



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΔΙΕΡΕΥΝΗΣΗ ΤΗΣ ΔΙΑΧΡΟΝΙΚΗΣ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΩΝ ΠΟΙΟΤΙΚΩΝ
ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΤΩΝ ΣΙΔΗΡΟΝΙΚΕΛΙΟΥΧΩΝ ΜΕΤΑΛΛΕΥΜΑΤΩΝ ΠΟΥ
ΤΡΟΦΟΔΟΤΟΥΝ ΤΟ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΟ ΣΥΓΚΡΟΤΗΜΑ ΤΗΣ ΛΑΡΚΟ ΜΕ
ΧΡΗΣΗ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ

Φραγκεδάκης Σπύρος

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

ΓΑΛΕΤΑΚΗΣ ΜΙΧΑΗΛ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)

ΚΟΜΝΙΤΣΑΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

ΧΡΙΣΤΟΠΟΥΛΟΣ ΔΙΟΝΥΣΙΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Χανιά

Ιούλιος, 2019

Περίληψη

Στη παρούσα εργασία διερευνάται η διαχρονική εξέλιξη των ποιοτικών χαρακτηριστικών των σιδηρονικελιούχων μεταλλευμάτων που εξορύσσονται από το μεταλλείο του Αγίου Ιωάννη στη περιοχή Λάρυμνας και τροφοδοτούν το μεταλλουργικό συγκρότημα της ΛΑΡΚΟ για το χρονικό διάστημα 2005-2015. Η διερεύνηση της διαχρονικής εξέλιξης έγινε για τις εβδομαδιαίες, μηνιαίες και ετήσιες τιμές και βασίστηκε στη χρήση των στατιστικών διαγραμμάτων ελέγχου ποιότητας (στα απλά διαγράμματα ελέγχου Shewhart και τα διαγράμματα πολλαπλών παραμέτρων Hotelling). Τα διαγράμματα ελέγχου χρησιμοποιούνται για να διαπιστωθεί αν μια παραγωγική διαδικασία είναι υπό στατιστικό έλεγχο ή όχι, και σε περίπτωση που είναι εκτός ελέγχου, εντοπίζονται τα αίτια που προκάλεσαν την απόκλιση έτσι ώστε να γίνουν οι απαιτούμενες διορθωτικές κινήσεις. Τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που μελετήθηκαν ήταν η περιεκτικότητα (%) του μεταλλεύματος σε νικέλιο (Ni), σε συνολικό σίδηρο (Fe_{total}), σε διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2), σε θείο (S), και η υγρασία του.

Αρχικά έγινε υπολογισμός των βασικών στατιστικών παραμέτρων και των συσχετίσεων των ποιοτικών χαρακτηριστικών των σιδηρονικελιούχων μεταλλευμάτων και στη συνέχεια έγινε η κατασκευή των απλών στατιστικών διαγραμμάτων ελέγχου Shewhart, για κάθε παράμετρο ποιότητας, προκειμένου να μελετηθεί η μεταβολή τους στη πάροδο του χρόνου. Επίσης κατασκευάστηκαν και τα διαγράμματα ελέγχου πολλαπλών μεταβλητών Hotelling για τη μελέτη της ταυτόχρονης μεταβολής του Fe_{total} και SiO_2 που εμφάνισαν σχετικά ισχυρή συσχέτιση.

Η κατασκευή των διαγραμμάτων ελέγχου Shewhart έδειξε τα παρακάτω:

Όσον αφορά το νικέλιο, που αποτελεί το βασικότερο ποιοτικό χαρακτηριστικό, στην εβδομαδιαία και μηνιαία διακύμανση εντός του διαστήματος που εξετάστηκε εντοπίστηκαν πολλές εκτός ελέγχου καταστάσεις, ενώ δεν παρουσιάστηκαν ιδιαίτερες διακυμάνσεις της ημερήσιας τιμής εντός της εβδομάδας και του μήνα. Επομένως, το πρόβλημα εντοπίζεται στη διακύμανση που εμφανίζουν οι μέσες εβδομαδιαίες τιμές. Η μελέτη της μακροχρόνιας διακύμανσης του νικελίου, έδειξε μια διαρκή πτωτική πορεία της περιεκτικότητας του στο μέταλλευμα η οποία μπορεί να αποδοθεί στην σταδιακή μετατόπιση της εκμετάλλευσης στα φτωχότερα τμήματα των σιδηρονικελιούχων κοιτασμάτων της περιοχής του Αγίου Ιωάννη.

Όσον αφορά τα υπόλοιπα ποιοτικά χαρακτηριστικά, παρατηρείται ότι ο σίδηρος, το διοξείδιο του πυριτίου και το θείο παρουσιάζουν αρκετές εκτός ελέγχου καταστάσεις, όμως δεν εμφανίζουν κάποια μακροχρόνια τάση. Αντίθετα η υγρασία του μεταλλεύματος, εμφανίζει μια εποχικότητα-κυκλικότητα η οποία σχετίζεται με τις εποχές του χρόνου.

Από την κατασκευή του συνδυαστικού διαγράμματος Hotelling για το σίδηρο και το διοξείδιο του πυριτίου διαπιστώθηκε ότι η πλειοψηφία των περιπτώσεων που είναι εκτός στατιστικού ελέγχου έχουν ήδη εντοπιστεί και από τα μεμονωμένα διαγράμματα Shewhart. Όμως, εντοπίστηκε και ένας περιορισμένος αριθμός περιπτώσεων εκτός στατιστικού ελέγχου στο συνδυαστικό διάγραμμα που δεν είχαν εντοπιστεί από τα μεμονωμένα διαγράμματα. Η ταυτόχρονη χρήση του μεμονωμένα διαγράμματα επιφέρει μια σχετικά μικρή βελτίωση στην αποτελεσματικότητα του ελέγχου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Θα ήθελα να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Μιχαήλ Γαλετάκη για την βοήθεια και την στήριξη του καθ' όλη την διάρκεια πραγματοποίησης της διπλωματικής εργασίας μου.

Επίσης ευχαριστώ την κα. Ανθή Βασιλείου για τη διαρκή βοήθεια της καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Ευχαριστώ επίσης τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής τους καθηγητές κ. Κων/νο Κομνίτσα και Διονύσιο Χριστόπουλο για τις εύστοχες υποδείξεις και διορθώσεις τους.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω τους γονείς μου Παναγιώτη και Αντωνία Φραγκεδάκη καθώς και όλους όσους στάθηκαν στο πλευρό μου όλα αυτά τα χρόνια των σπουδών και με βοήθησαν σε όλους τους τομείς, ώστε να πετύχω αυτό τον μεγάλο στόχο της ζωής μου.

Περιεχόμενα

.....	1
Περίληψη.....	2
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	11
1.1 Περιγραφή του προβλήματος και προτεινόμενη μεθοδολογία.....	11
1.2 Διάρθρωση εργασίας.....	12
2. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΝΙΚΕΛΙΟΥ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΤΟ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΟ ΣΥΓΚΡΟΤΗΜΑ ΤΗΣ ΛΑΡΚΟ.....	14
2.1 Νικέλιο.....	14
2.2 Κατηγορίες Λατεριτικών Σιδηρονικελιούχων Κοιτασμάτων	16
2.3 Εκμετάλλευση σιδηρονικελιούχων κοιτασμάτων από τη ΛΑΡΚΟ.....	18
2.3.1 Μεταλλεία Καστοριάς.....	20
2.3.2 Μεταλλεία Εύβοιας.....	21
2.3.3 Μεταλλεία Αγίου Ιωάννη.....	21
2.4 Μεταλλουργική Βιομηχανία ΛΑΡΚΟ.....	22
2.5 Μεταλλουργικό εργοστάσιο Λάρυμνας – Παραγωγική Διαδικασία.....	22
2.5.1 Διακίνηση πρώτων υλών και ανάμιξη για προετοιμασία του μεταλλουργικού μίγματος.....	24
2.5.2 Προθέρμανση και Προαναγωγή του Μεταλλεύματος σε Περιστροφικές Καμίνους.....	25
2.5.3 Αναγωγική τήξη σε Ηλεκτρικές Καμίνους.....	26
2.5.4 Εμπλουτισμός - Εξευγενισμός σε Μεταλλάκτες.....	26
3 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ SHEWART.....	28
3.1 Διάγραμμα ελέγχου-Μεταβλητότητα και αιτίες.....	28
3.2 Κατασκευή διαγράμματος ελέγχου μέσης τιμής – εύρους (\bar{x} -R).....	35
3.3 Διάγραμμα ελέγχου για μεμονωμένες τιμές.....	37
3.4 Διάγραμμα ελέγχου μέσης τιμής – τυπικής απόκλισης (\bar{x} -S).....	38

3.5 Διαγράμματα πολλαπλών χαρακτηριστικών.....	39
3.6 Εφαρμογές των διαγραμμάτων ελέγχου στην μεταλλευτική βιομηχανία – Βιβλιογραφική ανασκόπηση.....	42
4. ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΒΑΣΙΚΩΝ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ.....	44
4.1 Προέλευση μεταλλευμάτων – τρόπος παράδοσης και ποιοτικού ελέγχου.....	44
4.2 Μεθοδολογία στατιστικής ανάλυσης και λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε.....	46
4.3 Επιλογή χρονικού διαστήματος μελέτης.....	47
4.4 Υπολογισμός βασικών στατιστικών μεγεθών.....	49
5. ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ \bar{x} -S ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΤΩΝ ΠΟΙΟΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ.....	55
Εισαγωγή.....	55
5.1. Κατασκευή μεμονωμένων διαγραμμάτων ελέγχου περιεκτικότητας Ni σε εβδομαδιαία, μηνιαία και ετήσια βάση.....	56
5.2 Κατασκευή μεμονωμένων διαγραμμάτων ελέγχου περιεκτικότητας Fe _{total} σε εβδομαδιαία, μηνιαία και ετήσια βάση.....	60
5.3 Κατασκευή μεμονωμένων διαγραμμάτων ελέγχου περιεκτικότητας SiO ₂ σε εβδομαδιαία, μηνιαία και ετήσια βάση.....	62
5.4 Κατασκευή μεμονωμένων διαγραμμάτων ελέγχου περιεκτικότητα υγρασίας σε εβδομαδιαία, μηνιαία και ετήσια βάση.....	64
5.5 Κατασκευή μεμονωμένων διαγραμμάτων ελέγχου περιεκτικότητας S σε εβδομαδιαία, μηνιαία και ετήσια βάση.....	66
6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ.....	71
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	73

