουν μεταξύ τους ένα λεπτό και η μέση διακινούμενη ποσότητα των πρώτων υλών ανά ώρα είναι 675t. Με βάση την ταχύτητα κίνησης της μεταφορικής ταινίας που είναι 1,7m/s

υπολογίζεται επίσης το φορτίο της ανά τρέχον μέτρο. Ένα τυπικό απόσπασμα από τα δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν παρουσιάζεται στον Πίνακα (4.1).

Πίνακας 4.1: Διακινούμενες ποσότητες και ενδεικτική χημική σύσταση του ομογενοποιημένου μίγματος πριν το στάδιο της έψησης κατά την παραγωγή του τσιμέντου

Ημερομηνία	Διακινούμενη ποσότητα t/min	Φορτίο ταινίας Kg/m	Ώρα	SiO ₂ %	Al ₂ O ₃ %	Fe ₂ O ₃ %	CaO%	MgO%	SO ₃ %	Na ₂ O %	K ₂ O %	LOI %
3/15/ 2005	4.47	43.85	10:49	2.73	0.68	0.36	51.96	0.51	0.74	0.15	0.40	37.87
3/15/ 2005	3.70	36.40	10:50	4.50	0.47	0.21	53.33	0.61	0.23	0.16	0.85	39.99
3/15/ 2005	5.34	52.41	10:51	6.01	0.93	0.18	52.21	1.99	0.60	0.17	0.20	40.21
3/15/ 2005	3.51	34.51	10:52	5.04	0.79	0.25	50.74	0.51	0.77	0.15	0.40	39.24
3/15/ 2005	8.30	61.60	10:53	13.01	3.31	0.91	50.47	1.02	0.99	0.16	0.26	38.85
3/15/ 2005	9.32	60.45	10:54	8.08	3.10	1.15	48.90	0.70	0.41	0.99	0.12	38.58
3/15/ 2005	9.44	40.98	10:54	9.04	3.36	1.31	49.90	1.16	0.60	0.77	0.13	39.10

Το πρώτο βήμα για την περαιτέρω επεξεργασία των δεδομένων ήταν ο έλεγχος της ορθότητας τους και ο εντοπισμός ακραίων μη αναμενόμενων τιμών. Έτσι διορθώθηκαν αρνητικές τιμές που εμφανίστηκαν για τις περιεκτικότητες οξειδίων που απαντώνται σε πολύ μικρές συγκεντρώσεις. Το σφάλμα αυτό οφείλεται στην καμπύλη βαθμονόμησης του on-line αναλυτή και εμφανίζεται όταν η συγκέντρωση του συγκεκριμένου χημικού στοιχείου είναι κατώτερη του ορίου ανίχνευσης. Ο εντοπισμός των ακραίων μη αναμενόμενων τιμών έγινε με χρήση των διαγραμμάτων Box-Whiskers.

Μετά τον έλεγχο της ορθότητας των δεδομένων έγινε νέος υπολογισμός των δεικτών LSF, SR, AR και NaEq και δημιουργήθηκε το νέο αρχείο δεδομένων που χρησιμοποιήθηκε για την περαιτέρω ανάλυση.

4.3 Υπολογισμός βασικών στατιστικών παραμέτρων για οξείδια και δείκτες

Ο υπολογισμός των βασικών στατιστικών παραμέτρων τόσο για χημικά συστατικά όσο και για τους δείκτες περιλαμβάνει τα μέτρα θέσης και διασποράς, την κατασκευή του ιστογράμματος συχνотήτων, τα θηκογράμματα Box-Whisker, τον υπολογισμό του συντελεστή μεταβλητότητας και του συντελεστή συσχέτισης. Για το σχεδιασμό όλων των διαγραμμάτων που θα χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε το λογισμικό Statgraphics (Statpoint) Centurion v15.1.0.2.

Στον Πίνακα (4.2) δίνονται η μέγιστη, ελάχιστη, μέση τιμή, τυπική απόκλιση και ο συντελεστής μεταβλητότητας για χημικά συστατικά όσο και για τους δείκτες. Οι τιμές αυτές υπολογίστηκαν με βάση τις αναλύσεις του υλικού τροφοδοσίας από τον on-line αναλυτή που περιλαμβάνονται στις μετρήσεις No740 έως και No1240. Οι μεγαλύτερες τιμές περιεκτικότητας συναντώνται στο οξείδιο του ασβεστίου (CaO) ενώ αντίστοιχα τις θέσεις με τις μικρότερες περιεκτικότητες καταλαμβάνουν το οξείδιο του νατρίου (Na₂O) και το τριοξείδιο του θείου. Οι τιμές των βασικών οξειδίων πλησιάζουν τις τιμές της ενδεικτικής

χημικής σύστασης των πρώτων υλών (SiO_2 – 14,35%, Al_2O_3 – 4,04%, Fe_2O_3 – 0,92% και CaO – 43,55%) που απαιτούν οι προδιαγραφές.

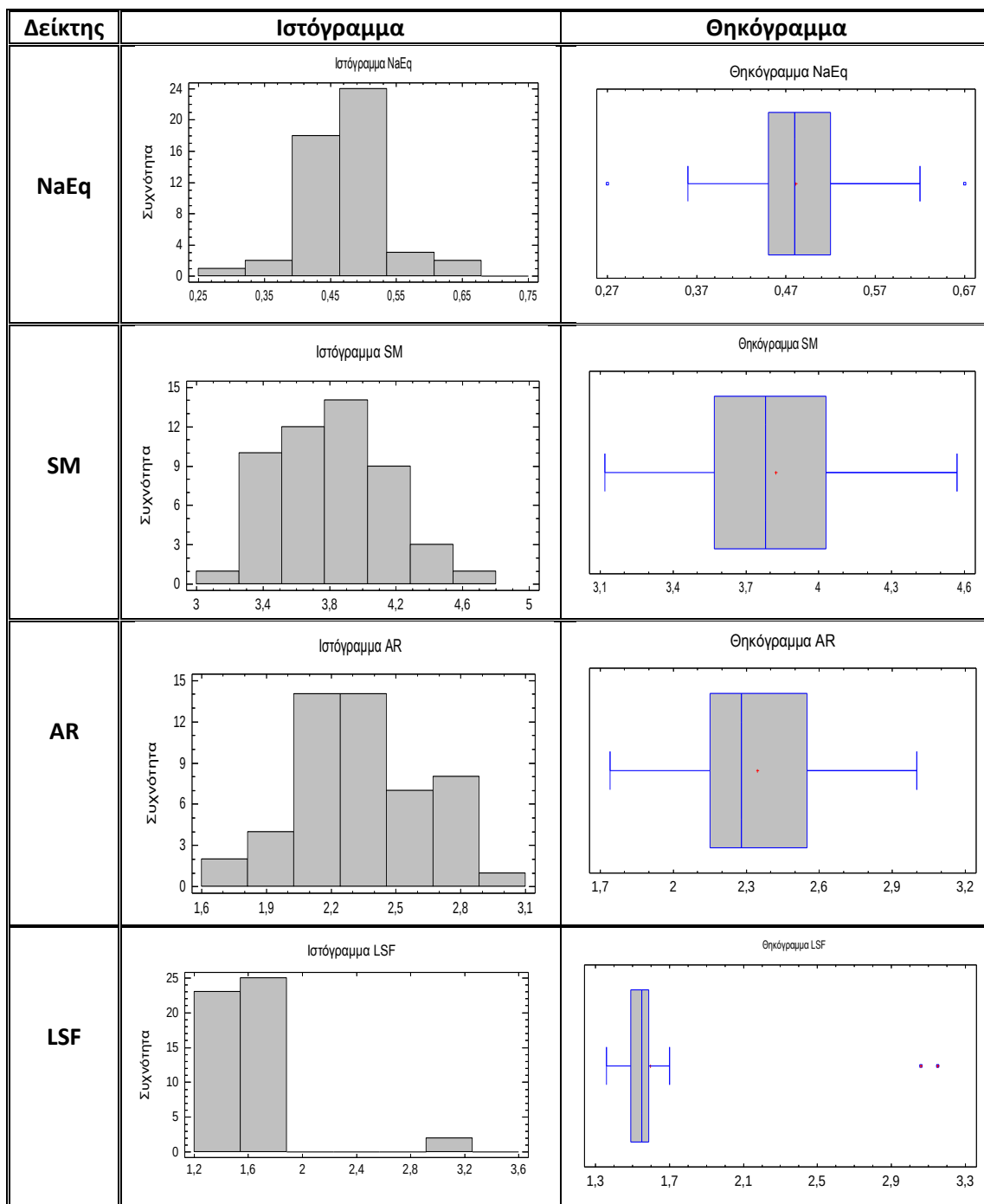
Ο συντελεστής μεταβλητότητας μας δείχνει την ομοιογένεια του δείγματος και εκφράζεται πάντα %, ενώ παραμένει ανεξάρτητος από τις μονάδες μέτρησης και είναι μέτρο σχετικής διασποράς των τιμών μιας μεταβλητής. Αν η τιμή του είναι μικρότερη του 10% τότε το δείγμα χαρακτηρίζεται ομοιογενές. Στις μετρήσεις που μελετώνται, ομοιογένεια εμφανίζουν οι μετρήσεις για το οξείδιο του ασβεστίου (CaO), το οξείδιο του σιδήρου (Fe_2O_3), ο πυριτικός δείκτης (SM) και η απώλεια πύρωσης LOI. Η μικρότερη ομοιογένεια εμφανίζεται στο MgO και ακολουθούν το Al_2O_3 , το SO_3 και το K_2O . Όσο αφορά του δείκτες, το ισοδύναμο του νατρίου (NaEq), ο αργλικός δείκτης (AR) και ο δείκτης κορεσμού σε άσβεστο (LSF) εμφανίζουν υψηλότερη μεταβλητότητα (12,37% έως 20,08%) σε σχέση με τον πυριτικό δείκτη που είναι στο 8,35%.

Πίνακας 4.2: Περιεκτικότητα (%) και συντελεστής μεταβλητότητας των οξειδίων και δεικτών

Οξείδιο	Μέγιστη Τιμή	Ελάχιστη Τιμή	Μέση τιμή	Τυπική απόκλιση	Συντελεστής μεταβλητότητας %
SiO_2	13,33	6,17	9,89	1,24	12,56
Al_2O_3	3,37	0,34	1,92	0,54	28,41
Fe_2O_3	1,48	0,19	0,85	0,14	16,34
CaO	50,79	42,75	47,06	1,30	2,78
MgO	4,55	0,39	1,79	1,00	55,89
SO_3	1,27	0,11	0,71	0,18	26,23
Na_2O	0,3	0,08	0,15	0,02	17,37
K_2O	0,98	0,16	0,51	0,19	37,46
LOI	40,7	36,84	38,72	0,72	1,87
NaEq	0,67	0,27	0,40	0,05	13,12
SM	4,57	3,12	3,80	0,31	8,35
AR	3,00	1,74	2,36	0,29	12,37
LSF	3,15	1,36	1,59	0,31	20,08

Στο Σχήμα 4.1 δίνονται τα ιστογράμματα συχνοτήτων και τα θηκογράμματα Box-Whisker των δεικτών. Τα ιστογράμματα αναπαριστούν την κατανομή των τιμών μιας μεταβλητής ενώ τα θηκογράμματα Box-Whisker βοηθούν στον εντοπισμό των τυχόν ακραίων σημείων. Στα ιστογράμματα οι τιμές ομαδοποιούνται σε 10 διαστήματα τιμών και διατάσσονται στον οριζόντιο άξονα κατά αύξουσα σειρά. Πληροφορίες για την κατανομή των τιμών παρέχονται και από τα θηκογράμματα αλλά με διαφορετικό τρόπο. Το διάγραμμα Box-Whisker αποτελείται από ένα ορθογώνιο με μήκος ίσο με I, ενώ από τις πλευρές ξεκινούν ευθύγραμμα τμήματα που προεκτείνονται μέχρι την ελάχιστη και την μέγιστη τιμή. Τα ευθύγραμμα τμήματα αυτά μπορεί να διακόπτονται από μικρότερα κάθετα αν η ελάχιστη ή η μέγιστη τιμή απέχουν από τα σημεία Q_1 , Q_3 αντίστοιχα αποστάσεις μεγαλύτερες του 1,5I. Οι τιμές αυτές εκτός της απόστασης αυτής χαρακτηρίζονται σαν ύποπτες ακραίες τιμές και απεικονίζονται και αυτές με ειδικά σύμβολα. Το σημείο Q_1 αποτελεί το πρώτο τεταρτημόριο και χωρίζει τα δεδομένα έτσι ώστε αριστερά του να βρίσκονται το 25% των σημείων, το επόμενο σημείο είναι το Q_2 που ταυτίζεται με τη διάμεσο και μέχρι εκεί βρίσκεται το 50% των σημείων και ακολουθεί το Q_3 που χωρίζει το 75% των μετρήσεων από τα αριστερά και το υπόλοιπο των τιμών (25%) από τα δεξιά (της διαμέσου). Το I είναι το ενδοτεταρτημοριακό εύρος και ισούται με $I=Q_3-Q_1$.