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 2.1: Κυριότερες χρήσεις του νικελίου	15
Σχήμα 2.2: Παραγωγή Νικελίου ανά χώρα για το έτος 2013	22
Σχήμα 2.3: Σχηματικό απλοποιημένο διάγραμμα ροής της παραγωγής σιδηρονικελίου από σιδηρονικελιούχα μεταλλεύματα στο εργοστάσιο της Λάρκο στη Λάρυμνα Φθιώτιδας.....	23
Σχήμα 2.4: Κύριες φάσεις επεξεργασίας μεταλλεύματος.....	24
Σχήμα 2.5: Τυπική αναλογία μεταλλευμάτων στο μεταλλουργικό μείγμα.....	25
Σχήμα 3.1: Τυπικό διάγραμμα ελέγχου για τη μέση τιμή του δείγματος με τα όρια ελέγχου και την κεντρική γραμμή.....	30
Σχήμα 3.2: Διάγραμμα ελέγχου με προειδοποιητικά όρια.....	32
Σχήμα 3.3: Διαδικασία εκτός στατιστικού ελέγχου. Ένα σημείο βρίσκεται πάνω από το ανώτερο όριο ελέγχου.....	32
Σχήμα 3.4: Διαδικασία εκτός στατιστικού ελέγχου. Επτά συνεχόμενα σημεία βρίσκονται πάνω από την κεντρική γραμμή.....	33
Σχήμα 3.5: Διαδικασία εκτός στατιστικού ελέγχου. Ύπαρξη περιοδικότητας.....	33
Σχήμα 3.6: Διαδικασία εκτός στατιστικού ελέγχου. Ύπαρξη αλμάτων.....	33
Σχήμα 3.7: Διαδικασία εκτός στατιστικού ελέγχου. Επτά συνεχόμενα σημεία βρίσκονται κάτω από την κεντρική γραμμή.....	34
Σχήμα 3.8: Διαδικασία εκτός στατιστικού ελέγχου. Συνεχόμενα σημεία βρίσκονται επί της κεντρικής γραμμής.....	34
Σχήμα 3.9: Διαδικασία εκτός στατιστικού ελέγχου. Ύπαρξη τάσης.....	34
Σχήμα 4.1: Διαχρονική εξέλιξη των ημερήσιων τιμών (%) του σιδήρου, του νικελίου, του διοξειδίου του πυριτίου, του θείου και της υγρασίας στα μεταλλεία Αγίου Ιωάννη από 01/01/2005 έως 13/01/2015.....	48
Σχήμα 4.2: Διαγράμματα συσχέτισης των ποιοτικών χαρακτηριστικών του μεταλλεύματος από τα μεταλλεία Αγίου Ιωάννη, για την περίοδο 01/11/2009 έως 13/01/2015.....	51
Σχήμα 4.3: Ιστογράμματα περιεκτικότητας Fe_{total} , Ni, SiO_2 , υγρασίας και S για το μεταλλεύμα Αγίου Ιωάννη για την περίοδο 01/11/2009 έως 13/01/2015. Με μπλε γραμμή δίνεται η μορφή της προσαρμοσθείσας κανονικής κατανομής.....	53

Σχήμα 4.4: Ιστογράμματα περιεκτικότητας S για το μετάλλευμα Αγίου Ιωάννη για την περίοδο 01/11/2009 έως 13/01/2015 σε εβδομαδιαία και μηνιαία βάση. Με μπλε γραμμή δίνεται η μορφή της προσαρμοσθείσας κανονικής κατανομής.....54

Σχήμα 5.1: Ποιοτικά χαρακτηριστικά του μεταλλεύματος από τα μεταλλεία Αγίου Ιωάννη που ελέγχθηκαν.....55

Σχήμα 5.2: Τυπικό διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης για την εβδομαδιαία διακύμανση του Ni (%) από 01/11/2009 έως 13/01/2015. Η εβδομάδα Νο1 είναι εκείνη που αρχίζει στις 01/11/2009. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.....57

Σχήμα 5.3: Τυπικό διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης για την μηνιαία διακύμανση του Ni (%) από 01/11/2009 έως 13/01/2015. Ο μήνας Νο1 είναι εκείνος που αρχίζει στις 01/11/2009. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.....58

Σχήμα 5.4: Τυπικό διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής για την ετήσια διακύμανση του Ni (%) βασισμένο στις μηνιαίες τιμές από 01/01/2005 έως 13/01/2015. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου..... 59

Σχήμα 5.5: Τυπικό διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης για την εβδομαδιαία διακύμανση του Fe_{total} (%) από 01/11/2009 έως 13/01/2015. Η εβδομάδα Νο1 είναι εκείνη που αρχίζει στις 01/11/2009. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.....60

Σχήμα 5.6: Τυπικό διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης για την μηνιαία διακύμανση του Fe_{total} (%) από 01/11/2009 έως 13/01/2015. Ο μήνας Νο1 είναι εκείνος που αρχίζει στις 01/11/2009. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.....60

Σχήμα 5.7: Τυπικό διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής για την ετήσια διακύμανση του Fe_{total} (%) βασισμένο στις μηνιαίες τιμές από 01/01/2005 έως 13/01/2015. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.....61

Σχήμα 5.8: Τυπικό διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης για την εβδομαδιαία διακύμανση του SiO₂ (%) από 01/11/2009 έως 13/01/2015. Η εβδομάδα Νο1 είναι εκείνη που αρχίζει στις 01/11/2009. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.....62

Σχήμα 5.9: Τυπικό διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης για την μηνιαία διακύμανση του SiO₂ (%) από 01/11/2009 έως 13/01/2015. Ο μήνας Νο1

είναι εκείνος που αρχίζει στις 01/11/2009. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.....	62
Σχήμα 5.10: Τυπικό διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής για την ετήσια διακύμανση του SiO ₂ (%) βασισμένο στις μηνιαίες τιμές από 01/01/2005 έως 13/01/2015. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.....	63
Σχήμα 5.11: Τυπικό διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης για την εβδομαδιαία διακύμανση της υγρασίας (%) από 01/11/2009 έως 13/01/2015. Η εβδομάδα Νο1 είναι εκείνη που αρχίζει στις 01/11/2009. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.....	64
Σχήμα 5.12: Τυπικό διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης για την μηνιαία διακύμανση της υγρασίας (%) από 01/11/2009 έως 13/01/2015. Ο μήνας Νο1 είναι εκείνος που αρχίζει στις 01/11/2009. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.....	64
Σχήμα 5.13: Τυπικό διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής για την ετήσια διακύμανση της υγρασίας (%) βασισμένο στις μηνιαίες τιμές από 01/01/2005 έως 31/12/2014. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.....	65
Σχήμα 5.14: Τυπικό διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης για την εβδομαδιαία διακύμανση του S (%) από 01/11/2009 έως 13/01/2015. Η εβδομάδα Νο1 είναι εκείνη που αρχίζει στις 01/11/2009. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.....	66
Σχήμα 5.15: Τυπικό διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης για την μηνιαία διακύμανση του S (%) από 01/11/2009 έως 13/01/2015. Ο μήνας Νο1 είναι εκείνος που αρχίζει στις 01/11/2009. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.....	66
Σχήμα 5.16: Τυπικό διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής για την ετήσια διακύμανση του S (%) βασισμένο στις μηνιαίες τιμές από 01/01/2005 έως 13/01/2015. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.....	67
Σχήμα 5.17: Συνδυαστικό διάγραμμα ελέγχου T ² για την εβδομαδιαία διακύμανση του Fe _{total} και SiO ₂ (%) από 01/11/2009 έως και 13/01/2015. Η εβδομάδα Νο1 είναι εκείνη που αρχίζει στις 01/11/2009. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.....	68

ΕΥΡΕΤΗΡΙΟ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 2.1: Χημικά στοιχεία που περιέχουν νικέλιο.....	14
Πίνακας 2.2: Χημική σύσταση μεταλλευμάτων από τα μεταλλεία Αγίου Ιωάννη, Εύβοιας και Καστοριάς.....	19
Πίνακας 3.1: Τιμές των συντελεστών A2, D3 και D4 συναρτήσει του μεγέθους n του δείγματος για τα διαγράμματα (\bar{x} -R).....	36
Πίνακας 3.2: Τιμές των συντελεστών A3, B3 και B4 συναρτήσει του μεγέθους n του δείγματος για τα διαγράμματα (\bar{x} -S).....	39
Πίνακας 4.1: Τυπικό απόσπασμα αναλύσεων μεταλλευμάτων σε ημερήσια βάση από τα Μεταλλεία Αγίου Ιωάννη.....	45
Πίνακας 4.2: Βασικές στατιστικές παράμετροι που υπολογίστηκαν για τα ποιοτικά στοιχεία του μεταλλεύματος για την περίοδο 01/01/2005-31/10/2009 (Π1) και για την περίοδο 01/11/2009-13/01/2015 (Π2).....	50
Πίνακας 4.3: Συντελεστές συσχέτισης Pearson για τα ποιοτικά χαρακτηριστικά στα μεταλλεία Αγίου Ιωάννη την περίοδο 01/01/2005 έως 13/01/2015.....	51
Πίνακας 5.1: Συγκεντρωτικός αριθμός των περιπτώσεων που βρίσκονται εκτός στατιστικού ελέγχου από τα μεμονωμένα διαγράμματα ελέγχου (\bar{x} -S) για όλα τα ποιοτικά χαρακτηριστικά.....	67
Πίνακας 5.2: Απόσπασμα των περιπτώσεων εκτός στατιστικού ελέγχου από τα μεμονωμένα διαγράμματα ελέγχου και από το συνδυαστικό διάγραμμα T^2 για την εβδομαδιαία διακύμανση του Fe_{total} και του SiO^2 (%).....	69

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Περιγραφή του προβλήματος και προτεινόμενη μεθοδολογία

Αντικείμενο της παρούσας εργασίας αποτελεί η μελέτη της διακύμανσης και της διαχρονικής εξέλιξης των ποιοτικών χαρακτηριστικών των σιδηρονικελιούχων μεταλλευμάτων που τροφοδοτούν το μεταλλουργικό συγκρότημα της βιομηχανίας ΛΑΡΚΟ. Η μελέτη επικεντρώνεται στα μεταλλεία του Αγίου Ιωάννη, ενώ η χρονική περίοδος που εξετάστηκε αφορά το χρονικό διάστημα από 2005 έως 2015.

Η διερεύνηση της διαχρονικής εξέλιξης βασίζεται στη χρήση των στατιστικών διαγραμμάτων ελέγχου ποιότητας (τα απλά διαγράμματα ελέγχου Shewhart και τα διαγράμματα πολλαπλών παραμέτρων Hotelling). Τα διαγράμματα ελέγχου χρησιμοποιούνται για να διαπιστωθεί αν μια παραγωγική διαδικασία είναι υπό στατιστικό έλεγχο ή όχι, και σε περίπτωση που είναι εκτός ελέγχου, εντοπίζονται τα αίτια που προκάλεσαν τη διαταραχή και γίνονται οι απαιτούμενες διορθωτικές κινήσεις για την επίλυσή τους.

Πιο συγκεκριμένα η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε περιελάμβανε τα παρακάτω:

- Υπολογισμό των βασικών στατιστικών παραμέτρων και των συσχετίσεων των ποιοτικών χαρακτηριστικών των σιδηρονικελιούχων μεταλλευμάτων. Οι βασικές παράμετροι ποιότητας που μετρώνται σε ημερήσια βάση από την εταιρεία ΛΑΡΚΟ και χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία είναι: Η περιεκτικότητα (%) του μεταλλεύματος σε: νικέλιο (Ni), συνολικό σίδηρο (Fe_{total}), διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2), θείο (S) και υγρασία.
- Κατασκευή των απλών στατιστικών διαγραμμάτων ελέγχου Shewhart, για κάθε παράμετρο ποιότητας, προκειμένου να μελετηθεί η μεταβολή τους στη πάροδο του χρόνου.
- Κατασκευή των διαγραμμάτων ελέγχου πολλαπλών μεταβλητών Hotelling, προκειμένου να η ταυτόχρονη μεταβολή μεταβλητών ποιότητας που εμφανίζουν συσχέτιση.

Σε σχέση με τη μελέτη της διαχρονικής τους μεταβολής έγινε διερεύνηση της εξέλιξης των ποιοτικών χαρακτηριστικών σε εβδομαδιαία, μηναία και ετήσια βάση. Οι εβδομαδιαίες μεταβολές χαρακτηρίζονται ως βραχυπρόθεσμες, ενώ οι μηνιαίες και οι ετήσιες μεταβολές μπορούν να χαρακτηριστούν ως μεσοπρόθεσμες και

μακροπρόθεσμες αντίστοιχα καθώς αναφέρονται σε διαφορετική χρονική στιγμή μέσα σε ένα συγκεκριμένο χρονικό διάστημα μελέτης.

Η μελέτη κάθε κατηγορίας μεταβολών στοχεύει στην εξαγωγή διαφορετικών συμπερασμάτων. Πιο συγκεκριμένα, η μελέτη των εβδομαδιαίων διακυμάνσεων έχει ως στόχο να διαπιστώσει μη αναμενόμενες μεταβολές ποιότητας που σχετίζονται κατά κύριο λόγο με αλλαγές θέσεων εντός των μετώπων εξόρυξης του μεταλλείου και με την απόδοση των ακολουθούμενων τεχνικών ομογενοποίησης-ανάμειξης των μεταλλευμάτων που ακολουθεί την εξόρυξη. Η μελέτη των μηνιαίων και ετήσιων διακυμάνσεων στοχεύει στον έλεγχο μεταβολών μεγαλύτερης χρονικής κλίμακας που σχετίζονται με την σταδιακή μετάβαση της εκμετάλλευσης σε μέτωπα ή τμήματα του κοιτάσματος με διαφορετική ποιότητα.

Τέλος η κατασκευή των διαγραμμάτων ελέγχου πολλαπλών χαρακτηριστικών (Hotelling) έχει ως στόχο να εντοπίσει περιπτώσεις στις οποίες υπάρχει μη αναμενόμενη μεταβολή της ποιότητας και οι οποίες περιπτώσεις δεν μπορούν να εντοπιστούν με τα απλά διαγράμματα ελέγχου. Αυτό συμβαίνει διότι τα διαγράμματα Hotelling λαμβάνουν υπόψη τη συσχέτιση των ποιοτικών χαρακτηριστικών σε αντίθεση με τα απλά διαγράμματα που ελέγχουν μια παράμετρο ποιότητας κάθε φορά, θεωρώντας την ανεξάρτητη από τις άλλες.

1.2 Διάρθρωση εργασίας

Με βάση όσα αναφέρθηκαν η εργασία διαρθρώνεται σε έξι κεφάλαια:

Στο πρώτο κεφάλαιο γίνεται η περιγραφή του προβλήματος, τίθενται οι στόχοι και περιγράφεται ο τρόπος με τον οποίο θα επιτευχθεί η υλοποίησή τους.

Στο δεύτερο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα γενικά στοιχεία για την παραγωγή του νικελίου, το μεταλλουργικό συγκρότημα της βιομηχανίας ΛΑΡΚΟ καθώς και για την παραγωγική διαδικασία που ακολουθείται.

Στο τρίτο κεφάλαιο περιγράφονται τα στατιστικά διαγράμματα ελέγχου ποιότητας που χρησιμοποιούνται για τη μελέτη της διαχρονικής εξέλιξης των ποιοτικών χαρακτηριστικών. Ειδικότερα αναλύεται ο τρόπος κατασκευής και ερμηνείας τόσο των απλών διαγραμμάτων στατιστικού ελέγχου μεμονωμένων τιμών, μέσης τιμής-εύρους

(\bar{x} -R) ή μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης (\bar{x} -S), όσο των διαγραμμάτων στατιστικού ελέγχου πολλαπλών χαρακτηριστικών (διαγράμματα Hotelling). Επιπλέον από την βιβλιογραφική ανασκόπηση που έγινε παρουσιάζονται εφαρμογές των διαγραμμάτων ελέγχου στην μεταλλευτική βιομηχανία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν και το λογισμικό στατιστικής ανάλυσης που χρησιμοποιήθηκε. Επίσης αναφέρονται οι παραδοχές της ανάλυσης των δεδομένων και υπολογίζονται τα βασικά στατιστικά μεγέθη των παραμέτρων ποιότητας που επιλέχθηκαν.

Στο πέμπτο κεφάλαιο γίνεται μελέτη της διαχρονικής εξέλιξης της ποιότητας των εβδομαδιαίων, μηνιαίων και ετήσιων τιμών των παραμέτρων ποιότητας. Η μελέτη γίνεται με χρήση τόσο των απλών διαγραμμάτων ελέγχου \bar{x} -S, όσο και των διαγραμμάτων πολλαπλών χαρακτηριστικών Hotelling για τα συσχετιζόμενα ποιοτικά χαρακτηριστικά.

Στο έκτο κεφάλαιο παρουσιάζονται τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για περαιτέρω έρευνα.

1. ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΝΙΚΕΛΙΟΥ ΚΑΙ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΗ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΑ ΣΤΟ ΜΕΤΑΛΛΟΥΡΓΙΚΟ ΣΥΓΚΡΟΤΗΜΑ ΤΗΣ ΛΑΡΚΟ

2.1 Νικέλιο

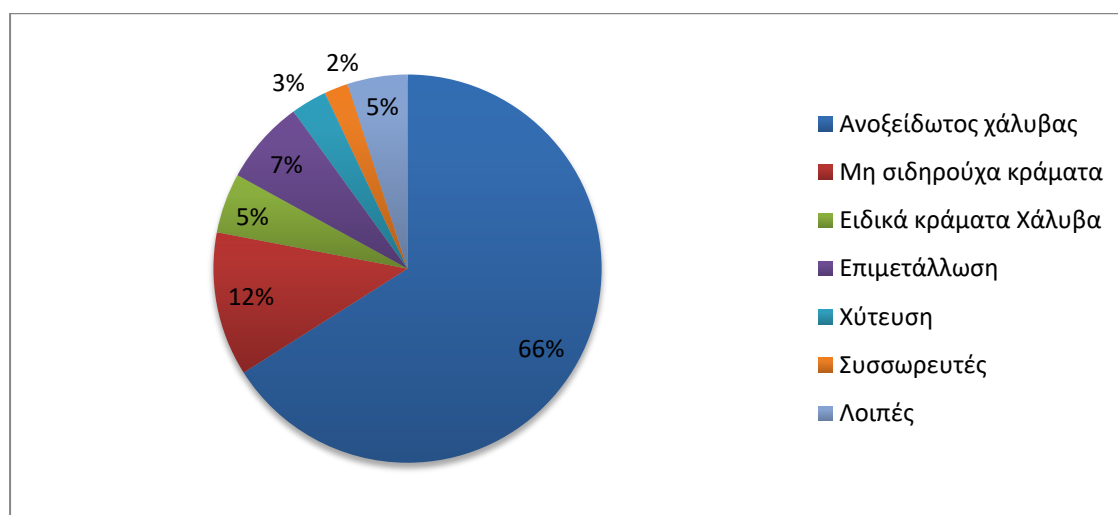
Το νικέλιο αποτελεί το 5^ο πιο κοινό στοιχείο στη Γη. Είναι ένα στοιχείο το οποίο συναντάται κυρίως σε μορφή θειούχων ενώσεων, οξειδίων και αλάτων ανόργανων ουσιών (larco.gr). Στον πίνακα 2.1 παρουσιάζονται τα κυριότερα ορυκτά που περιέχουν νικέλιο (N. Καντηράνης, ΑΠΘ, geo.auth.gr/courses/gmo/gmo645y/pdf_theory/ni.pdf).

Πίνακας 2.1: Χημικά στοιχεία που περιέχουν νικέλιο.

Στοιχείο	Χημική Σύσταση	Ni % (κ.β.)	Κρυσταλλική δομή
Πενταλίτης	(Fe,Ni) ₉ S ₈	20 - 45	Κυβική
Μιλιρίτης	NiS	64,7	Τριγωνική
Ξυροξυλίτης	Ni ₂ S ₂	73	Κυβική
Λινίτης	Ni ₃ S ₄	58	Κυβική
Γερσδορφίτης	NiAsS	35,5	Κυβική
Νικολίτης	NiAs	40 - 44	Εξαγωνική
Παραβιάτης	NiSb	32,5	Εξαγωνική
Γαρνιρίτης(Ni-serpentine)	(NiMg) ₆ [(OH) ₈ /Si ₄ O ₁₀]	έως 40	Μονοκλινή
Χλοανθίτης (Skutterudite)	(Ni,Co)As ₃	10 – 25	Κυβική
Χλωριούχο Νικέλιο(Ni-chlorite)	(Ni,Mg,Al) ₆ [(OH) ₈ (Al,Si)Si ₃ O ₁₀]	έως 30	Μονοκλινή
Πιμελίτης (Ni)	(Ni,Mg) ₃ .Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ .4H ₂ O	έως 30	Μονοκλινή
Αναβεργίτης	Ni ₃ (AsO ₄) ₂ .2H ₂ O	30	Μονοκλινή

Το νικέλιο είναι εξαιρετικά σημαντικό εμπορικό προϊόν, διαδραματίζοντας σημαντικό ρόλο στην παγκόσμια βιομηχανική ανάπτυξη. Οι παράγοντες που καθιστούν το νικέλιο και τα κράματά του πολύτιμα εμπορεύσιμα αγαθά είναι η μηχανική αντοχή, η αντίσταση στη διάβρωση, η ελαστικότητα, η καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, τα μαγνητικά χαρακτηριστικά και οι καταλυτικές ιδιότητες που διαθέτει (larco.gr).