Τα ιστογράμματα συχνοτήτων των δεικτών NaEq και LSF (με βάση τις αναλύσεις ανά λεπτό) παρουσιάζουν ασυμμετρία. Αντίθετα τα ιστογράμματα συχνοτήτων των δεικτών AR και SM δείχνουν συμμετρικά. Με βάση τα θηκογράμματα μικρός αριθμός ακραίων σημείων εμφανίζεται σε όλους τους δείκτες πλην του NaEq. Ο έλεγχος των ακραίων αυτών τιμών έδειξε ότι δεν πρόκειται για εσφαλμένες μετρήσεις.



Σχήμα 4.1: Ιστογράμματα και θηκογράμματα των δεικτών με βάση τις μετρήσεις ανά 10 λεπτά που πραγματοποιήθηκαν με τον on-line αναλυτή (500 μετρήσεις, No740 έως No1240)

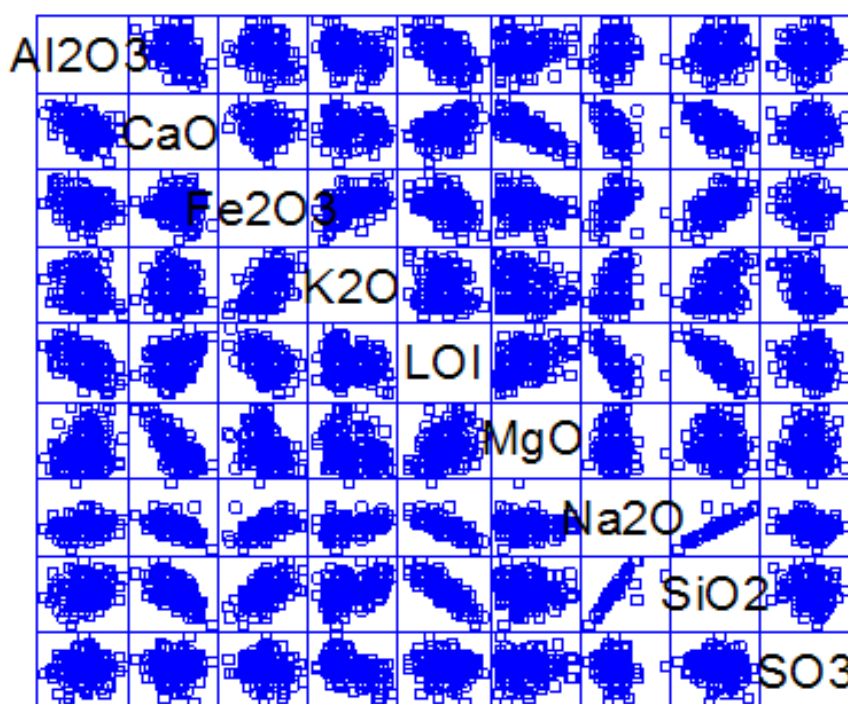
Στην συνέχεια εξετάστηκε αν οι μεταβλητές παρουσιάζουν συσχέτιση μεταξύ τους και υπολογίστηκαν οι συντελεστές συσχέτισης Pearson (r) και Spearman (R). Όταν η τιμή του r είναι ± 1 τότε υπάρχει τέλεια γραμμική συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών, αν $-0,3 \leq r \leq 0,3$ τότε δεν υπάρχει συσχέτιση, αν $-0,5 \leq r \leq -0,3$ ή $0,3 \leq r \leq 0,5$ τότε υπάρχει ασθενής συσχέτιση,

αν $-0,7 \leq r \leq -0,5$ ή $0,5 \leq r \leq 0,7$ τότε υπάρχει μέτρια συσχέτιση, αν $-0,8 \leq r \leq -0,7$ ή $0,7 \leq r \leq 0,8$ υπάρχει ισχυρή συσχέτιση και αν $-1 \leq r \leq -0,8$ ή $0,8 \leq r \leq 1$ τότε υπάρχει πολύ ισχυρή συσχέτιση. Αντίστοιχα ισχύουν και για τον συντελεστή Spearman (R) (ταξινομικός συντελεστής συσχέτισης). Οι τιμές των r και R είναι παραπλήσιες σε περιπτώσεις όπου οι συσχετίσεις χαρακτηρίζονται από γραμμικότητα. Όταν ο συντελεστής Spearman (R) λαμβάνει μεγαλύτερες τιμές του συντελεστή Pearson (r), τότε η συσχέτιση είναι μη γραμμική.

Στον Πίνακα (4.3) δίνονται οι τιμές του συντελεστή συσχέτισης Pearson για τα κύρια οξείδια που μετρήθηκαν και στο Σχήμα (4.2) τα σχετικά διαγράμματα. Πολύ ισχυρή συσχέτιση εμφανίζεται μόνο μεταξύ $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2$. Σχετικά ισχυρή συσχέτιση εμφανίζεται μεταξύ των $\text{MgO}-\text{CaO}$, μέτρια συσχέτιση εμφανίζεται μεταξύ των $\text{SiO}_2-\text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{SO}_3-\text{K}_2\text{O}$. Οι συνδυασμοί των οξειδίων που υπολείπονται δεν έχουν εμφανή συσχέτιση.

Πίνακας 4.3: Συντελεστές συσχέτισης Pearson των κύριων

	Al_2O_3	CaO	Fe_2O_3	K_2O	MgO	Na_2O	SiO_2	SO_3
Al_2O_3								
CaO	-0,37							
Fe_2O_3	-0,28	-0,07						
K_2O	-0,25	-0,14	0,49					
MgO	0,10	-0,73	-0,43	-0,20				
Na_2O	0,11	-0,48	0,42	0,36	-0,09			
SiO_2	0,15	-0,48	0,54	0,44	-0,10	0,90		
SO_3	0,11	0,05	-0,18	-0,50	0,02	-0,16	-0,15	



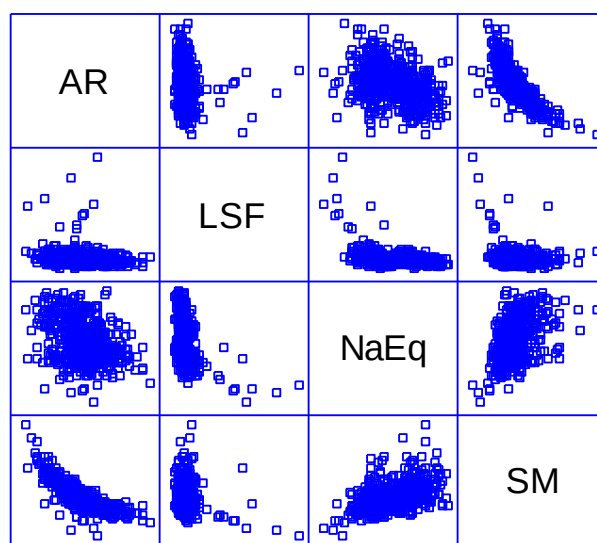
Σχήμα 4.2: Διαγράμματα γραμμικής συσχέτισης μεταξύ των κυρίων οξειδίων που μετρήθηκαν

Ο Πίνακας (4.4) παρουσιάζει τους συντελεστές γραμμικής συσχέτισης Pearson για τους δείκτες και το Σχήμα (4.3) τα σχετικά διαγράμματα.. Ασθενής γραμμική συσχέτιση υπάρχει

μεταξύ των NaEq-AR και NaEq-LSF, μη εμφανής είναι η συσχέτιση των AR-LSF και SM-LSF, μέση γραμμική συσχέτιση εμφανίζεται στο NaEq-SM και ισχυρή συσχέτιση στο SM-AR.

Πίνακας 4.4: Συντελεστές συσχέτισης Pearson των δεικτών

	AR	LSF	NaEq	SM
AR				
LSF	-0,16			
NaEq	-0,35	-0,39		
SM	-0,81	-0,19	0,48	



Σχήμα 4.3: Διάγραμμα συσχέτισης των δεικτών

Επειδή οι δείκτες εμφανίζουν με βάση τα διαγράμματα του Σχήματος (4.3) απόκλιση από την γραμμική συσχέτιση θα υπολογιστούν και οι δείκτες συσχέτισης Spearman (Πίνακας 4.5) που μετατρέπουν τα δεδομένα σε σειρές με βάση το μέγεθος τους (δηλ. οι αρχικές τιμές μπαίνουν σε σειρά με βάση το μέγεθος τους: πρώτος, δεύτερος, τρίτος κλπ.) Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι αποστάσεις μεταξύ των παρατηρήσεων να χάνουν τη σημασία τους και να αξιολογείται η σειρά των συμμετεχόντων στην πρώτη μεταβλητή σε σχέση με τη σειρά που αυτοί έχουν στη δεύτερη μεταβλητή, κ.ό.κ. (Εμβλωτή, 2006). Παρατηρείται ότι οι τιμές του συντελεστή Spearman είναι παραπλήσιες με τις τιμές του συντελεστή Pearson γεγονός που δείχνει ότι η παρατηρούμενη στο Σχήμα (4.3) απόκλιση από την γραμμικότητα είναι μικρή. Πιο συγκεκριμένα ο συντελεστής συσχέτισης Spearman εμφανίζει μεγαλύτερη τιμή από τον συντελεστή Pearson για τις συσχετίσεις SM-AR και LSF-AR. Αντίθετα μικρότερη τιμή δίνουν οι συσχετίσεις SM-LSF, NaEq-AR, ενώ οι συσχετίσεις NaEq-SM και NaEq-LSF έχουν την ίδια τιμή και στους δυο συντελεστές. Με βάση τις τιμές των Pearson και Spearman ισχυρή συσχέτιση εμφανίζει μόνο το ζεύγος SM-AR.

Πίνακας 4.5: Συντελεστές συσχέτισης *Spearman* των δεικτών

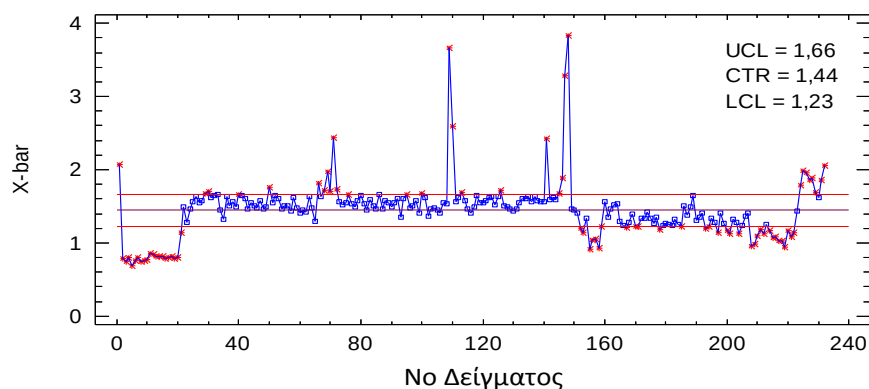
	AR	LSF	NaEq	SM
AR				
LSF	-0,21			
NaEq	-0,34	-0,39		
SM	-0,83	-0,15	0,48	

Ο έλεγχος των μετρήσεων της χημικής σύστασης και των τιμών των δεικτών σχετικά με την κατανομή που ακολουθούν έγινε με τη χρήση του κριτηρίου *Smirnov-Kolmogorov*. Το κριτήριο αυτό δεν προϋποθέτει ομαδοποίηση των τιμών και χρησιμοποιείται για τον έλεγχο καλής προσαρμογής ενός τυχαίου δείγματος σε μια δεδομένη συνεχή κατανομή βασιζόμενο στην εμπειρική συνάρτηση κατανομής του δείγματος. Διαπιστώθηκε ότι η μέση τιμή των δεκάλεπτων μετρήσεων, τόσο για οξείδια όσο και οι δείκτες, ακολουθεί την κανονική κατανομή. Η επιβεβαίωση της κανονικής κατανομής για το δεκάλεπτο δείγμα είναι σημαντική αφού αποτελεί προϋπόθεση για την ορθή εφαρμογή των διαγραμμάτων ελέγχου τόσο της μέσης τιμής – διασποράς όσο αλλά και των διαγραμμάτων *Hotelling*.

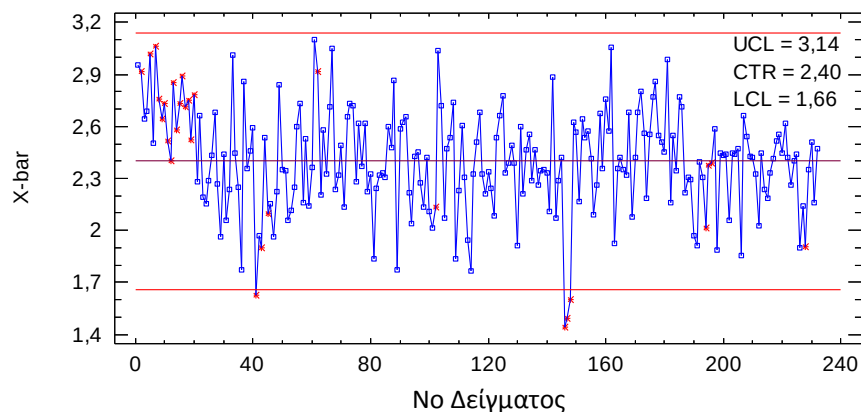
4.3 Υπολογισμός της φυσικής διακύμανσης της διαδικασίας

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε ήταν η μελέτη ενός μέρους του δείγματος που βρίσκεται υπό στατιστικό έλεγχο για τον υπολογισμό της τυπικής απόκλισης και στην συνέχεια η χρήση της τυπικής απόκλισης που υπολογίστηκε στο σύνολο των μετρήσεων που αναλύθηκαν.