Το νικέλιο χρησιμοποιείται (Σχήμα 2.1) κυρίως στην παραγωγή ανοξείδωτου χάλυβα μέσω του κράματος του σιδηρονικέλιου (66%) (Κωστάκης, 1988). Ωστόσο, χρησιμοποιείται επίσης στην παραγωγή μη σιδηρούχων κραμάτων (12%), ειδικών κραμάτων χάλυβα (5%), στην επιμετάλλωση (7%), στη χύτευση των μετάλλων (3%) και στους συσσωρευτές (2%).



Σχήμα 2.1: Κυριότερες χρήσεις του νικελίου (Κωστάκης, 1988).

Το σιδηρονικέλιο είναι ένα κράμα που περιέχει νικέλιο και σίδηρο σε αναλογίες που διαφέρουν μεταξύ των παραγωγών και κυμαίνονται από 20-40 % νικέλιο και 60-80 % σίδηρο (Δημόπουλος, 1986). Το σιδηρονικέλιο χρησιμοποιείται πρωτίστως στην κατασκευή ωστενιτικών ανοξείδωτων χάλυβων (γνωστών και ως σειρές S200 και S300). Αυτοί είναι μη μαγνητικοί και περιέχουν μεταξύ 8,5% και 25% νικέλιο, ενισχύοντας την αντιδιαβρωτική τους αντίσταση. Είναι η πιο ευρέως διαδεδομένη ομάδα ανοξείδωτων χαλύβων, αναλογώντας στο 70-75% περίπου της παγκόσμιας παραγωγής. Οι φερριτικοί ανοξείδωτοι χάλυβες (γνωστοί και ως σειρά 400) δεν περιέχουν νικέλιο (larco.gr).

Το σιδηρονικέλιο χρησιμοποιείται στις τηλεπικοινωνίες, στη παραγωγή πετρελαίου και βενζίνης, στην υγιεινολογική κατεργασία τροφίμων και ποτών, στον ασφαλή και

αξιόπιστο ιατρικό εξοπλισμό, καθώς και στην κατασκευή υβριδικών οχημάτων (Αλεβίζος, 1997).

Η χρήση του σιδηρονικελίου είναι εξαιρετικά καινοτόμος, ενώ η μεγάλη του χρηστικότητα αντισταθμίζει το σχετικά υψηλό του κόστος. Με αποδεδειγμένη την καινοτόμο πορεία του, το σιδηρονικέλιο θα διαδραματίσει έναν ακόμα πιο σημαντικό ρόλο στις μελλοντικές κοινωνίες από ότι σήμερα (Στουρνάρας, 1989).

1.2 Κατηγορίες Λατεριτικών Σιδηρονικελιούχων Κοιτασμάτων

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι κοιτασμάτων νικελίου :

- Τα πρωτογενή, μαγματικής προέλευσης που αποτελούνται από σουλφίδια σιδήρου-χαλκού-νικελίου.
- Τα δευτερογενή από αποσάθρωση (λατεριτικά) που αποτελούνται από οξειδία και υδροξείδια σιδήρου και από πυριτικές ενώσεις του νικελίου.

Και οι δύο τύποι κοιτασμάτων συνδέονται γενετικά με βασικά-υπερβασικά πετρώματα. Μέχρι το 1970 τα πρωτογενή κοιτάσματα έδιναν το 75% της παγκόσμιας παραγωγής νικελίου. Κατά τα τελευταία όμως χρόνια αυξάνει αλματωδώς η εκμετάλλευση των λατεριτικών κοιτασμάτων νικελίου, λόγω της μεγαλύτερης ευκολίας εξόρυξης, αλλά και των πολύ μεγαλύτερων αποθεμάτων σε σχέση με τα μαγματογενή. Συνεχώς γίνονται έρευνες για την ανεύρεση νέων μεθόδων απόληψης του νικελίου από τις πυριτικές του ενώσεις, με τις οποίες βρίσκεται στα λατεριτικά του κοιτάσματα. Είναι γνωστό ότι τα μητρικά πετρώματα των σιδηρονικελιούχων λατεριτικών κοιτασμάτων είναι οι οφιόλιθοι.

Με τον όρο οφιόλιθοι χαρακτηρίζουμε μία ομάδα συγγενών πετρωμάτων: περιδοτίτης (σερπεντινίτης), γάββρος, διαβάσης, σπιλίτης, κτλ που βρίσκονται πάντοτε στενά συνδεδεμένα με ιζήματα βαθιάς θάλασσας (ραδιολαρίτες, κερατόλιθοι, πελαγικές άργιλοι).

Ο όρος λατερίτης δόθηκε για πρώτη φορά από τον Buchanan 1807 για να περιγράψει ένα σιδηρούχο, σκωριώδες, άστρωτο και πορώδες υλικό, με χρώμα που ποικίλλει μεταξύ κιτρινωπού κόκκινου σε σκούρο καστανοκόκκινο. Αυτό το υλικό που στην αρχή ήταν μαλακό, γινόταν πολύ σκληρό με τη ξήρανση, για αυτό πήρε και το όνομα

λατερίτης (από το λατινικό later=πλιθάρι). Αργότερα, διαπιστώθηκε ότι ο λατερίτης είναι προϊόν τροπικής και υποτροπικής αποσάθρωσης διαφορετικών πετρωμάτων. Η χημική αποσάθρωση των πετρωμάτων κάτω από συνθήκες θερμού και υγρού κλίματος (τροπικού και υποτροπικού), έντονης βλάστησης, ήπιου μορφολογικού ανάγλυφου, εύκολης εισχώρησης του νερού και χαμηλού υδροφόρου ορίζοντα είναι εξαιρετικά έντονη και ονομάζεται λατεριτική αποσάθρωση ή λατεριτίωση, γιατί οδηγεί στο σχηματισμό ενός υπολειμματικού προϊόντος πλούσιου σε Fe, Al, Ti, Cr, Ni, Mn του λατερίτη. Η σύσταση του λατερίτη (ορυκτολογική και γεωχημική) καθορίζεται αποκλειστικά από το είδος του πετρώματος που δέχεται τη λατεριτίωση. Έτσι, ο λατερίτης, που είναι το προϊόν της χημικής αποσάθρωσης υπερβασικών πετρωμάτων είναι πλούσιος σε δευτερογενή οξείδια ή/και υδροξείδια του σιδήρου, κλαστικούς κόκκους χρωμίτη-μαγνητίτη και περιέχει αυξημένη ποσότητα νικελίου. Με βάση τη σύσταση αυτή χαρακτηρίζονται συχνά τα κοιτάσματα αυτά ως λατεριτικά σιδηρονικελιούχα.

Τα λατεριτικά σιδηρονικελιούχα κοιτάσματα αποτελούν δευτερογενή κοιτάσματα, γιατί είναι το αποτέλεσμα διεργασιών που συνέβησαν μετά τη γένεση των οφιολίθων. Διακρίνονται σε δύο κατηγορίες, ανάλογα με τον τρόπο δημιουργίας τους (Μιχαηλίδης, 1982).

- Πρωτογενή, ή αυτόχθονα από αποσάθρωση, όταν δεν έχουν μετακινηθεί από την αρχική τους θέση και βρίσκονται πάνω στα μητρικά τους πετρώματα (οφιολίθους).
- Δευτερογενή, αλλόχθονα ή ιζηματογενή, όταν έχουν μετακινηθεί από το μητρικό τους πέτρωμα και τώρα βρίσκονται πάνω σε ιζηματογενή πετρώματα.

Ο πρώτος τύπος είναι οι μάλλον σπάνιοι στην Ελλάδα αυτόχθονοι λατερίτες, κοιτάσματα που σχηματίστηκαν από τη χημική αποσάθρωση υπερβασικών πετρωμάτων (οφιολίθων), κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες περιβάλλοντος. Κοιτάσματα τέτοιου τύπου είναι αυτά που απαντούν στην περιοχή της Καστοριάς.

Ο δεύτερος τύπος είναι οι ιζηματογενείς (μεταφερμένοι) λατερίτες. Είναι λατερίτες που έχουν διαβρωθεί και το υλικό τους μεταφέρθηκε με τη βοήθεια της βαρύτητας ή του νερού και αποτέθηκε εκ νέου σε άλλη περιοχή. Οι λατερίτες αυτού του τύπου είναι πιο ομοιόμορφοι και επομένως εξορύσσονται πιο εύκολα. Ωστόσο, έχουν μικρότερη

περιεκτικότητα σε νικέλιο. Αυτού του τύπου είναι τα κοιτάσματα του Αγίου Ιωάννη και της Εύβοιας (Αποστολίκας, 2010).

Κατά την εξόρυξη του μεταλλεύματος χρησιμοποιούνται δύο τύποι εκμετάλλευσης:

Η υπόγεια εκμετάλλευση είναι περιορισμένης κλίμακας (2%) και γίνεται με τη μέθοδο της κατακρήμνισης της οροφής. Η προσπέλαση στο κοιτάσμα γίνεται με οριζόντιες στοές και ελικοειδείς ράμπες. Οι κύριες φάσεις της εξόρυξης είναι η διάτρηση, η γόμωση των διατρημάτων με εκρηκτικά και η πυροδότησή τους, η φόρτωση και αποκομιδή του παραγόμενου μεταλλεύματος και η υποστήριξη των στοών. Το παραγόμενο μέταλλευμα μεταφέρεται στην επιφάνεια μέσω ηλεκτρικού σιδηρόδρομου.

Η εφαρμοζόμενη επιφανειακή εκμετάλλευση, λόγω του ανάγλυφου, συνδυάζει ανοιχτή και κλειστή εκσκαφή. Το ύψος των βαθμίδων κυμαίνεται από 12 έως 15m, με το πλάτος να εξαρτάται από το αν είναι σε λειτουργία ή είναι κοντά στο όριο της εκσκαφής. Αρχικά το πλάτος τους είναι περίπου 25m, το οποίο όμως μειώνεται προοδευτικά περίπου στα 12m προς το όριο της τελικής εκσκαφής. Η αποκάλυψη του κοιτάσματος γίνεται με τη χρήση εκρηκτικών ενώ η απόληψη του μεταλλεύματος γίνεται με υδραυλικό εκσκαφέα ανεστραμμένου πτύου (τσάπα) ή προωθητή γαιών.

Το εξορυγμένο μέταλλευμα μεταφέρεται σε τριβεία για να υποστεί την κατάλληλη επεξεργασία σε σωρούς θραύσης και εμπλουτισμού. Το εμπλουτισμένο μέταλλευμα οδηγείται στον αποθέτη και από αυτόν στην πλατεία ομογενοποίησης. Το ομογενοποιημένο μέταλλευμα φορτώνεται και μεταφέρεται στο εργοστάσιο, όπου ζυγίζεται και τροφοδοτείται στις περιστροφικές καμίνους για περαιτέρω επεξεργασία.

1.3 Εκμετάλλευση σιδηρονικελιούχων κοιτασμάτων από τη ΛΑΡΚΟ

Η εκμετάλλευση σιδηρονικελιούχων κοιτασμάτων από την εταιρεία ΛΑΡΚΟ γίνεται στα Μεταλλεία Καστοριάς, Εύβοιας και Αγίου Ιωάννη Λάρυμνας όπου βρίσκονται τα αντίστοιχα ορυχεία. Η τυπική σύσταση του μεταλλουργικού μίγματος της εταιρείας είναι η παρακάτω:

- Μεταλλεύματα: 15% μέταλλευμα Καστοριάς (ΜΕΚ)
- Μεταλλεύματα: 55% μέταλλευμα Ευβοίας (ΜΕΕ)

- Μεταλλεύματα: 30% μετάλλευμα Αγ. Ιωάννη (MEI)

Η παραπάνω αναλογία των μεταλλευμάτων υπαγορεύεται κυρίως από τον όγκο των εκμεταλλεύσιμων αποθεμάτων, την περιεκτικότητα των κοιτασμάτων σε νικέλιο, την δυνατότητα και δυναμικότητα των εκμεταλλεύσεων και την εν γένει χημική και ορυκτολογική σύνθεση.

Η χημική σύσταση των μεταλλευμάτων, MEK, MEE και MEI δίνεται στο πίνακα 2.2. Οι τιμές προέκυψαν με βάση τα δεδομένα παραγωγής για το χρονικό διάστημα 2005-2015.

Πίνακας 2.2: Χημική σύσταση μεταλλευμάτων από τα μεταλλεία Αγίου Ιωάννη, Εύβοιας και Καστοριάς.

	Ni %	Fe _{total} %	SiO ₂ %	Υγρασία %	S %
MEI					
Μέση τιμή	0,97	33,39	21,16	6,00	0,09
Μέγιστη τιμή	1,50	51,10	37,90	15,04	1,60
Ελάχιστη τιμή	0,54	13,80	5,50	2,05	0,01
Τυπική απόκλιση	0,10	3,36	4,47	1,53	0,08
MEE					
Μέση τιμή	1,00	31,76	33,69	4,35	0,07
Μέγιστη τιμή	1,11	34,80	39,80	7,92	0,94
Ελάχιστη τιμή	0,80	27,20	23,50	1,90	0,03
Τυπική απόκλιση	0,04	1,42	1,47	0,88	0,08
MEK					
Μέση τιμή	1,25	16,69	35,29	11,15	0,05
Μέγιστη τιμή	1,60	35,50	50,50	19,15	0,90
Ελάχιστη τιμή	1,00	10,25	14,35	3,54	0,01
Τυπική απόκλιση	0,09	2,77	3,29	2,54	0,06

Η υψηλότερη περιεκτικότητα σε νικέλιο παρατηρείται στο μεταλλείο της Καστοριάς ενώ η χαμηλότερη στο μεταλλείο του Αγίου Ιωάννη. Επιπλέον, η μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε σίδηρο και η μικρότερη σε διοξείδιο του πυριτίου εμφανίζεται στο μεταλλείο Αγίου Ιωάννη, ενώ στο μεταλλείο της Καστοριάς εμφανίζονται τα αντίθετα αποτελέσματα.

1.3.1 Μεταλλεία Καστοριάς

Τα μεταλλεία Καστοριάς, βρίσκονται κοντά στα Αλβανικά σύνορα και ιδρύθηκαν τη δεκαετία του 1990. Τα μεταλλεία είναι επιφανειακά και λειτουργούν με εργολαβικά συνεργεία εξόρυξης και αποκάλυψης. Υπάρχουν τρεις περιοχές με αποθέματα στην Καστοριά, εκ των οποίων δύο μόνο εκμεταλλεύονται σε μόνιμη βάση. Εξαιτίας του υψομέτρου, το μεταλλείο στη θέση «Κούκος» μπορεί να λειτουργεί μόνο κατά τη διάρκεια του καλοκαιριού. Τα μεταλλεία Καστοριάς διαθέτουν εγκαταστάσεις θραύσης-κοσκίνησης και εμπλουτισμού του μεταλλεύματος, ενώ η ετήσια παραγωγή τους ανέρχεται περίπου σε 300 χιλιάδες τόνους μεταλλεύματος υψηλής περιεκτικότητας σε νικέλιο (30%) (larco.gr).

Όσον αφορά το νικελιούχο σιδηρομετάλλευμα της περιοχής Αγίου Αθανασίου Καστοριάς αναπτύσσεται υπό μορφή στρωμάτων επάνω σε οφιολίθους. Στο ανώτερο τμήμα των οφιολίθων απαντάται στρώμα πυριτικού μεταλλεύματος. Στη συνέχεια, αναπτύσσεται στρώμα σαπρολιθικού μεταλλεύματος, από όπου συλλέχθηκαν τρία παράλληλα διατεταγμένα δείγματα. Κατόπιν, απαντάται αργιλικό μετάλλευμα, που ακολουθείται από στρώμα σιδηρούχου μεταλλεύματος με οξείδια μαγγανίου. Τα παραπάνω διαδέχεται στρώμα σιδηρούχου λειμωνιτικού μεταλλεύματος, το οποίο καλύπτεται από το οφιολιθικό κροκαλοπαγές της οροφής. Τα κύρια ορυκτολογικά συστατικά του μεταλλεύματος είναι αιματίτης, γκαιτίτης, χαλαζίας και δευτερευόντως γαρνιερίτης (νικελιούχος αντιγορίτης), λιζαρδίτης, σαπωνίτης, βιλεμζεΐτης (νικελιούχος τάλκης) και σεπιόλιθος, ενώ σπανιότερα απαντώνται χρωμίτης, ασβεστίτης και νεπουίτης (νικελιούχος σερπεντίνης). Στο παρόν μετάλλευμα ο αιματίτης και ο γκαιτίτης παρατηρούνται κυρίως υπό μορφή φλεβιδίων, καθώς και μεμονωμένων κρυστάλλων μέσα σε ένα συνδετικό υλικό, το οποίο αποτελείται κυρίως από συμπαγείς μάζες χαλαζία, καθώς και γαρνιερίτη, λιζαρδίτη, σαπωνίτη, βιλεμζεΐτη, σεπιόλιθου και νεπουίτη. Επιπλέον, παρατηρήθηκαν μεμονωμένοι κλαστικοί κόκκοι χρωμιτών και φλεβίδια ασβεστίτη δευτερογενούς προέλευσης. Συχνά διακρίνεται μία σταδιακή μετάβαση του γκαιτίτη σε αιματίτη, λόγω αφυδάτωσης. Όσον αφορά στο νικέλιο, απαντάται κυρίως στα ορυκτά γαρνιερίτης, βιλεμζεΐτης και νεπουίτης, που εντοπίζονται,

όπως προαναφέρθηκε, μαζί με χαλαζία κυρίως στο συνδετικό υλικό του μεταλλεύματος (larco.gr).

2.3.2 Μεταλλεία Εύβοιας

Η ΛΑΡΚΟ διαθέτει πέντε μεταλλεία επιφανειακής εκμετάλλευσης στην περιοχή της Εύβοιας. Τα μεταλλεία διαθέτουν σύγχρονο χωματουργικό εξοπλισμό επιφανειακών εκμεταλλεύσεων, δύο εγκαταστάσεις θραύσης και κοσκίνησης των μεταλλευμάτων, μονάδα εμπλουτισμού και εγκαταστάσεις ομογενοποίησης και φόρτωσης πλοίων. Για την μεταφορά του μεταλλεύματος από το τριβείο στις εγκαταστάσεις εμπλουτισμού και ομογενοποίησης, υπάρχει ενιαίο σύστημα μεταφορικής ταινίας, μήκους 7,5 χιλιομέτρων, το οποίο αξιοποιεί την υψομετρική διαφορά για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Η ετήσια παραγωγή ανέρχεται σε 1,2-1,5 εκατομμύρια τόνους. Η μέση περιεκτικότητα σε νικέλιο είναι 1-1,03 % (larco.gr).

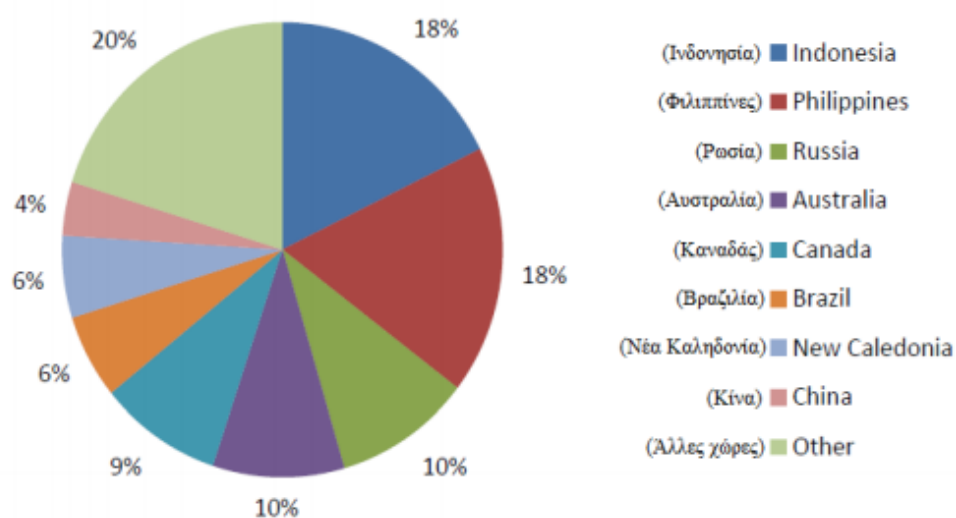
2.3.3 Μεταλλεία Αγίου Ιωάννη

Τα Μεταλλεία Αγίου Ιωάννη βρίσκονται στο Νέο Κόκκινο του Νομού Βοιωτίας, 7 χιλιόμετρα από το Μεταλλουργικό Εργοστάσιο της Λάρυμνας. Είναι τα παλαιότερα μεταλλεία της εταιρείας και λειτουργούν με μία υπόγεια και τρεις επιφανειακές εκμεταλλεύσεις. Μια τέταρτη επιφανειακή εκμετάλλευση δημιουργήθηκε ως επέκταση σε υπάρχουσες επιφανειακές εκμεταλλεύσεις. Το πρώτο υπόγειο μεταλλείο στην περιοχή άρχισε να λειτουργεί στις αρχές του προηγούμενου αιώνα. Τα μεταλλεία είναι εξοπλισμένα με σύγχρονο υπόγειο και επιφανειακό εξοπλισμό και πρόσθετες μονάδες διατηρητικών μηχανημάτων. Επιπλέον, υπάρχουν δύο εγκαταστάσεις θραύσης-κοσκίνησης καθώς και μονάδα εμπλουτισμού και μονάδα ομογενοποίησης του μεταλλεύματος. Η ετήσια παραγωγή μετά το μαγνητικό διαχωρισμό ανέρχεται σε 700 χιλιάδες τόνους μεταλλεύματος περιεκτικότητας σε νικέλιο, 1,05-1,1% (larco.gr).