Προκειμένου να εντοπισθεί το δείγμα εκείνο που βρίσκεται υπό στατιστικό έλεγχο αρχικά έγινε σχεδίαση διαγραμμάτων μέσης τιμής – τυπικής απόκλισης ($\bar{X}$ -S)(*η μέση τιμή δεν είναι εφικτό μέσω του λογισμικού να εμφανίζεται σαν $\bar{x}$ αλλά σαν $\bar{x}$ -bar στα διαγράμματα) για όλο το δείγμα. Σ' αυτά τα διαγράμματα παρατηρήθηκε ότι οι τιμές του πρώτου χρονικού διαστήματος (μετρήσεις No1-No300) καθώς και οι μετρήσεις μετά το No1600 δείγμα ήταν εκτός ορίων στατιστικού ελέγχου. Το γεγονός αυτό συνδέεται με την αλλαγή παρτίδας (σωρός ομογενοποίησης) πρώτων υλών (Σχήματα 4.4, 4.5). Κατά συνέπεια αφαιρέθηκαν αυτές οι τιμές που οδηγούσαν την παραγωγική διαδικασία εκτός ορίων στατιστικού ελέγχου και εξετάστηκε η συμπεριφορά 200 μετρήσεων, οι οποίες βρίσκονται στο διάστημα μετρήσεων από No740 – No940. Στο διάστημα αυτό θεωρήθηκε ότι η διαδικασία είναι υπό στατιστικό έλεγχο.



Σχήμα 4.4: Διάγραμμα μέσης τιμής του δεκάλεπτου δείγματος ($\bar{x}$ -bar) του δείκτη *LSF* για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν



Σχήμα 4.5: Διάγραμμα μέσης τιμής του δεκάλεπτου δείγματος ($\bar{x}$) του δείκτη AR για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν

Ο Πίνακας (4.6) παρουσιάζει τις τιμές των βασικών στατιστικών παραμέτρων των ποιοτικών δεικτών του τσιμέντου και ο Πίνακας (4.3) τις τιμές των ορίων που προκύπτουν από τα γραφήματα του στατιστικού ελέγχου X-S που σχεδιάστηκαν με ομαδοποίηση των τιμών ανά 10 λεπτά. Το χρονικό διάστημα που ενδείκνυται για τη μελέτη αυτής της παραγωγικής διαδικασίας είναι τα 10 λεπτά, έτσι ώστε η ποσότητα των υλικών που εισέρχονται στον κλίβανο για έψηση να μην αλλοιώνουν την ποιότητα (Bond et al, 2000).

Πίνακας 4.6: Βασικά στατιστικά μεγέθη των δεικτών για το ομαδοποιημένο δείγμα δεκαλέπτου που εξετάστηκε (No740-No940)

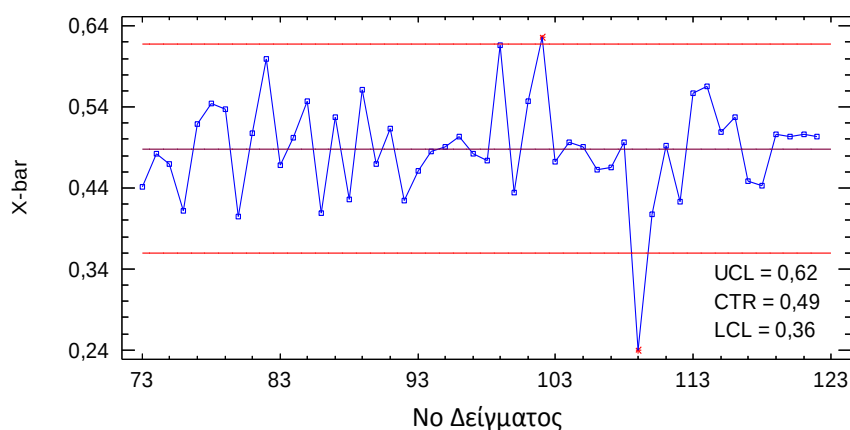
Δείκτης	Μέγιστη τιμή	Ελάχιστη τιμή	Μέση τιμή	Συντελεστής μεταβλητότητας %
NaEq	0,83	0,25	0,48	28,26
SM	3,76	0,90	3,76	24,14
AR	4,61	0,42	2,43	31,17
LSF	2,59	1,1	1,54	14,88

Πίνακας 4.7: Τιμές στατιστικών ορίων των διαγραμμάτων μέσης τιμής ($\bar{x}$ - bar) – τυπικής απόκλισης (S) για τους ποιοτικούς δείκτες του δεκάλεπτου δείγματος των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No940)

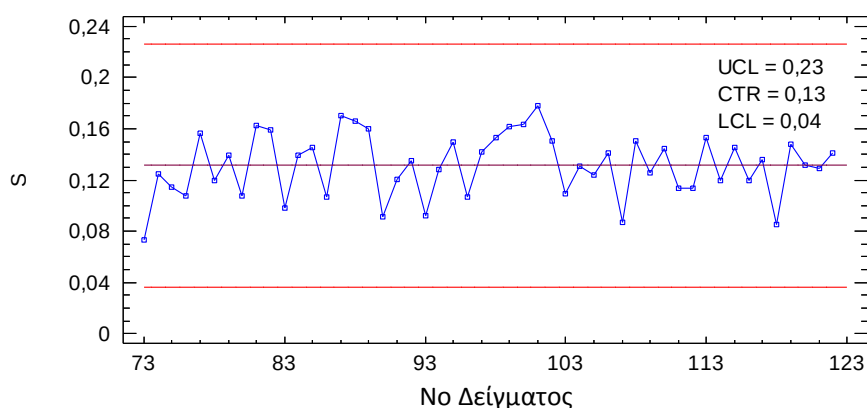
Δείκτης	Διάγραμμα	Ομαδοποίηση τιμών	Άνω Όριο Ελέγχου (UCL)	Κάτω Όριο Ελέγχου (LCL)	Κεντρική γραμμή (CL)
NaEq	X	Ανά 10 λεπτά	0,61	0,36	0,48
	S	Ανά 10 λεπτά	0,22	0,03	0,13
SM	X	Ανά 10 λεπτά	4,55	2,97	3,76
	S	Ανά 10 λεπτά	1,38	0,22	0,80
AR	X	Ανά 10 λεπτά	3,12	1,74	2,43
	S	Ανά 10 λεπτά	1,2	0,19	0,70
LSF	X	Ανά 10 λεπτά	1,76	1,32	1,54
	S	Ανά 10 λεπτά	0,38	0,06	0,22

Οι τιμές των ορίων των διαγραμμάτων μέσης τιμής είναι απαραίτητες για να διαπιστωθεί αν το πεδίο τιμών των δεικτών βρίσκεται εντός των επιθυμητών τιμών. Τα όρια του δείκτη κορεσμού σε άσβεστο, του πυριτικού δείκτη και του αργλικού δείκτη έχουν μεγαλύτερες τιμές από το άνω επιτρεπτό όριο, ενώ οι τιμές των ορίων του ισοδύναμου του νατρίου είναι χαμηλότερες από τα επιτρεπτά όρια.

Το διάγραμμα (Σχήμα 4.7) που αναφέρεται στη μεταβολή της τυπικής απόκλισης του δείκτη του ισοδύναμου του νατρίου παρατηρούμε ότι δεν εντοπίζονται σημεία εκτός των ορίων ελέγχου.

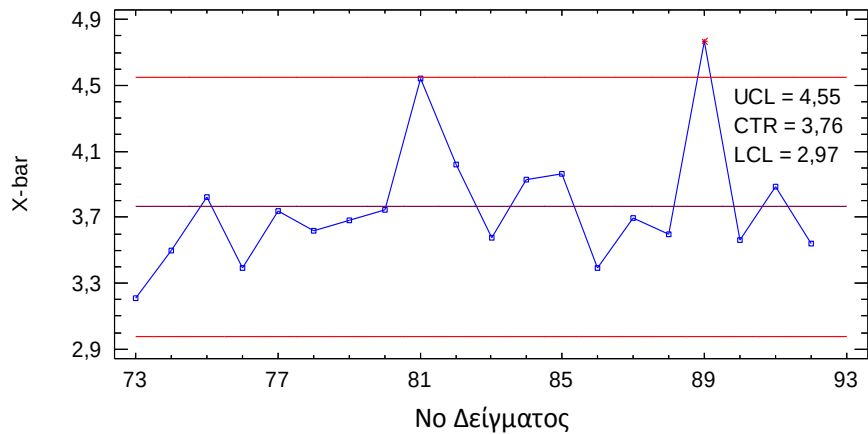


Σχήμα 4.6: Διάγραμμα μέσης τιμής του δεκάλεπτου δείγματος ($\bar{x}$) του ισοδύναμου του νατρίου (NaEq) για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No940)

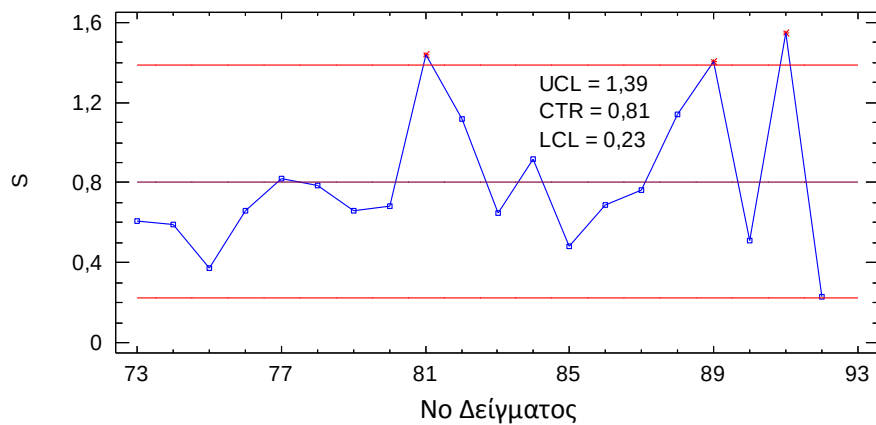


Σχήμα 4.7: Διάγραμμα της τυπικής απόκλισης (S) του δεκάλεπτου δείγματος του ισοδύναμου του νατρίου (NaEq) για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No940)

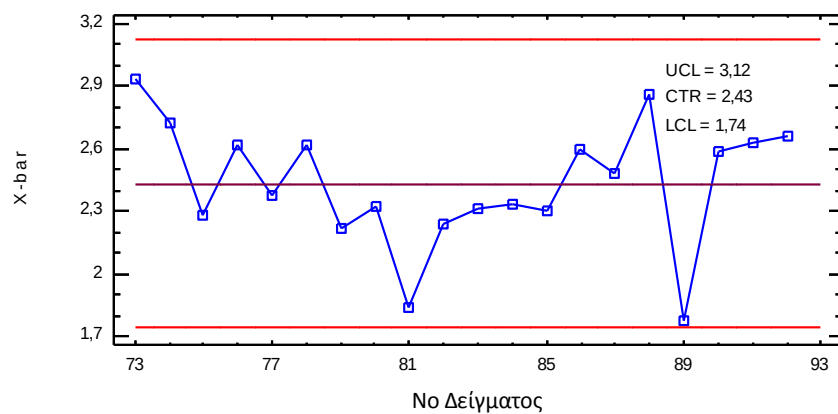
Παρατηρώντας το διάγραμμα (Σχήμα 4.9) της τυπικής απόκλισης (S) του δεκάλεπτου δείγματος του πυριτικού δείκτη εντοπίζονται τρία σημεία που κινούνται εκτός ορίων (μετρήσεις με μεγάλη απόκλιση σε σχέση με αυτή της αυτήν της διαδικασίας).