Το κοίτασμα του Αγίου Ιωάννη Λάρυμνας, είναι ένα αλλόχθονο κοίτασμα και εμφανίζεται μεταξύ ασβεστόλιθων (Αλμπαντάκης 1974 & 1984). Στο κοίτασμα αυτό παρατηρείται εναλλαγή λεπτότατων στρωματιδίων μάργας και νικελιούχου σιδηρομεταλλεύματος πάχους 0,10-0,30 m. Στο βόρειο τμήμα του κοιτάσματος Αγίου Ιωάννη Λάρυμνας παρατηρείται επίσης εναλλαγή στιφρού σιδηρομεταλλεύματος και ψαμμίτη ή αργίλου. Το κοίτασμα εμφανίζεται σε μήκος περίπου 4 km.

2.4 Μεταλλουργική Βιομηχανία ΛΑΡΚΟ

Η «Γ.Μ.Μ.Α.Ε. ΛΑΡΚΟ» είναι η μεγαλύτερη παραγωγός σιδηρονικελίου στην Ευρώπη και ένας από τους πέντε μεγαλύτερους παραγωγούς παγκοσμίως. Η εταιρεία είναι πλήρως καθετοποιημένη και έχει αναπτύξει δραστηριότητες έρευνας, εξόρυξης λατερικών νικελιούχων καθώς και μεταλλουργικής επεξεργασίας για παραγωγή κράματος σιδηρονικελίου (30% Ni). Το σιδηρονικέλιο το εμπορεύεται σε όλο τον κόσμο. Η ετήσια παραγωγή νικελίου της εταιρείας αντιστοιχεί στο 2-3% της παραγωγής του δυτικού κόσμου (Σχήμα 2.2).



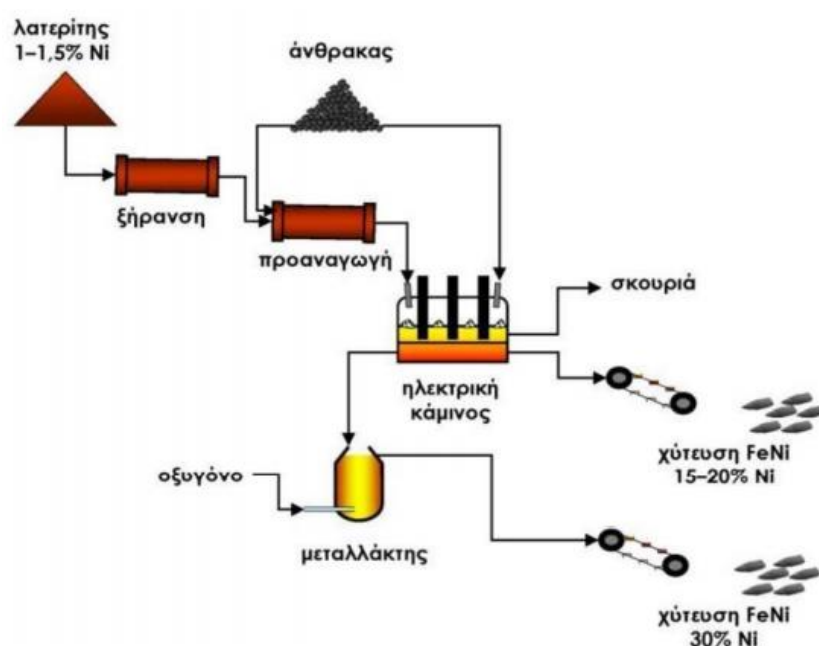
Σχήμα 2.2: Παραγωγή Νικελίου ανά χώρα για το έτος 2013 (USGS-Mineral Commodity Summaries, 2014)

2.5 Μεταλλουργικό εργοστάσιο Λάρυμνας – Παραγωγική Διαδικασία

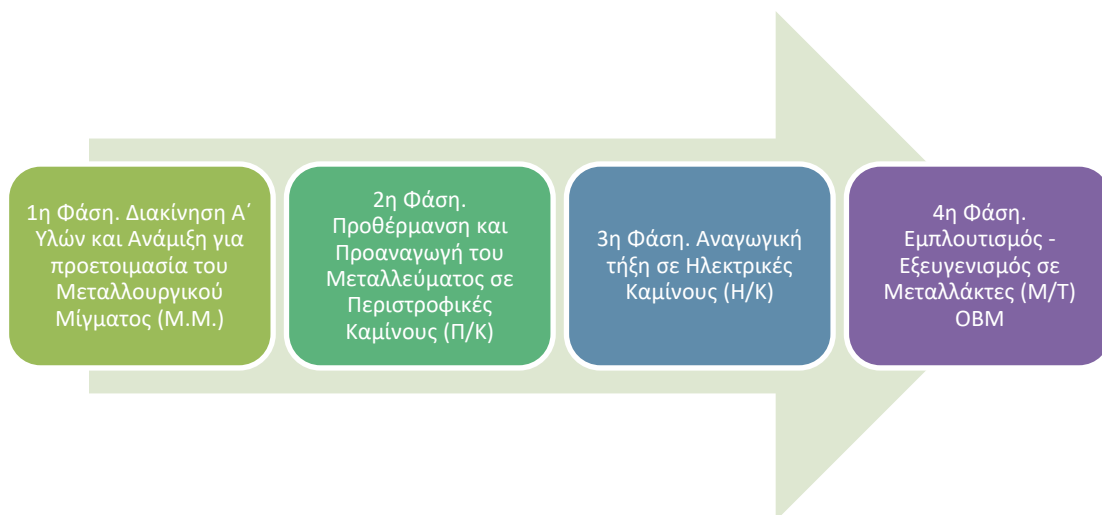
Οι μεταλλουργικές εγκαταστάσεις βρίσκονται στη Λάρυμνα στο Νομό Φθιώτιδας, 130 χιλιόμετρα περίπου, βορειοανατολικά της Αθήνας. Στο μεταλλουργικό εργοστάσιο γίνεται πυρομεταλλουργική επεξεργασία των ελληνικών σιδηρονικελιούχων μεταλλευμάτων (λατεριτών) με στόχο την παραγωγή σιδηρονικελίου (FeNi) περιεκτικότητας 30% σε νικέλιο που αποτελεί πρώτη ύλη για τις βιομηχανίες παραγωγής ανοξείδωτων χαλύβων στον ευρωπαϊκό χώρο. Η συνολική ετήσια ποσότητα

μεταλλεύματος που επεξεργάζεται το εργοστάσιο της Λάρυμνας ανέρχεται στους 2,5 εκατομμύρια τόνους περίπου. Η ετήσια παραγωγή σε νικέλιο (Ni) ανέρχεται σε 18- 20 χιλιάδες τόνους και καλύπτει το 6% περίπου της ζήτησης της ευρωπαϊκής αγοράς σε νικέλιο.

Η διαδικασία παραγωγής (σχηματικό διάγραμμα ροής) φαίνεται στην Σχήμα 2.3. Η παραγωγική διαδικασία περιλαμβάνει, όπως φαίνεται στην Σχήμα 2.4 τέσσερις φάσεις, που περιγράφονται αναλυτικότερα παρακάτω.



Σχήμα 2.3: Σχηματικό απλοποιημένο διάγραμμα ροής της παραγωγής σιδηρονικελίου από σιδηρονικελιούχα μεταλλεύματα στο εργοστάσιο της Λάρκο στη Λάρυμνα Φθιώτιδας. (larco.gr)



Σχήμα 2.4: Κύριες φάσεις επεξεργασίας μεταλλεύματος.

2.5.1 Διακίνηση πρώτων υλών και ανάμιξη για προετοιμασία του μεταλλουργικού μίγματος

Το λειοτριβημένο σε διαστάσεις -25mm μετάλλευμα και τα στερεά καύσιμα που απαιτούνται, δηλαδή ο γαιάνθρακας και οι λιγνίτες, παραλαμβάνονται είτε οδικώς είτε δια θαλάσσης και αποθηκεύονται στις πλατείες πρώτων υλών. Από εκεί διακινούνται μέσω ταινιοδρόμων εξοπλισμένων με δοσιμετρικούς ζυγούς προς τη δεύτερη φάση επεξεργασίας εντός των περιστροφικών καμίνων. Το μετάλλευμα προέρχεται από τα Μεταλλεία Καστοριάς, Αγίου Ιωάννη και Ευβοίας.

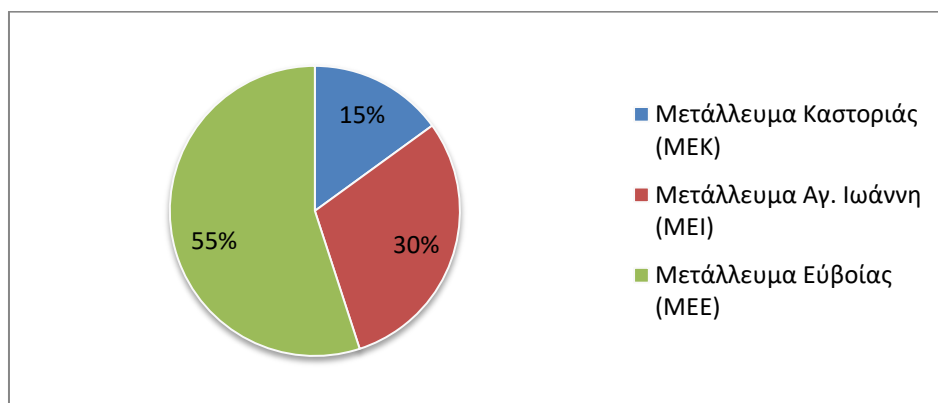
Ανάλογα με την προέλευση έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά, όπως δίνεται παρακάτω:

- Το μετάλλευμα της Εύβοιας έχει υψηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο και διοξείδιο του πυριτίου.
- Το μετάλλευμα της Καστοριάς έχει υψηλή περιεκτικότητα σε οξείδιο του πυριτίου και μικρή σε οξείδιο του σιδήρου.
- Το μετάλλευμα του Αγίου Ιωάννη έχει υψηλή περιεκτικότητα σε σίδηρο και μικρή σε οξείδιο του πυριτίου.

Η τυπική σύσταση του μεταλλουργικού μίγματος περιλαμβάνει μεταλλεύματα και από τα τρία παραπάνω ορυχεία καθώς και στερεά καύσιμα (γαιάνθρακας, PET, λιγνίτες σε αναλογία περίπου 200 - 230 kg/t φυσικού μεταλλεύματος). Η χρήση ποικιλίας στερεών καυσίμων αποσκοπεί στη καλύτερη αξιοποίηση των συστατικών τους (μόνιμος

άνθρακας και πτητικά) για την προθέρμανση και την προαναγωγή του μεταλλεύματος στις περιστροφικές καμίνους (Αποστολίκας, 2010).

Οι αναλογίες των μεταλλευμάτων από κάθε ορυχείο στο μεταλλουργικό μίγμα φαίνονται στο κυκλικό διάγραμμα του Σχήματος 2.5. Η αναλογία αυτή προέκυψε κυρίως από τον όγκο των εκμεταλλεύσιμων αποθεμάτων, την περιεκτικότητα των κοιτασμάτων σε νικέλιο, την δυνατότητα και δυναμικότητα των εκμεταλλεύσεων και την εν γένει χημική και ορυκτολογική τους σύνθεση (Αποστολίκας, 2010).



Σχήμα 2.5: Τυπική αναλογία μεταλλευμάτων στο μεταλλουργικό μείγμα (Αποστολίκας, 2010).

2.5.2 Προθέρμανση και Προαναγωγή του Μεταλλεύματος σε Περιστροφικές Καμίνους

Λειτουργούν τέσσερις περιστροφικές κάμινοι (Π/Κ). Οι τρεις από αυτές έχουν μήκος 90 περίπου μέτρα και διάμετρο 4,2 μέτρα οι δύο και 5,2 μέτρα. Η τέταρτη έχει μήκος 126 μέτρα και διάμετρο 6,1 μέτρα και είναι μια από τις μεγαλύτερες στην Ευρώπη.

Οι περιστροφικές κάμινοι μπορούν να παράγουν προϊόν φρύγματος (ΠΕΚ) 300 τόνους ανά ώρα, το οποίο ισοδυναμεί περίπου με 2,5 εκατομμύρια τόνους ανά έτος. Οι θερμοκρασίες που διατηρούνται είναι της τάξης των 400°C στην είσοδο του μίγματος και 750-800°C στην έξοδο.

Εντός Π/Κ κατά τη διέλευση του μεταλλουργικού μίγματος, σε αντιρροή με τον αέρα - αέρια καύσης λαμβάνουν χώρα αναγωγικές αντιδράσεις και επιτυγχάνεται η ξήρανση και προαναγωγή των οξειδίων του νικελίου και του σιδήρου (Iarco.gr).

2.5.3 Αναγωγική τήξη σε Ηλεκτρικές Καμίνους

Το προϊόν των περιστροφικών καμίνων, ΠΕΚ, τροφοδοτείται εντός πέντε ηλεκτροκαμίνων εμβαπτισμένου τόξου. Το ύψος του σώματος και των πέντε ηλεκτροκαμίνων είναι 6 μέτρα, και η διάμετρος τεσσάρων Η/Κ είναι 12 μέτρα, ενώ της πέμπτης είναι 18 μέτρα.

Η θερμοκρασία που αναπτύσσεται, με τη βοήθεια της ηλεκτρικής ενέργειας, για την τήξη και τον διαχωρισμό των συστατικών του ΠΕΚ είναι της τάξης των 1600 °C. Ταυτόχρονα με την τήξη πραγματοποιείται και η αναγωγή των οξειδίων του σιδήρου και του νικελίου προς μεταλλικό νικέλιο και σίδηρο. Έτσι διαμορφώνονται δύο φάσεις, μια μεταλλική, γνωστή ως σιδηρονικέλιο ή FeNi, όπου συγκεντρώνεται το νικέλιο και μέρος του σιδήρου και μια φάση σκουριάς με κύρια συστατικά οξείδια του σιδήρου, ασβεστίου και πυριτίου.

Οι φάσεις του μετάλλου και της σκουριάς απομακρύνονται συστηματικά από τις κατάλληλες οπές που ευρίσκονται στο σώμα των Η/Κ και απέχουν μεταξύ των 90 - 135 μοίρες κατά περιφέρεια και 50 - 70 εκατοστά καθ' ύψος.

Η παραγόμενη ως παραπροϊόν σκουριά ηλεκτροκαμίνων αποτελεί το 85% περίπου της τροφοδοσίας και προκύπτει από αναγωγικές διεργασίες, όπως ήδη προαναφέρθηκε, κατά την έξοδό της από τις Η/Κ κοκκοποιείται με ισχυρό ρεύμα θαλασσινού νερού και απορρίπτεται ή πωλείται στις τσιμεντοβιομηχανίες και τις μονάδες παραγωγής αμμοβολής. Υπάρχουν σημαντικές ποσότητες για διάθεση στην αγορά και για το σκοπό αυτό καταβάλλονται διαρκείς προσπάθειες.

Η φάση του σιδηρονικελίου που είναι το προϊόν των Η/Κ παραλαμβάνεται με την περιοδική διάνοιξη της οπής απομετάλλωσης με χρήση σωλήνων οξυγόνου και προωθείται με κατάλληλους κάδους των 50 τόνων στην επόμενη φάση της τελικής επεξεργασίας (Αλεβίζος, 1997).

2.5.4 Εμπλουτισμός - Εξευγενισμός σε Μεταλλάκτες

Το προϊόν των Η/Κ (FeNi) με κατάλληλους κάδους χωρητικότητας 50 τόνων και γερανογέφυρα ανυψωτικής ικανότητας 100 τόνων τροφοδοτείται σε μεταλλάκτες τύπου OBM, όπου με εμφύσηση οξυγόνου και προπανίου από τον πυθμένα οξειδώνεται μία

ποσότητα σιδήρου και επιτυγχάνεται έτσι ο εμπλουτισμός του σιδηρονικελίου στην επιθυμητή τελική περιεκτικότητα σε Ni (συνήθως 30% Ni).

Για τον σκοπό αυτό διατίθενται δύο μεταλλάκτες των 50 τόνων ο καθένας. Ταυτόχρονα με τον εμπλουτισμό σε Ni επιτυγχάνεται και ο εξευγενισμός του προϊόντος, με την προσθήκη κατάλληλων συλλιπασμάτων. Έτσι περιορίζονται οι περιεκτικότητες θείου και φωσφόρου στα εμπορικά επιτρεπτά επίπεδα. Κατά την επεξεργασία οι θερμοκρασίες είναι της τάξης των 1600 - 1700°C. Με την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας το τελικό τήγμα κοκκοποιείται σε διαστάσεις +3 έως 40 mm και αποτελεί το εμπορεύσιμο τελικό προϊόν. Αυτό συγκεντρώνεται σε σωρούς ανάλογα με την περιεκτικότητα σε Ni και από το λιμάνι της Λάρυμνας προωθείται στην αγορά. Η παραγόμενη κατά τον εμπλουτισμό σκουριά αποτελεί παραπροϊόν, που αποθηκεύεται προσωρινά και αφού λειοτριβηθεί σε διαστάσεις -5mm πωλείται στο σύνολο, σαν βαρύ και αδρανές υλικό για την παραγωγή ειδικού τύπου μπετόν για επικάλυψη αγωγών πετρελαίου ή άλλων παρόμοιων έργων στην Ευρώπη, την Βόρειο Αφρική και τη Μέση Ανατολή (larco.gr).

3 ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΕΛΕΓΧΟΥ SHEWART

3.1 Διάγραμμα ελέγχου-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 συνήθεις ή τυχαίες αιτίες μεταβλητότητας (common or chance causes of variation). Η φυσική μεταβλητότητα είναι συνήθως μικρή σε μέγεθος και δεν μπορεί να αποδοθεί σε ελέγξιμους παράγοντες. Μια διεργασία (σύστημα) η οποία λειτουργεί μόνο με την παρουσία φυσικής μεταβλητότητας λέμε ότι είναι εντός (στατιστικού) ελέγχου διεργασία (in statistical control process), ή ότι λειτουργεί σε ευσταθή κατάσταση (stable state).

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

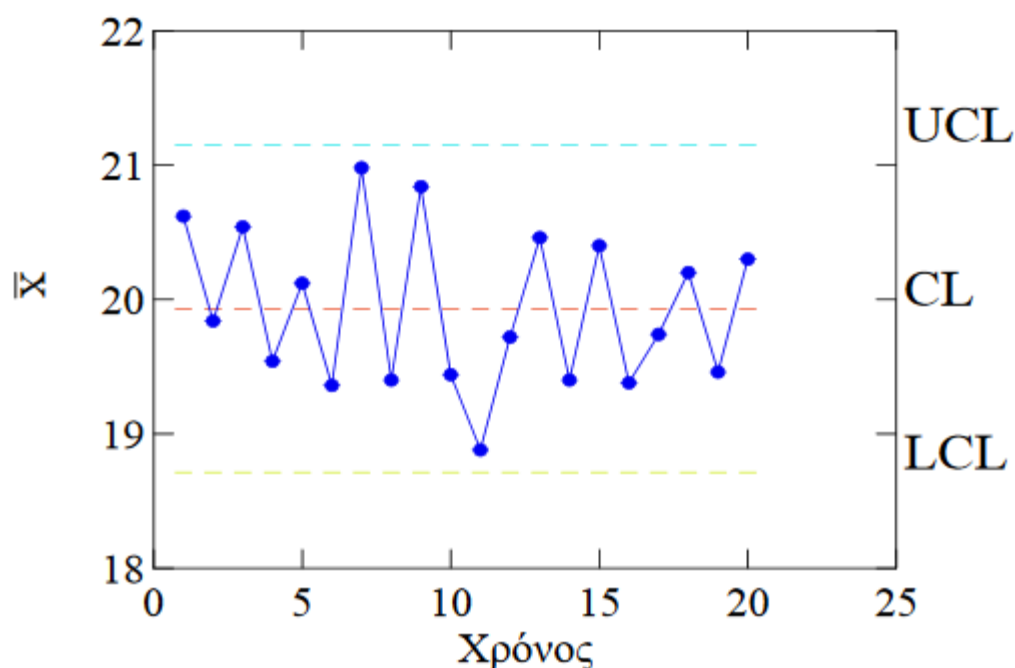
Το κύριο αντικείμενο του στατιστικού ελέγχου διεργασιών είναι η έγκαιρη ανίχνευση της εμφάνισης ειδικών αιτιών μεταβλητότητας σε μια διεργασία έτσι ώστε να προχωρήσουμε σε έρευνα και να προβούμε στις απαραίτητες διορθωτικές ενέργειες προτού κατασκευαστούν αρκετά προϊόντα μη συμμορφούμενα με τις προδιαγραφές.

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 (Αντζουλάκος, 2008).