Σχήμα 4.8: Διάγραμμα μέσης τιμής του δεκάλεπτου δείγματος ($\bar{x}$ -bar) του πυριτικού δείκτη (SM) για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No940)

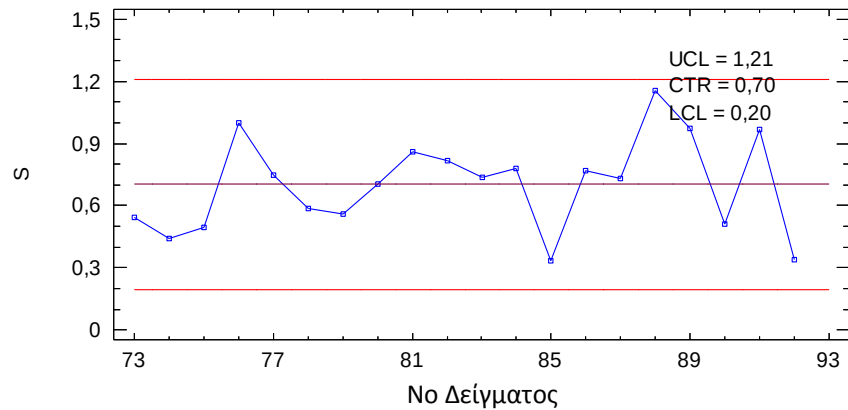


Σχήμα 4.9: Διάγραμμα της τυπικής απόκλισης (S) του δεκάλεπτου δείγματος του πυριτικού δείκτη (SM) για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No940)

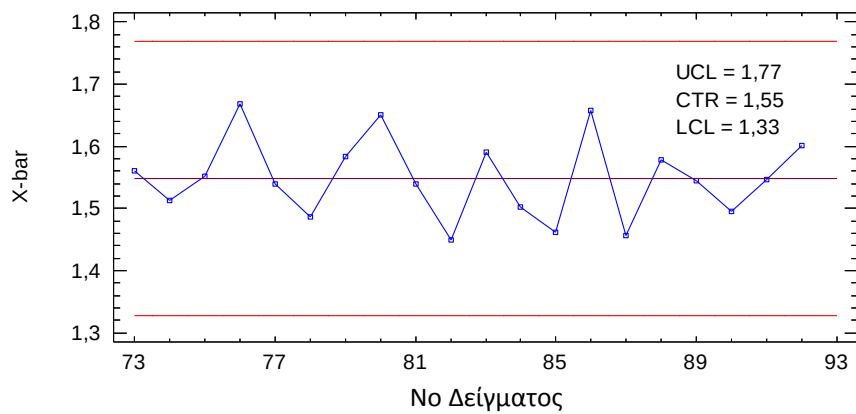


Σχήμα 4.10: Διάγραμμα μέσης τιμής του δεκάλεπτου δείγματος ($\bar{x}$ -bar) του αργιλικού δείκτη (AR) για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (740-940)

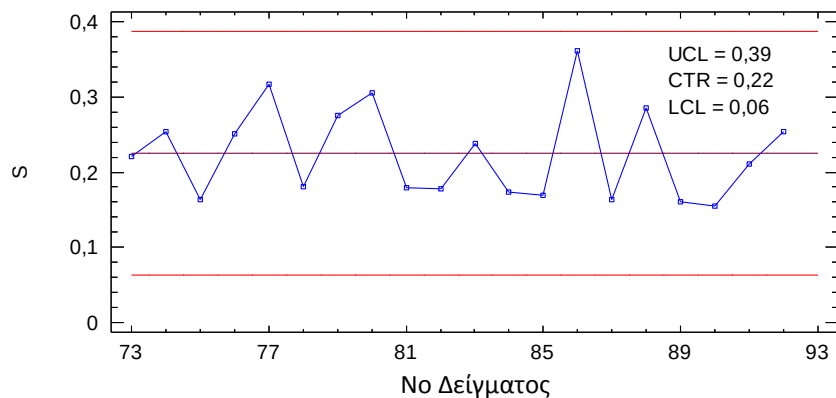
Στην περίπτωση του αργιλικού δείκτη (Σχήμα 4.11), οι τιμές της τυπικής απόκλισης δεν ακολουθούν κάποιο συγκεκριμένο μοτίβο και δεν παρουσιάζονται σημεία εκτός ορίων.



Σχήμα 4.11: Διάγραμμα της τυπικής απόκλισης (S) του δεκάλεπτου δείγματος του αργιλικού δείκτη (AR) για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No940)



Σχήμα 4.12: Διάγραμμα μέσης τιμής του δεκάλεπτου δείγματος ($\bar{x}$ -bar) του δείκτη κορεσμού σε άσβεστο (LSF) για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No940)



Σχήμα 4.13: Διάγραμμα της τυπικής απόκλισης (S) του δεκάλεπτου δείγματος του δείκτη κορεσμού σε άσβεστο (LSF) για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No940)

Οι τιμές των αποκλίσεων που υπολογίστηκαν (Πίνακας 4.8) για κάθε δείκτη θα χρησιμοποιηθούν για το σχεδιασμό των διαγραμμάτων ελέγχου.

Πίνακας 4.8: Υπολογισμός της τυπικής απόκλισης (S) για το δείγμα των μετρήσεων (No740-No940)

Δείκτης	Τιμή τυπικής απόκλισης (S) για το δείγμα των μετρήσεων (No740-No940)
NaEq	0,13
AR	0,72
SM	0,82
LSF	0,23

4.4 Διαγράμματα ελέγχου μέσης τιμής - διασποράς (X-S)

Στο στάδιο αυτό της επεξεργασίας μελετάται η διακύμανση των δεικτών ποιότητας του υλικού τροφοδοσίας με την χρήση των μεμονωμένων διαγραμμάτων ελέγχου μέσης τιμής – διασποράς με σκοπό να εντοπιστούν οι περιπτώσεις όπου η τιμή των δεικτών βρίσκεται εκτός των ορίων του στατιστικού ελέγχου. Επιλέχθηκαν τα διαγράμματα μέσης τιμής – διασποράς (X-S) γιατί το δείγμα είναι αρκετά μεγάλο και σ’ αυτή την περίπτωση τα διαγράμματα (X-S) υπερτερούν σε αποτελεσματικότητα των διαγραμμάτων μέσης τιμής – εύρους (X-R). Για κάθε μια από τις μεταβλητές σχεδιάστηκαν τα διαγράμματα μέσης τιμής – τυπικής απόκλισης για το ομαδοποιημένο δείγμα που αποτελείται από 10 διαδοχικές μετρήσεις. Τέτοιου χρονικού μεγέθους δείγματα θεωρούνται ως τα ενδεικνυόμενα για την διαδικασία παραγωγής τσιμέντου που εξετάστηκε. Στον Πίνακα (4.9) δίνονται τα όρια στατιστικού ελέγχου που υπολογίστηκαν, η κεντρική γραμμή και ο αριθμός των δεκάλεπτων δειγμάτων που εντοπίστηκαν εκτός στατιστικού ελέγχου.

Πίνακας 4.9: Τιμές στατιστικών ορίων ελέγχου των διαγραμμάτων X-S για τους δείκτες του δεκάλεπτου δείγματος (No740-No1240)

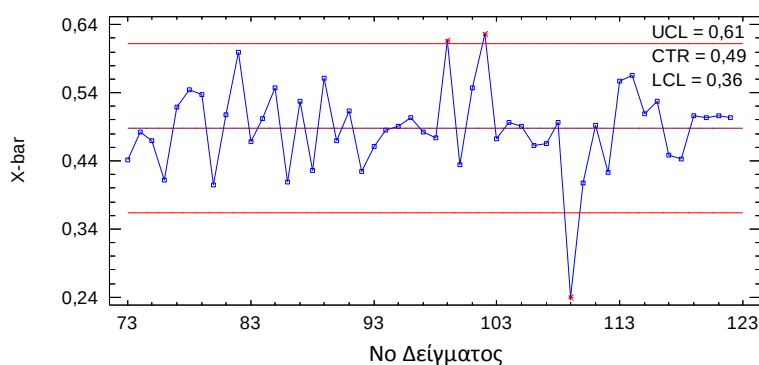
Δείκτης	Διάγραμμα	Άνω όριο UCL	Κάτω όριο LCL	Κεντρική γραμμή CL	Αριθμός δειγμάτων εκτός ορίων
NaEq	X	0,61	0,36	0,48	2
	S	0,22	0,03	0,13	0
SM	X	4,59	3,03	3,81	2
	S	1,41	0,22	0,82	4
AR	X	3,04	1,67	2,35	0
	S	1,23	0,20	0,72	0
LSF	X	1,82	1,38	1,60	3
	S	0,39	0,06	0,23	2

Ο Πίνακας (4.10) παρουσιάζει τις τιμές της τυπικής απόκλισης όταν η διαδικασία είναι υπό στατιστικό έλεγχο και τις τιμές της τυπικής απόκλισης σ’ ένα ευρύτερο σύνολο μετρήσεων που εξετάστηκαν. Παρατηρείται ότι οι τιμές της τυπικής απόκλισης στο ισοδύναμο του νατρίου συμπίπτουν γεγονός που δείχνει ότι η μεταβλητή αυτή συνεχίζει να βρίσκεται υπό έλεγχο και στο διευρυμένο σύνολο (No740-No1240) μετρήσεων που αναλύθηκε. Στους υπόλοιπους τρεις ποιοτικούς δείκτες η τιμή του S παρουσιάζει μια μικρή αύξηση.

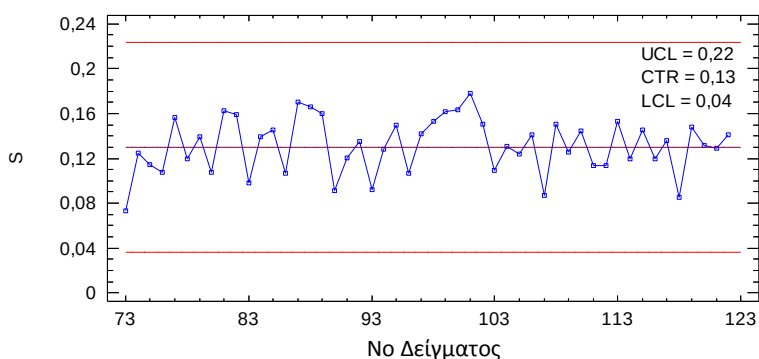
Πίνακας 4.10: Συγκριτικός πίνακας της τιμής της τυπικής απόκλισης (*S*) του δεκάλεπτου δείγματος (No740-No940) που η διαδικασία είναι υπό έλεγχο και του δεκάλεπτου δείγματος (No740-No1240)

Δείκτης	Τιμή της τυπικής απόκλισης όταν η διαδικασία είναι υπό έλεγχο	Εκτιμώμενη τιμή της τυπικής απόκλισης της διαδικασίας
NaEq	0,13	0,13
SM	0,82	0,87
AR	0,72	0,77
LSF	0,23	0,26

Στο ευρύτερο σύνολο των 500 μετρήσεων το διάγραμμα *x-bar* του NaEq εντοπίζονται δυο σημεία εκτός ελέγχου (Πίνακας 4.11) τα οποία οφείλονται στις υψηλές τιμές του K_2O , ενώ οι τιμές του Na_2O έχουν φυσιολογικές τιμές στα σημεία αυτά. Τα σημεία αυτά δεν επηρεάζουν την συμπεριφορά του δείκτη στο διάγραμμα *S* (Σχήμα 4.15) του ισοδύναμου του νατρίου αφού παρουσιάζει την ίδια συμπεριφορά με το γράφημα των 200 μετρήσεων (διαδικασία είναι υπό στατιστικό έλεγχο).



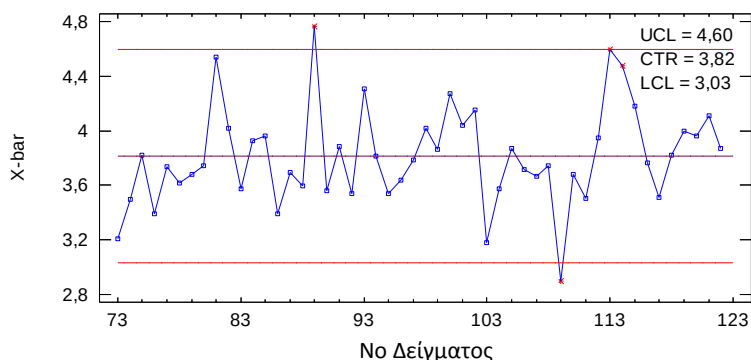
Σχήμα 4.14: Διάγραμμα μεταβολής της μέσης τιμής του δεκάλεπτου δείγματος (*x-bar*) του δείκτη NaEq για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No1240)



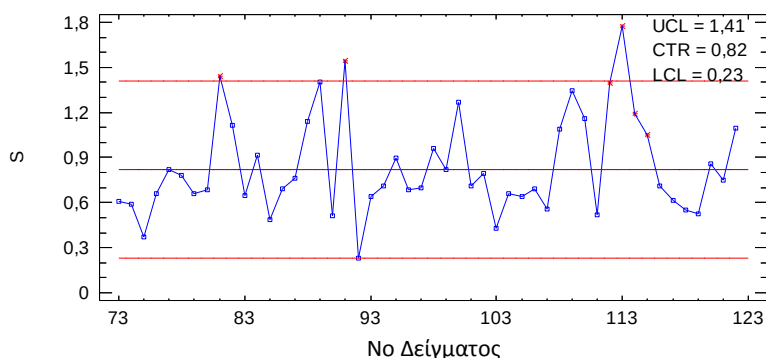
Σχήμα 4.15: Διάγραμμα μεταβολής της τυπικής απόκλισης (*S*) του δεκάλεπτου δείγματος του δείκτη NaEq για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No1240)

Σχετικά με την συμπεριφορά του πυριτικού δείκτη στο διάγραμμα *X* υπάρχουν δυο σημεία εκτός των ορίων, εκ των οποίων το ένα βρίσκεται κάτω από το κάτω όριο και το άλλο πάνω από το άνω όριο (Σχήμα 4.17). Το πρώτο σημείο εκτός ορίων οφείλεται στην υψηλή

συγκέντρωση του SiO_2 ενώ το επόμενο προκύπτει από τις υψηλές τιμές των Al_2O_3 και Fe_2O_3 . Στο διάγραμμα της τυπικής απόκλισης εντοπίζονται τρία σημεία εκτός ελέγχου που βρίσκονται σε γειτονικές περιοχές με τα σημεία που βρίσκονται εκτός ελέγχου στο διάγραμμα $\bar{x}$ -bar. Η συμπεριφορά των διαγραμμάτων μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι στο χρονικό αυτό διάστημα η παραγωγική διαδικασία εμφανίζει προβλήματα λειτουργίας (ειδικά αίτια). Τα αίτια των δυσλειτουργιών αυτών μπορούν να εντοπιστούν με την κατασκευή και ερμηνεία και των υπόλοιπων διαγραμμάτων ελέγχου.

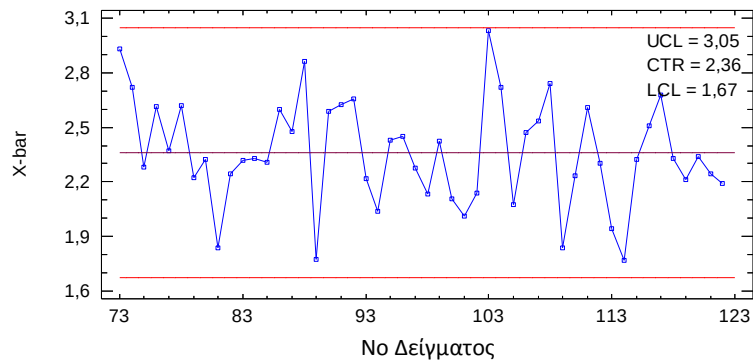


Σχήμα 4.16: Διάγραμμα μεταβολής της μέσης τιμής του δεκάλεπτου δείγματος ($\bar{x}$ -bar) του δείκτη SM για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No1240)

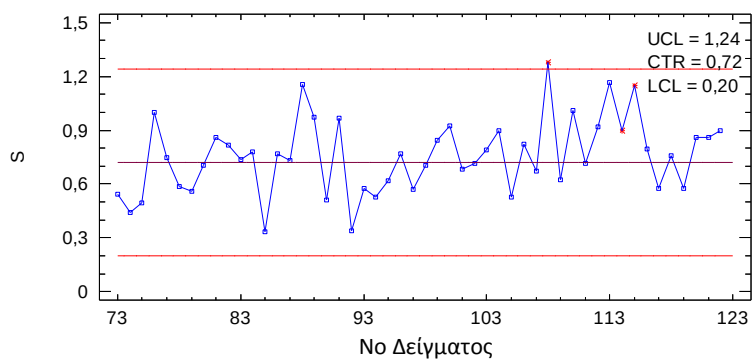


Σχήμα 4.17: Διάγραμμα μεταβολής της τυπικής απόκλισης (S) του δεκάλεπτου δείγματος του δείκτη SM για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No1240)

Το διάγραμμα $\bar{x}$ -bar του αργλικού δείκτη (Σχήμα 4.18) δεν παρουσιάζει κανένα σημείο εκτός ορίων, ωστόσο η γραμμή εξέλιξης της παραγωγικής διαδικασίας εμφανίζει συνεχείς αυξομειώσεις και αρκετά σημεία βρίσκονται μακριά από την μέση τιμή. Επίσης και στο διάγραμμα της τυπικής απόκλισης (S) (Σχήμα 4.19) του αργλικού δείκτη (AR) δεν υπάρχουν σημεία εκτός ορίων, οπότε η διαδικασία είναι υπό στατιστικό έλεγχο αλλά παρουσιάζει μεγάλη μεταβλητότητα.

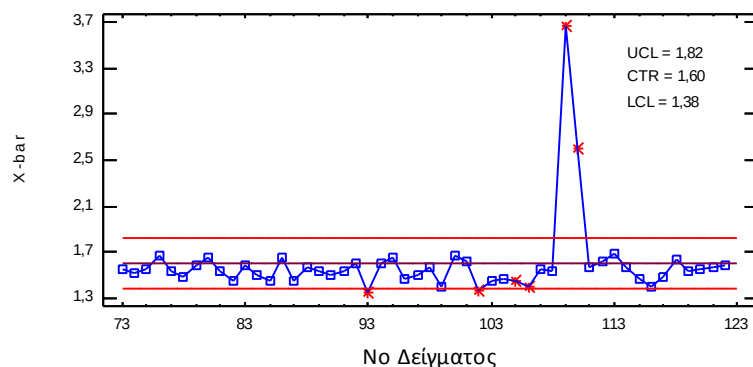


Σχήμα 4.18: Διάγραμμα μεταβολής της μέσης τιμής του δεκάλεπτου δείγματος ($\bar{x}$) του δείκτη AR για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No1240)

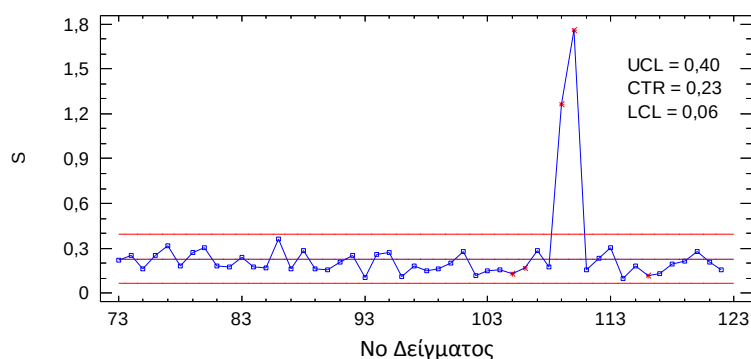


Σχήμα 4.19: Διάγραμμα μεταβολής της τυπικής απόκλισης (S) του δεκάλεπτου δείγματος του δείκτη AR για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No1240)

Το διάγραμμα $\bar{X}$ -bar για τον δείκτη κορεσμού σε άσβεστο παρουσιάζει στο διάγραμμα $\bar{X}$ (Σχήμα 4.20) τα περισσότερα σημεία εκτός ελέγχου, ενώ στο αντίστοιχο διάγραμμα S (Σχήμα 4.21) το μεγαλύτερο μέρος των δειγμάτων βρίσκονται εντός των ορίων της φυσικής διακύμανσης της διαδικασίας. Τα σημεία που βρίσκονται εκτός ορίων οφείλονται στις περιεκτικότητες των οξειδίων (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SO_3 και του CaO). Τα οξείδια SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 χρησιμοποιούνται και για τον υπολογισμό του πυριτικού δείκτη όπου και εκεί παρατηρήθηκαν σημεία εκτός ορίων στην περιοχή όπου εμφανίζονται και στον δείκτη LSF.



Σχήμα 4.20: Διάγραμμα μεταβολής της μέσης τιμής του δεκάλεπτου δείγματος ($\bar{x}$) του δείκτη LSF για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No1240)



Σχήμα 4.21: Διάγραμμα μεταβολής της τυπικής απόκλισης (S) του δεκάλεπτου δείγματος του δείκτη LSF για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No1240)

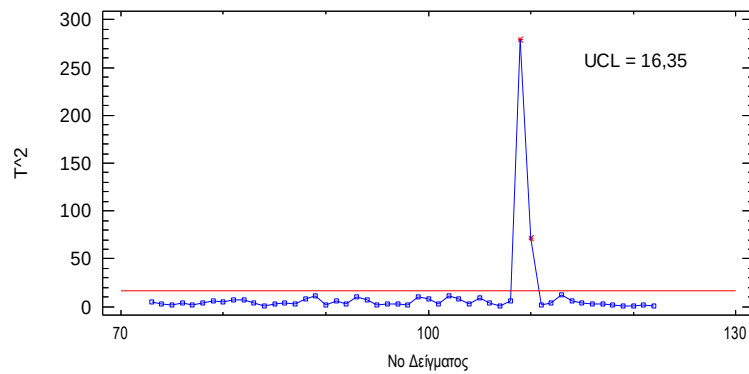
Πίνακας 4.11: Συντεταγμένες των σημείων εκτός ορίων στα διαγράμματα $X-S$ για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No1240)

Δείκτης	Σημεία που βρίσκονται εκτός ορίων στο διάγραμμα X	Σημεία που βρίσκονται εκτός ορίων στο διάγραμμα S
NaEq	(102, 0,620), (109, 0,24)	-
SM	(89, 4,76), (109, 2,89)	(81, 1,43), (91, 1,54), (92, 0,23) (113, 1,77)
AR	-	-
LSF	(109, 3,65), (110, 2,59), (93, 1,35)	(110, 1,76), (109, 1,26)

Οι πληροφορίες που προκύπτουν από τα διαγράμματα μέσης τιμής – τυπικής απόκλισης δίνουν γενική εικόνα για την συμπεριφορά των δεικτών δεν μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν με ασφάλεια για να απαντήσουν στο ερώτημα αν η διαδικασία είναι ή όχι υπό στατιστικό έλεγχο. Για να απαντηθεί το ερώτημα αυτό θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί ένα διάγραμμα πολυμεταβλητού ελέγχου (Hotelling) που να συμπεριλαμβάνει όλους τους δείκτες μαζί.

4.5 Διάγραμμα ελέγχου πολλαπλών μεταβλητών (Hotelling)

Στο διάγραμμα Hotellingπου κατασκευάστηκε (Σχήμα 4.22) παρατηρούμε ότι εκτός στατιστικού ελέγχου βρίσκονται δυο σημεία (No109, $T^2=276,9$ και No110, $T^2=71,9$). Τα σημεία αυτά είναι αναμενόμενα αφού έχουν ήδη εντοπιστεί από τα διαγράμματα μέσης τιμής – διασποράς του δείκτη LSF και SM. Τα άλλα σημεία εκτός ελέγχου που εντοπίστηκαν από τα μεμονωμένα διαγράμματα $\bar{x}$ και S , όπως φαίνονται στον Πίνακα (4.11), δεν χαρακτηρίστηκαν από το διάγραμμα Hotelling ως εκτός ελέγχου.



Σχήμα 4.22: Διάγραμμα πολυμεταβλητού ελέγχου Hotelling του δεκάλεπτου δείγματος όλων των δεικτών για το σύνολο των μετρήσεων που εξετάστηκαν (No740-No1240)

Για να ερμηνευθούν οι καταστάσεις εκτός ελέγχου που εντοπίζει το διάγραμμα Hotelling (Σχήμα 4.22) απαιτείται ο υπολογισμός της συμβολής d_j κάθε παραμέτρου στο μέγεθος T^2 . Ο υπολογισμός γίνεται με εξαίρεση από τον υπολογισμό του T^2 της παραμέτρου j και υπολογισμό του νέου T^2_j . Η συμβολή d_j κάθε παραμέτρου στο μέγεθος T^2 υπολογίζεται από τη σχέση (Montgomery, 1985):

$$d_j = T^2 - T^2_j. \quad (4.1)$$

Ο δείκτης LSF ευθύνεται για τα σημεία που οδηγούν την παραγωγική διαδικασία εκτός ορίων τόσο στο δείγμα 109 όσο και στο δείγμα 110. Η τιμή του T^2 (Πίνακας 4.12) στο πρώτο σημείο είναι πολύ μεγαλύτερη από το δεύτερο σημείο. Και στα δυο σημεία οι τιμές της παραμέτρου d_j του δείκτη LSF είναι αρκετά μεγαλύτερες από τις τιμές των υπολοίπων δεικτών. Έτσι καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η συμβολή του LSF είναι σημαντική ενώ των υπόλοιπων τριών όχι. Και αυτό διότι ο καθένας από αυτούς δεν έχει ισχυρή παρουσία και είναι απαραίτητος ο συνδυασμός τους για να περιγραφεί το T^2 . Ενώ αντίθετα ο LSF αρκεί να μελετηθεί και μεμονωμένα για να εντοπισθεί το πρόβλημα στην παραγωγική διαδικασία.

Πίνακας 4.12: Συμβολή των μετρούμενων παραμέτρων ελέγχου στη διαμόρφωση του T^2

Δείγμα	T^2	Αρχικές Τιμές			
		Συμβολή στη διαμόρφωση του T^2 d_j			
		LSF	AR	SM	NaEq
109	276,9	173	0,60	0,50	0,50
110	71,9	66,01	7,19	6,50	0,60

Τα δυο συνεχόμενα σημεία υποδεικνύουν ότι για είκοσι λεπτά η παραγωγική διαδικασία βρίσκεται εκτός ορίων λόγω του δείκτη LSF. Πράγματι ανατρέχοντας στις τιμές των δεικτών παρατηρείται ότι η τιμή του δείκτη κορεσμού σε άσβεστο είναι αρκετά υψηλή ενώ οι τιμές του αργιλικού και πυριτικού δείκτη χαμηλές. Αντίστοιχα και οι τιμές των βασικών οξειδίων που απαιτούνται για τον υπολογισμό των δεικτών δίνουν αυξημένες συγκέντρωση του CaO και χαμηλές στα SiO₂, Al₂O₃ και Fe₂O₃. Αυτή η απότομη αλλαγή στην παραγωγή και οι πληροφορίες που αντλούνται από το αρχείο των δεδομένων καθώς και το διάγραμμα Hotelling, μας οδηγούν στον συμπέρασμα ότι στο χρονικό αυτό διάστημα το σύστημα

τροφοδοτούνταν μόνο με ασβεστολιθικές πρώτες ύλες και όχι με αργιλοπυριτικές. Αυτό είναι εμφανές και από τη μελέτη της παροχής του υλικού που σε αυτό το χρονικό διάστημα η ποσότητα του υλικού μειώνεται στο μισό σε σχέση με τη μέση τιμή. Κατά συνέπεια μια βλάβη στο σύστημα τροφοδοσίας από τον σωρό των αργιλοπυριτικών πρώτων υλών μπορεί να δικαιολογήσει τα σημεία εκτός ελέγχου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

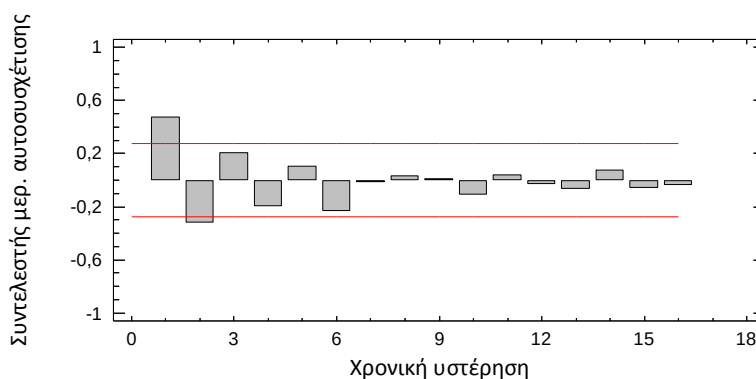
Ανάπτυξη και εφαρμογή τροποποιημένων διαγραμμάτων Hotelling για την αντιμετώπιση της αυτοσυσχέτισης

5.1 Επίδραση της αυτοσυσχέτισης των παραμέτρων ποιότητας στην αποτελεσματικότητα των διαγραμμάτων Hotelling

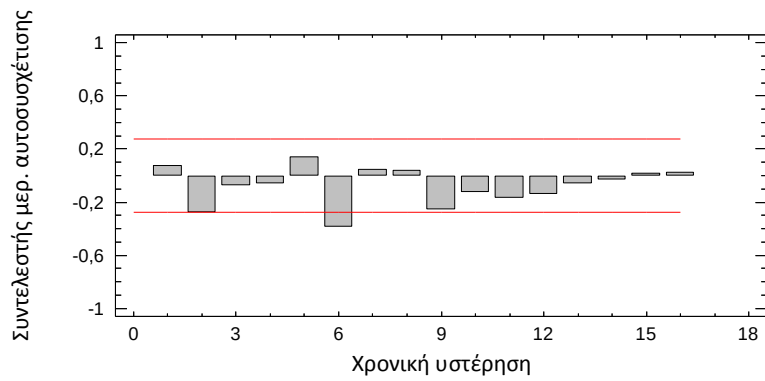
Ο σχεδιασμός ενός διαγράμματος Hotelling προϋποθέτει ότι οι μετρήσεις μεταξύ τους δεν εμφανίζουν χρονική εξάρτηση (αυτοσυσχέτιση). Στο διάγραμμα Hotelling (Σχήμα 4.24) δεν εξετάστηκε η ύπαρξη της μερικής αυτοσυσχέτισης μεταξύ των μετρήσεων σε κάθε δείκτη, κατά συνέπεια το διάγραμμα αυτό δεν μπορεί να εξασφαλίσει την ορθότητα των αποτελεσμάτων. Η επίδραση της μερικής αυτοσυσχέτισης μεταξύ των μετρήσεων απαιτεί τη χρήση ενός αυτοπαλινδρομικού μοντέλου k τάξης για χρονοσειρές.

5.2 Υπολογισμός των συντελεστών χρονικής συσχέτισης των δεικτών LSF, SM, AR και NaEq

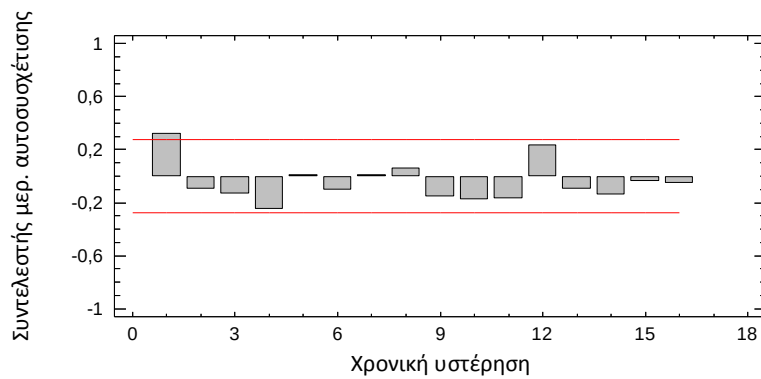
Από τα διαγράμματα μεταβολής του συντελεστή μερικής αυτοσυσχέτισης σε σχέση με τη χρονική υστέρηση για τους δείκτες (Σχήματα 5.1 έως 5.4) διαπιστώθηκε ότι ο συντελεστής μερικής αυτοσυσχέτισης 1^{ης} τάξης του δείκτη LSF (Σχήμα 5.1) είναι σχετικά ισχυρός και στατιστικά σημαντικός και θα πρέπει να ληφθεί υπόψη στην κατασκευή των διαγραμμάτων ελέγχου. Ο συντελεστής μερικής αυτοσυσχέτισης 2^{ης} τάξης του δείκτη LSF είναι μεν ασθενής αλλά στατιστικά σημαντικός και για το λόγο αυτό κρίνεται σκόπιμο να περιληφθεί στο αυτοπαλινδρομικό μοντέλο. Οι δείκτες AR, SM και NaEq (Σχήματα 5.2, 5.3, 5.4) εμφανίζουν είτε χαμηλούς συντελεστές μερικής αυτοσυσχέτισης ή/και μη σημαντικούς στατιστικά. Για τους δείκτες αυτούς κρίθηκε ότι η χρονική συσχέτιση δεν αποτελεί πρόβλημα για την κατασκευή των διαγραμμάτων ελέγχου Hotelling.



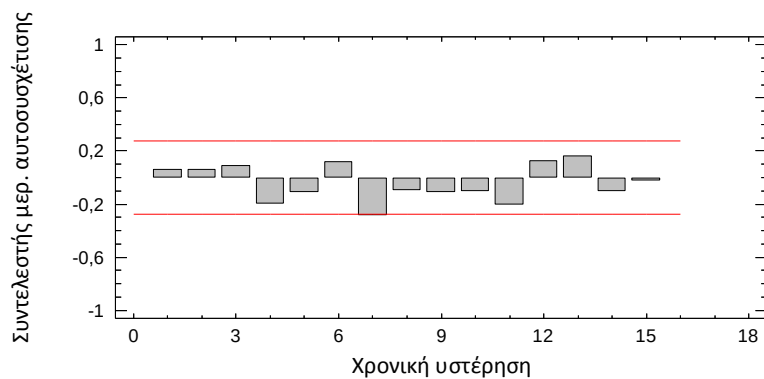
Σχήμα 5.1: Μεταβολή του συντελεστή μερικής αυτοσυσχέτισης του LSF σε σχέση με την χρονική υστέρηση. Οι παράλληλες ευθείες είναι τα στατιστικά όρια και για στάθμη σημαντικότητας $\alpha=0,05$.



Σχήμα 5.2: Μεταβολή του συντελεστή μερικής αυτοσυσχέτισης του AR σε σχέση με την χρονική υστέρηση. Οι παράλληλες ευθείες είναι τα στατιστικά όρια και για στάθμη σημαντικότητας $\alpha=0,05$.



Σχήμα 5.3: Μεταβολή του συντελεστή μερικής αυτοσυσχέτισης του SM σε σχέση με την χρονική υστέρηση. Οι παράλληλες ευθείες είναι τα στατιστικά όρια και για στάθμη σημαντικότητας $\alpha=0,05$.



Σχήμα 5.4: Μεταβολή του συντελεστή μερικής αυτοσυσχέτισης του NaEq σε σχέση με την χρονική υστέρηση. Οι παράλληλες ευθείες είναι τα στατιστικά όρια και για στάθμη σημαντικότητας $\alpha=0,05$.

5.3 Ανάπτυξη αυτοπαλινδρομικών μοντέλων

Για την περιγραφή της χρονικής συσχέτισης του δείκτη κορεσμού σε άσβεστο χρησιμοποιήθηκε ένα απλόαυτοπαλινδρομικό μοντέλου δεύτερης τάξης AR(2), όπως δίνεται από τη Σχέση 5.1:

$$x_t = \varphi_0 + \varphi_1 x_{t-1} + \varphi_2 x_{t-2} + \varepsilon_t \quad (5.1)$$

Το αυτοπαλινδρομικό μοντέλο δεύτερης τάξης που υπολογίστηκε για τον δείκτη LSF είναι (Σχέση 5.2 και Σχήμα 5.5):

$$LSF_t = 1,12 + 0,62LSF_{t-1} + 0,32LSF_{t-2} + \varepsilon_{LSF,t} \quad (5.2)$$

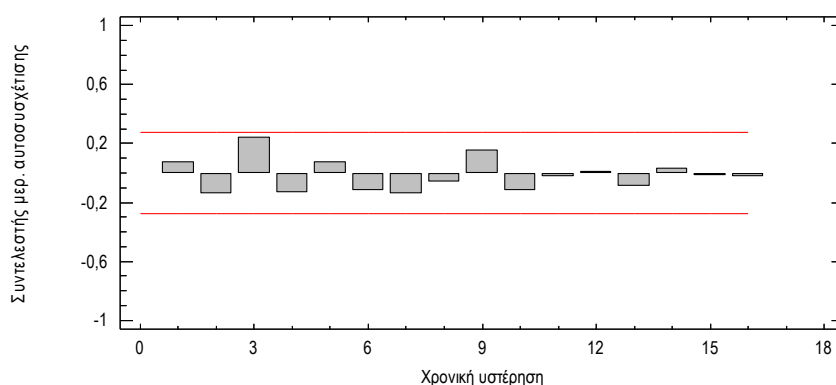
Από τη Σχέση 5.2 θα υπολογίστηκαν τα υπόλοιπα ε_t για τον δείκτη LSF ενώ για τους υπόλοιπους δείκτες τα υπόλοιπα υπολογίστηκαν αφαιρώντας κάθε φορά την τιμή της μεταβλητής από την μέση τιμή (Σχέσεις 5.3, 5.4, 5.5).

$$AR_t = 2,34 + \varepsilon_{AR,t} \quad (5.3)$$

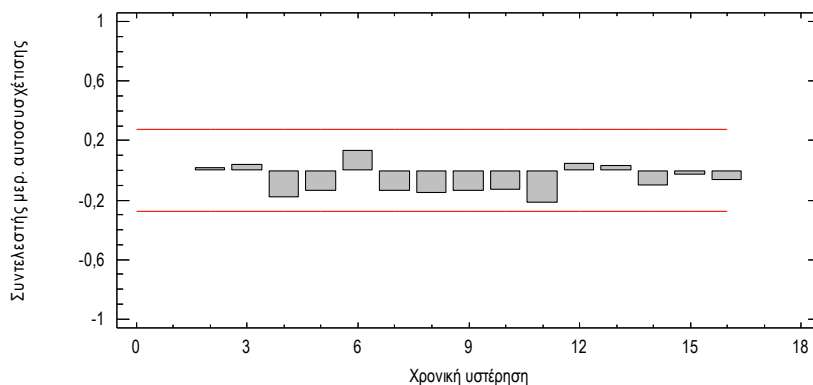
$$SM_t = 3,81 + \varepsilon_{SM,t} \quad (5.4)$$

$$NaEq_t = 0,48 + \varepsilon_{NaEq,t} \quad (5.5)$$

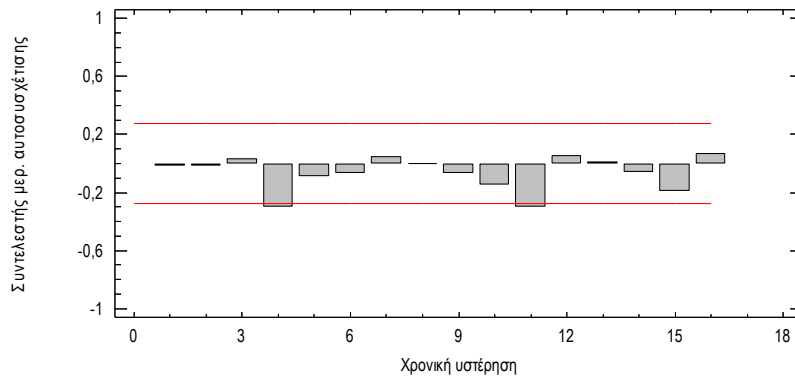
Τα διαγράμματα μεταβολής του συντελεστή μερικής αυτοσυσχέτισης σε σχέση με τη χρονική υστέρηση των υπολοίπων των δεικτών (Σχήματα 5.5 έως 5.8) δείχνουν ότι τα υπόλοιπα δεν εμφανίζουν χρονική εξάρτηση. Επίσης ο έλεγχος για την κατανομή των υπολοίπων έδειξε ότι ακολουθούν την κανονική κατανομή.



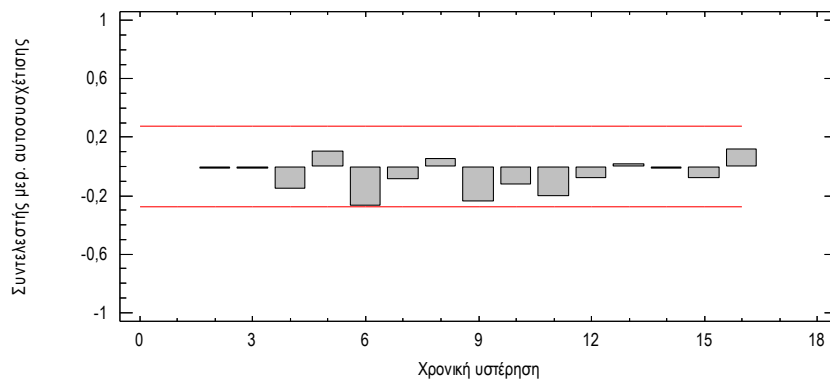
Σχήμα 5.5: Μεταβολή του συντελεστή μερικής αυτοσυσχέτισης του $\varepsilon_{LSF,t}$ σε σχέση με την χρονική υστέρηση. Οι παράλληλες ευθείες είναι τα στατιστικά όρια και για στάθμη σημαντικότητας $\alpha=0,05$.



Σχήμα 5.6: Μεταβολή του συντελεστή μερικής αυτοσυσχέτισης του $\varepsilon_{NaEq,t}$ σε σχέση με την χρονική υστέρηση. Οι παράλληλες ευθείες είναι τα στατιστικά όρια και για στάθμη σημαντικότητας $\alpha=0,05$.

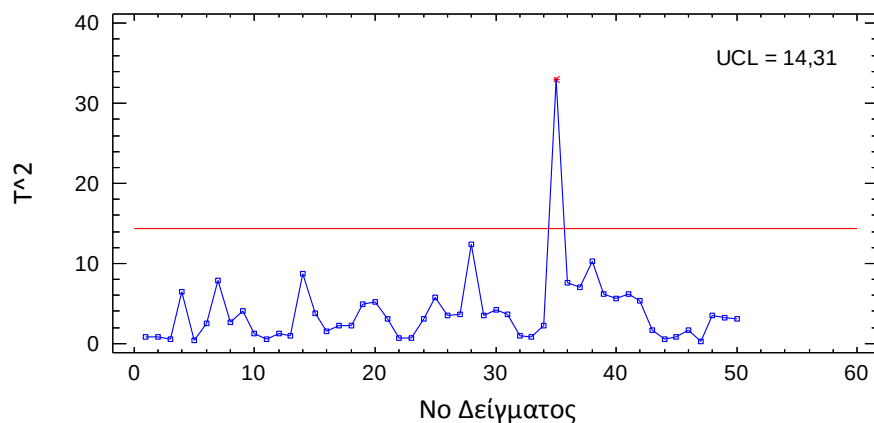


Σχήμα 5.7: Μεταβολή του συντελεστή μερικής αυτοσυσχέτισης του $\varepsilon_{SM,t}$ σε σχέση με την χρονική υστέρηση. Οι παράλληλες ευθείες είναι τα στατιστικά όρια και για στάθμη σημαντικότητας $\alpha=0,05$.



Σχήμα 5.8: Μεταβολή του συντελεστή μερικής αυτοσυσχέτισης του $\varepsilon_{AR,t}$ σε σχέση με την χρονική υστέρηση. Οι παράλληλες ευθείες είναι τα στατιστικά όρια και για στάθμη σημαντικότητας $\alpha=0,05$.

Με βάση τις παραπάνω διαπιστώσεις κατασκευάστηκε το νέο διάγραμμα ελέγχου Hotelling που βασίζεται στα υπόλοιπα των δεικτών και δίνεται στο Σχήμα (5.10).



Σχήμα 5.9: Τροποποιημένο διάγραμμα πολυμεταβλητού ελέγχου Hotelling του δεκάλεπτου των υπολοίπων των δεικτών

Πίνακας 5.1: Συμβολή των μετρούμενων παραμέτρων ελέγχου στη διαμόρφωση του T^2

Δείγμα	T^2	Αρχικές Τιμές			
		Συμβολή d_j στη διαμόρφωση του T^2			
		LSF	AR	SM	NaEq
109	276,9	173	0,60	0,50	0,50
110	71,9	66,01	7,19	6,50	0,60
		Υπόλοιπα			
109	44,47	28,20	1,71	1,49	0,93
110	44,95	32,44	2,94	0,44	2,01

Το τροποποιημένο διάγραμμα Hotelling παρουσιάζει δυο σημεία εκτός ελέγχου όπως και το απλό διάγραμμα αλλά έχει χαμηλότερο τιμή το άνω όριο, δηλαδή ο έλεγχος είναι πιο αυστηρός και με αποτέλεσμα να εντοπίζονται πιο γρήγορα σημεία εκτός ορίων. Το τροποποιημένο διάγραμμα εντοπίζει τα ίδια σημεία εκτός ελέγχου και τη μεγαλύτερη επίδραση έχει και πάλι ο δείκτης κορεσμού σε άσβεστο (LSF), ενώ η συμβολή των υπολοίπων είναι μικρή. Επίσης οι τιμές του T^2 (Πίνακας 5.1) είναι χαμηλότερες από ότι στο αρχικό διάγραμμα. Το τροποποιημένο διάγραμμα και το αρχικό έχουν ταυτόσημα συμπεριφορά και αυτό ίσως να οφείλεται στο γεγονός ότι μερική αυτοσυσχέτιση είχε μόνο ο δείκτης LSF και όχι πολύ ισχυρή. Προφανώς και η ανάλυση της συμπεριφοράς των δεικτών μας οδηγεί στα ίδια συμπεράσματα με αυτά που αναφέρθηκαν στο αρχικό διάγραμμα για την τροφοδοσία του συστήματος με ασβεστολιθικό υλικό και όχι αργιλοπυριτικό. Σαφώς και μεταξύ των διαγραμμάτων προτιμάται το τροποποιημένο διάγραμμα καθότι είναι απαλλαγμένο από την μερική συσχέτιση των τιμών των μεταβλητών και παρέχει πιο αξιόπιστα αποτελέσματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6^ο

Συμπεράσματα – Προτάσεις

6.1 Συμπεράσματα

Η χρήση των μεθόδων του στατιστικού ελέγχου ποιότητας είναι ιδιαίτερα σημαντική για την παραγωγή προϊόντων σταθερής και επαναλήψιμης ποιότητα. Η δυνατότητα που έχουν να εντοπίζουν έγκαιρα αποκλίσεις που προέρχονται από βλάβες ή άλλα ειδικά αίτια (λειτουργία εκτός των ορίων του στατιστικού ελέγχου) συμβάλλουν στην ελαχιστοποίηση του ποσοστού των ελαττωματικών προϊόντων. Βαρύνουσα σημασία στο σημερινό πολύπλοκο παραγωγικό σύστημα, όπως προέκυψε και από τα αποτελέσματα της βιβλιογραφικής έρευνας, κατέχουν οι στατιστικές μέθοδοι ταυτόχρονου ελέγχου πολλαπλών ποιοτικών χαρακτηριστικών.

Η εφαρμογή μεθόδων στατιστικού ελέγχου ποιότητας για το υλικό τροφοδοσίας, που αποτελείται κυρίως από ασβεστόλιθο και σχιστόλιθο, του κλιβάνου παραγωγής κλίνκερ ελληνικής τσιμεντοβιομηχανίας έδειξε ότι:

- Τα απλά διαγράμματα ελέγχου $\bar{x}$ -S του Shewhart δεν ενδείκνυται για την ταυτόχρονη παρακολούθηση, τόσο της χημικής σύστασης όσο και των δεικτών, LSF, SM, AR και NaEq. Η αδυναμία του ταυτόχρονου ελέγχου μέσω των διαγραμμάτων ελέγχου Shewhart οφείλεται κυρίως στις ισχυρές συσχετίσεις που εμφανίζουν τα χημικά στοιχεία αλλά και μερικοί από τους δείκτες.
- Τα διαγράμματα ελέγχου πολλαπλών μεταβλητών Hotelling που εφαρμόστηκαν επιλύουν το πρόβλημα της συσχέτισης και χρησιμοποιούμενα μαζί με απλά διαγράμματα Shewhart για την ευκολότερη ερμηνεία των αποτελεσμάτων, κρίνονται καταλληλότερα.
- Η ανάλυση χρονοσειρών των δεικτών, LSF, SM, AR και NaEq έδειξε ότι εμφανίζεται στατιστικά σημαντική αυτοσυσχέτιση μόνο για τον δείκτη LSF, που μπορεί να περιγραφεί ικανοποιητικά με ένα αυτοπαλινδρομικό μοντέλο 2^{ης} τάξης. Η εμφάνιση τέτοιων χρονικών εξαρτήσεων οφείλεται τόσο στον τρόπο λήψης των μετρήσεων (λαμβάνονται με αυτοματοποιημένα συστήματα με μεγάλη συχνότητα) όσο και στις διαδικασίες ομογενοποίησης των υλικών. Η χρονική αυτή συσχέτιση οδηγεί σε μείωση της αξιοπιστίας των διαγραμμάτων ελέγχου.
- Η ανάπτυξη και εφαρμογή διαγραμμάτων ελέγχου Hotelling στα υπόλοιπα των τιμών των δεικτών LSF, SM, AR και NaEq, μετά την αφαίρεση του παράγοντα της χρονικής εξάρτησης, έδειξε ότι αυξάνεται η αξιοπιστία του ελέγχου.
- Ο υπολογισμός της συμβολής κάθε δείκτη στη διαμόρφωση της τιμής του μεγέθους T^2 των διαγραμμάτων Hotelling, σε συνδυασμό με τη χρήση των απλών διαγραμμάτων Shewhart, αποδείχτηκε ιδιαίτερα χρήσιμος στην ερμηνεία των εκτός στατιστικού ελέγχου περιπτώσεων.

6.2 Προτάσεις

Ο ρόλος του στατιστικού ελέγχου ποιότητας των διεργασιών (SPC) είναι κυρίως να διαγνώσει έγκαιρα και αξιόπιστα καταστάσεις εκτός ελέγχου (σφάλματα, βλάβες, δυσλειτουργίες κ.α.) σε μια παραγωγική διαδικασία. Κατά συνέπεια οι τεχνικές του SPC μπορούν εύκολα να ενσωματωθούν στα ήδη υπάρχοντα συστήματα αυτομάτου ελέγχου που χρησιμοποιούν σήμερα οι τσιμεντοβιομηχανίες και να συνεργαστούν

συμπληρωματικά. Η πληροφορίες που παρέχουν διευκολύνουν τους υπεύθυνους στον εντοπισμό του ειδικού αιτίου που προκάλεσε την εκτός ελέγχου λειτουργία και στη λήψη των απαιτούμενων διορθωτικών μέτρων. Για τον λόγο αυτό είναι πολύ σημαντικό τα συστήματα στατιστικού ελέγχου να συνδυάζονται με τη λειτουργία ενός έμπειρου συστήματος που θα παρέχει συμβουλές για τις απαιτούμενες διορθωτικές ενέργειες. Κατά συνέπεια προτείνεται η ανάπτυξη ενός τέτοιου έμπειρου συστήματος που θα βασιστεί στην αξιοποίηση της υπάρχουσας εμπειρίας για τον εντοπισμό και αντιμετώπιση τέτοιων ειδικών καταστάσεων.

Εκτός των διαγραμμάτων Hotelling εξετάστηκαν προτείνεται επίσης να διερευνηθεί η δυνατότητα χρησιμοποίησης και άλλων τύπων διαγραμμάτων ελέγχου πολλαπλών μεταβλητών όπως, εκείνα που βασίζονται στην ανάλυση κύριες συνιστώσες (Principal Component Analysis), τα σωρευτικά ή αθροιστικά διαγράμματα ελέγχου (Cumulative Control Charts) και τα διαγράμματα εκθετικής εξομάλυνσης πολλαπλών μεταβλητών (Multiple Exponentially Weighted Moving Average).

Επίσης προτείνεται να διερευνηθεί η επίδραση της ακρίβειας των μετρήσεων του on-line αναλυτή, στην αξιοπιστία των διαγραμμάτων του στατιστικού ελέγχου ποιότητας που εξετάστηκε.

.

.

.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Ελληνική βιβλιογραφία

1. Αντζουλάκος Δ., (2008), Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας (Σημειώσεις Παραδόσεων) Πειραιάς
2. Γαλετάκης Μ., (2001), Εφαρμογή διαγραμμάτων ελέγχου Hotelling, στο λιγνιτωρυχείο του Νοτίου Πεδίου της Πτολεμαΐδας, Ορυκτός / Mineral Wealth 119, pp.35-43.
3. Γαλετάκης Μ., (2010), Ποιοτικός Έλεγχος Παραγωγής βασισμένος σε μετρήσεις Πολλαπλών Συσχετιζόμενων Παραμέτρων που Εμφανίζουν Χρονική Εξάρτηση, 4^ο Πανελλήνιο Συνέδριο για την Τυποποίηση, τα Πρότυπα και την Ποιότητα
4. Γαλετάκης Μ., (2012), Έλεγχος Ποιότητας Ορυκτών Πρώτων Υλών
5. Δημητράκοπουλος Δ., (2009), Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας και Μεθοδολογία Έξι Σίγμα στις Υπηρεσίες, Διδακτορική Διατριβή
6. Εμβαλωτής Α., Κάτσης Α., Σιδερίδης Γ., (2006), Στατιστική μεθοδολογία εκπαιδευτικής έρευνας (Σημειώσεις Παραδόσεων)
7. Καρκαλούσος Π., (2002), Η χρήση των αθροιστικών διαγραμμάτων στον εσωτερικό έλεγχο ποιότητας των αναλυτών κλινικής χημείας, Εφαρμ. Κλιν. Μικροβ. Εργ. Διαγν., Οκτ.-Δεκ, 7(4): 181-191
8. Κτενίδης Α., (2011) Παραμετρικά και μη παραμετρικά διαγράμματα ελέγχου και εφαρμογές, Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία
9. Κουλούρη Χ., Μουρελάτου Ε. κ. άλλοι, (2007), Στατιστικός Έλεγχος Διεργασιών. Εφαρμογές στη Βιομηχανία και στις Υπηρεσίες, Φαρμακευτική 20, IV, 127-158
10. Λογοθέτης Ν., (1992), Μάνατζμεντ Ολικής Ποιότητας: από τον Deming στον Taguchi και το Στατιστικό Έλεγχο των Διεργασιών, HellasInterbooks
11. Μαγκανάρη Ε., (2006), Στατιστική ανάλυση σε διαδικασία παραγωγής, Μελέτη περίπτωσης βιομηχανίας παραγωγής τσιμέντου (Μεταπτυχιακή Εργασία)
12. Νενές Γ., (2006), Συγκριτική μελέτη ειδικών στατικών και δυναμικών διαγραμμάτων στατιστικού ελέγχου παραγωγικών διαδικασιών (Διδακτορική Διατριβή)
13. Ταγαράς, Γ., (2001), Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας. Εκδόσεις Ζήτη, Θεσσαλονίκη
14. Τσακαλάκης Κ., (2010), Τεχνολογία παραγωγής τσιμέντου και σκυροδέματος
15. Φουντουλάκη Αικ., (2011), Εμπλουτισμός στατιστικού ελέγχου με τεχνικής μηχανικής μάθησης, (Διδακτορική Διατριβή)
16. James P., (1998), Μάνατζμεντ Ολικής Ποιότητας: Μια εισαγωγή Εκδόσεις Κλειδάριθμος

Διεθνής βιβλιογραφία

1. Albazzaz H., Wang X. Z., (2004), Statistical Process Control Charts for Batch Operations Based on Independent Component Analysis. Ind. Eng. Chem. Res., 43, 6731-6741
2. Antony, J. (1997), Experiments in quality, Manufacturing Engineer, Vol. 76 No. 6, pp. 272-5
3. Bather, J.A., (1963), Control Charts and Minimization of Costs. Journal of the Royal Statistical Society - Series B, 49-80
4. Bird, D. and Dale, B. (1994), The misuse and abuse of SPC: a case study, International Journal of Vehicle Design, Vol. 15, pp. 99-107
5. Bond J., Coursaux R., Wirthington R., (2000), Blending systems and control technologies for cement raw materials, IEEE Industry/Applications Magazine, November-December

6. Chen A., Guo R.-S., Yeh P.-J., (2000), An effective SPC approach to monitoring semiconductor manufacturing processes with multiple variation sources. *Semiconductor Manufacturing. Proceedings of ISSM 2000. The Ninth International Symposium*, 446-449
7. Cook G.E., Maxwell J.E., Barnett R.J., Strauss A.M., (1997), Statistical process control application to weld process. *Industry Applications, IEEE Transaction son*, 33, 454-463
8. Coleman J.L., Nickerson J., (2005), A multivariate exponentially weighted moving average control chart for photovoltaic processes, *Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Thirty- First IEEE*, 1281-1284
9. Crowder, S.V., (1992), An SPC Model for Short Production Runs: Minimizing Expected Cost. *Technometrics*, (1), 64-73
10. Del Castillo, E., Montgomery, D.C., (1996), A General Model for the Optimal Economic Design of $\bar{X}$ Charts Used to Control Short or Long Run Processes. *IIE Transactions*, (3), 193-201
11. Duncan, A.J., (1956), The Economic Design of $\bar{X}$ Charts Used to Maintain Current Control of a Process. *Journal of the American Statistical Association*, (274), 228-242
12. Dvorkin V. I., (2001), Intralaboratory Quality Control of Chemical Analysis with Reference Materials at Disposal. *J. Anal. Chemistry*, 56, 613-624
13. R. A. Johnson, M. Bagshaw, (1974), The effect of serial correlation on the performance of CUSUM tests, *Technometrics*, Vol. 16, p. 103–112
14. .Hanna S. M., (2003), Applications of statistical process control,(SPC) in the manufacturing of medical accelerators, *Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference*, 1077-1079
15. Harry, M.J. (1994), *The Vision of Six Sigma*, Sigma Publishing Company
16. Ho, S., Case, K.E., (1994b), The economically-based EWMA Control Chart. *International Journal of Production Research*,(9), 2179-2186
17. Ipek H., Ankara H., Ozdag H., (1999), The application of statistical process control. *Minerals Engineering*, 12, 827-835
18. Gibra, I.N., (1971), Economically Optimal Determination of the Parameters of $\bar{X}$ - Control Chart. *Management Science*, (9), 635-646
19. Goel, A.L., Jain, S.C., Wu, S.M., (1968), An Algorithm for the Determination of the Economic Design of $\bar{X}$ Charts Based on Duncan's Model. *American Statistical Association Journal*, (321), 304-320
20. Knappenberger, H.A., Grandage, A.H., (1969), Minimum Cost Quality Control Tests. *AIIE Transactions I*, 24-32
21. Kourtí T., Lee J., MacGregor J. F., (1996), Experiences with industrial applications of projection methods for multivariate statistical process control. *Comp Chem.Engin.*,20, 745- 750
22. Kourtí T., (2003), Multivariate dynamic data modelling for analysis and statistical process control of batch processes, start-ups and grade transitions. *Chemometrics*, 17, 93-109
23. Ladany, S.P., Bedi, D.N., (1976), Selection of the Optimal Setup Policy. *Naval Research Logistics Quaterly*, (2), 219-233
24. Ladany, S.P., 1973, Optimal Use of Control Charts for Controlling Current Production. *Management Science*, (7), 763-772
25. Lascelles D. M., Dale B. G., (1988), A study of the quality management methods employed by U. K. automotive suppliers. *Quality and Reliability Engineering International*,4, 301-309
26. Lennox B., Sandoz D., (2002), Recent experiences in the industrial exploitation of principal component based fault detection methods. *IEEE International Symposium on Computer Aided Control System Design Proceedings*

27. Limanond S., Si J., Tsakalis K., (1998), Monitoring and Control of manufacturing processes, IEEE, Control Systems 45-56
28. Little, T.A. (2001), 10 requirements for effective process control: a case study, Quality Progress, Vol. 34 No. 2, pp. 46-52
29. Lorenzen, T.J., Vance, L.C., (1986), The Economic Design of Control Charts: A Unified Approach. Technometrics,(1), 3-10
30. . Mac Nally, R., Hart, B.T., (1997), Use of CUSUM methods for Water- Quality Monitoring in Storages. Environ. Sci. Technol., 31, 2114-2119
31. Makrymichalos M., Antony J., Antony F., Kumar M., (2005), Statistical thinking and its role for industrial engineers and managers in the 21st century. Managerial Auditing Journal, 20, 354-363
32. Mason, B. and Antony, J. (2000), Statistical Process Control: an essential ingredient for improving service and manufacturing quality, Managing Service Quality, Vol. 10 No. 4, pp. 233-238
33. Maurer D., Mengel M., Robertson G., Gerlinger T., Lissner A. ,(1999) Statistical process control in sedimen pollutant analysis. Environmental Pollution, 104, 21-29
34. Montgomery D., (2001), Opportunities and challenges for industrial statisticians. Applied Statistics, 28, 427-439
35. Montgomery, D., (1985), Introduction to Statistical Quality Control
36. Montgomery, D.C., (2001), Introduction to Statistical Quality Control. 4th edition
37. Neogi D., Schlags C. E., (1998), Multivariate Statistical Analysis of an Emulsion Batch Process. Ind. Eng.Chem. Res.,37, 3971-3979
38. Oakland J., (1993), Total Quality Management: The Route to Improving Performance, Butterworth-Heinemann, Oxford
39. Owen, M. (1990), Measuring Service Delivery, Managing Service Quality
40. Owen, M. (1993), SPC and Business Improvement, IFS, Bedford
41. Page, E.S., (1962), A Modified Control Chart with Warning Limits. Biometrika, (1-2), 171-176
42. R. A. Johnson, M. Bagshaw., (1974), "The effect of serial correlation on the performance of CUSUM tests", Technometrics, Vol. 16, p. 103–112
43. Robinson, T., Audibert, R. and Zenda, W. (2000), Statistical process control – it's a tool not a cult, Manufacturing Engineering, Vol. 24 No. 3,pp. 104-17
44. Saniga, E.M., Montgomery, D.C., (1977), Economical Quality Control Policies for a Single Cause System. AIIE Transactions, (3), 258-264
45. Schlags C. E., Popule M. P., (2001), Industrial application of SPC to batch polymerization processes. Proceedings of the American Control Conference, pp. 337-343
46. Semel F. J., Kasputis D. J., Gummeson P. U., (1988), Statistical Process Control in iron ponder production and new product development, presented at the SAE Congress Detroit, Michigan, 1-14
47. Smith A. L., Quade P. B., Douglas, (2005), Inc. Use of Statistical Process Control in Bus Fleet Maintenance at SEPTA. Journal of Public Transportation, 8, 63-77
48. Schofield C., (1983),Homogenization / blending systems design and control for minerals processing
49. Tagaras, G., (1996), Dynamic Control Charts for Finite Production Runs. European Journal of Operational Research, (1), 38-55
50. Tates A. A., Louwerse D. J., Smilde A. K., Koot G.L.M., Harald Berndt., (1999), Monitoring a PVC Batch Process with Multivariate Statistical Process Control Charts. Ind. Eng. Chem. Res., 38, 4769-4776

51. Tong L., Wang C., Huang C., (2005), Monitoring Defects in IC Fabrication Using a Hotelling TH Control Chart. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 18, 140-147
52. Vance, L.C., (1986), Average Run Lengths of Cumulative Sum Control Charts for Controlling Normal Means. Journal of Quality Technology, (3), 189-193
53. von Collani, E., (1988), A Unified Approach to Optimal Process Control. Metrika, 145-159
54. von Collani, E., (1987), Economic Control of Continuously Monitored Production Processes. Reports of Statistical Application Research, (2), 1-18
55. Weindling, J.I., Littauer, S.B., Tiago de Oliveira, J., (1970), Mean Action Time of the X Control Chart with Warning Limits. Journal of Quality Technology, (2), 79-85
56. Wu Zhang., (2004), A np chart using the locational information of nonconforming units. Electronics Packaging Technology Conference. Proceedings of 6th.66-71
57. Xie, M. and Goh, T.N., (1999), Statistical techniques for quality, The TQM Magazine, Vol. 11 No. 4, pp. 238-41
58. Zimmerman S. M., Dardeau M. R., Crozier G. F., Wagstaff B., (1996), The second battle of mobile bay — Using SPC to control the quality of water monitoring. Computers and Industrial Engin., 31, 257-260
59. Zhang H., Lennox B., (2003), Multi-way optimal control of a benchmark fed-batch fermentation process. Transactions of the Institute of Measurement and Control, 25, 403-417
60. Zhang F., (2006), An EWMA control chart for monitoring variability sources of solder joints quality. Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on [see also Components, Packaging and Manufacturing Technology, Part A: Packaging Technologies, IEEE Transactions on]. 29, 80-88

Ιστοσελίδες

www.hcia.gr

www.statistics.gr

www.thermo.com

www.statpgraphics.com