Κύριο στατιστικό εργαλείο εφαρμογής του στατιστικού ελέγχου παραγωγικής διαδικασίας είναι τα διαγράμματα ελέγχου, τα οποία είναι η περισσότερο διαδεδομένη τεχνική του στατιστικού ελέγχου ποιότητας. Βασικός σκοπός των διαγραμμάτων αυτών είναι ο εντοπισμός συστηματικών μεταβολών των παραμέτρων της παραγωγικής διαδικασίας, που έχουν ως αποτέλεσμα παρεκκλίσεις των χαρακτηριστικών ποιότητας από τις επιθυμητές τιμές τους. Στη βιβλιογραφία αναφέρονται και ως διαγράμματα Shewhart προς τιμήν του Walter A. Shewhart, που πρώτος τα ανέπτυξε και τα εφάρμοσε στα εργαστήρια της Bell Telephone το 1931.

Τα διαγράμματα ελέγχου είναι γραφική παράσταση της μεταβολής μιας στατιστικής εκτιμήτριας θέσης ή διασποράς ή ποσοστού, όπως π.χ. μέση τιμή, εύρος, τυπική απόκλιση, κ.ά., σε συνάρτηση με το χρόνο. Η εκτιμήτρια αυτή, που αφορά καθορισμένη παράμετρο της κατανομής του χαρακτηριστικού ποιότητας, υπολογίζεται από τα τυχαία δείγματα που λαμβάνονται κατά διαστήματα από την παραγωγική διαδικασία. Αν η μετρούμενη παράμετρος ποιότητας είναι χαρακτηριστικό διαλογής (όπως αποδεκτό-μη αποδεκτό, ελαττωματικό-μη ελαττωματικό) η εκτιμήτρια αφορά το ποσοστό των ελαττωματικών ή τον αριθμό των ελαττωμάτων, ενώ αν η μετρούμενη παράμετρος ποιότητας είναι μετρήσιμο μέγεθος (μεταβλητή), όπως βάρος, μήκος, περιεκτικότητα κλπ., η εκτιμήτρια αφορά τη θέση ή/και τη διασπορά της κατανομής (Γαλετάκης, 2019).

Το διάγραμμα ελέγχου είναι ένα διάγραμμα με ανώτερο (Upper Control Limit ή UCL) και κατώτερο (Lower Control Limit ή LCL) όριο ελέγχου, επάνω στο οποίο αναπαριστώνται γραφικά οι τιμές ενός στατιστικού μεγέθους για κάποιο δείγμα. Οι τιμές απεικονίζονται είτε με χρονική σειρά είτε με βάση τον αύξοντα αριθμό του δείγματος. Στο διάγραμμα συνήθως υπάρχει και μία κεντρική γραμμή (Central Line ή CL) η οποία βοηθά στην αναγνώριση κάποιας πιθανής τάσης των αποτυπωμένων τιμών προς κάποιο από τα όρια ελέγχου. Τα όρια ελέγχου επάνω στο διάγραμμα μπορεί να προκύπτουν από το ίδιο το μετρούμενο δείγμα είτε από κάποιες προκαθορισμένες τιμές. Όσον αφορά στην σημειογραφία που θα ακολουθηθεί στην συνέχεια, αυτή είναι η προτυποποιημένη στατιστική σημειογραφία (Koutri & MacGregor, 1994). Έτσι η μετρούμενη τιμή ενός ποιοτικού χαρακτηριστικού θα συμβολίζεται με x , οι διάφορες στατιστικές παράμετροι του δείγματος θα αναγράφονται με λατινικά σύμβολα, ενώ οι διάφορες στατιστικές παράμετροι του πληθυσμού θα αναγράφονται με ελληνικούς χαρακτήρες (Τσέλιος, 2012).



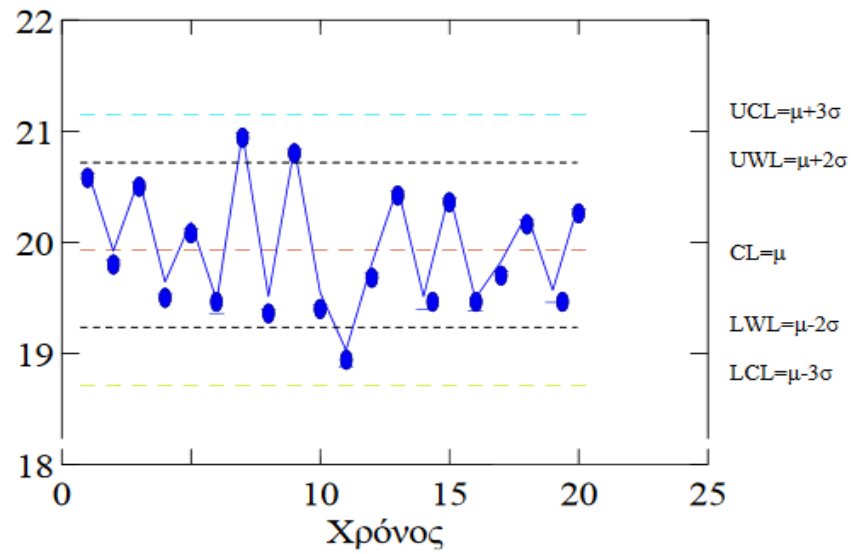
Σχήμα 3.1: Τυπικό διάγραμμα ελέγχου για τη μέση τιμή του δείγματος με τα όρια ελέγχου και την κεντρική γραμμή (Γαλετάκης, 2019).

Τα διαγράμματα ελέγχου στον στατιστικό έλεγχο ποιότητας διακρίνονται σε απλά διαγράμματα παρακολούθησης μεμονωμένων παραμέτρων ποιότητας (διαγράμματα Shewhart) και σε διαγράμματα ταυτόχρονης παρακολούθησης πολλαπλών παραμέτρων

ποιότητας (διαγράμματα Hotelling). Στα απλά διαγράμματα ελέγχου Shewhart ο στατιστικός έλεγχος της διακύμανσης των τιμών των χαρακτηριστικών ποιότητας x που χαρακτηρίζει την παραγωγική διαδικασία, γίνεται είτε με διαγράμματα ελέγχου εύρους δείγματος (R), είτε με διαγράμματα ελέγχου τυπικής απόκλισης δείγματος (S), σε συνδυασμό πάντα με διάγραμμα ελέγχου μέσης τιμής (\bar{x}). Τα διαγράμματα αυτά είναι γνωστά ως διαγράμματα \bar{x} -R και \bar{x} -S αντίστοιχα (Αντζουλάκος, 2008). Διαγράμματα \bar{x} -R χρησιμοποιούνται όταν υπάρχει μικρό μέγεθος δείγματος, ενώ τα \bar{x} -S όταν έχουμε μεγάλο. Στη περίπτωση που το μέγεθος του δείγματος είναι μονάδα (αποτελείται από μια μέτρηση) τότε χρησιμοποιούνται τα διαγράμματα κινητού μέσου \bar{x} -R όπου η εκτίμηση για το \bar{x} και το R βασίζεται στη χρήση κινητού μέσου. Συνήθως περίπτωση είναι η χρήση κινητού μέσου μεγέθους 2, οπότε το \bar{x} και το R υπολογίζονται από την τρέχουσα και την προηγούμενη τιμή.

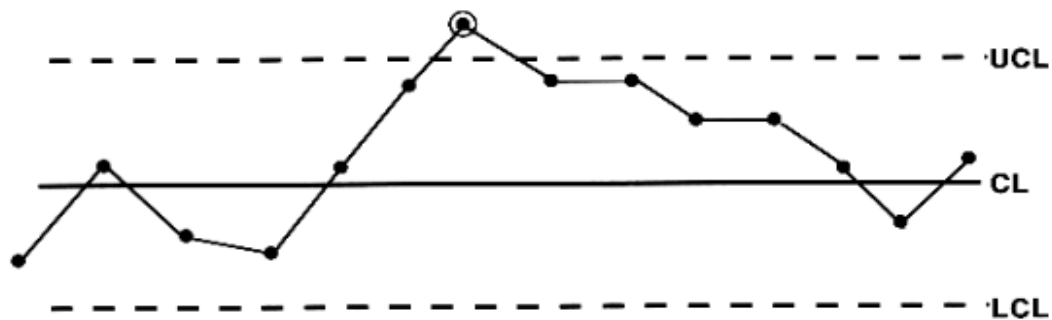
Τα όρια στατιστικού ελέγχου (LCL, UCL) στα διαγράμματα Shewhart βρίσκονται σε απόσταση 3σ σε κάθε πλευρά της κεντρικής γραμμής (CL), όπου σ είναι η τυπική απόκλιση του μετρούμενου ποιοτικού χαρακτηριστικού. Τα όρια $\pm 3\sigma$ δείχνουν ότι το 99,7% των τιμών θα συμπεριληφθούν στα όρια ελέγχου υπό τον όρο ότι η διαδικασία βρίσκεται σε στατιστικό έλεγχο και η μετρούμενη παράμετρος ακολουθεί την κανονική κατανομή (Xiang et al., 2016).

Όσο στενότερα είναι τα όρια (πιο κοντά στην κεντρική γραμμή), τόσο πιο ευαίσθητο είναι το διάγραμμα, καθώς μεγαλύτερο ποσοστό των σημείων βρίσκεται εκτός των ορίων. Τα όρια αυτά απέχουν συνήθως ± 3 τυπικές αποκλίσεις από την κεντρική γραμμή. Εκτός από τα όρια ελέγχου, σε ορισμένα διαγράμματα σχεδιάζονται επιπλέον δύο ακόμα οριζόντιες γραμμές, μεταξύ των ορίων ελέγχου και της κεντρικής γραμμής, οι οποίες ονομάζονται προειδοποιητικά όρια (Warning Limits). Τα προειδοποιητικά όρια, ανώτερο (UWL) και κατώτερο (LWL), απέχουν συνήθως ± 2 τυπικές αποκλίσεις από την κεντρική γραμμή (Bissel, 1994).

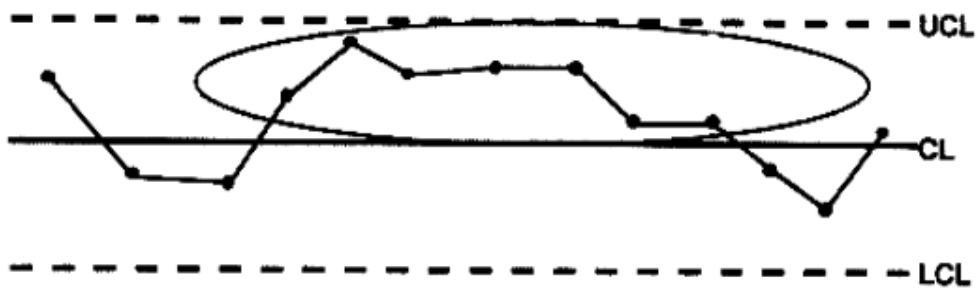


Σχήμα 3.2: Διάγραμμα ελέγχου με προειδοποιητικά όρια (Γαλετάκης,2019).

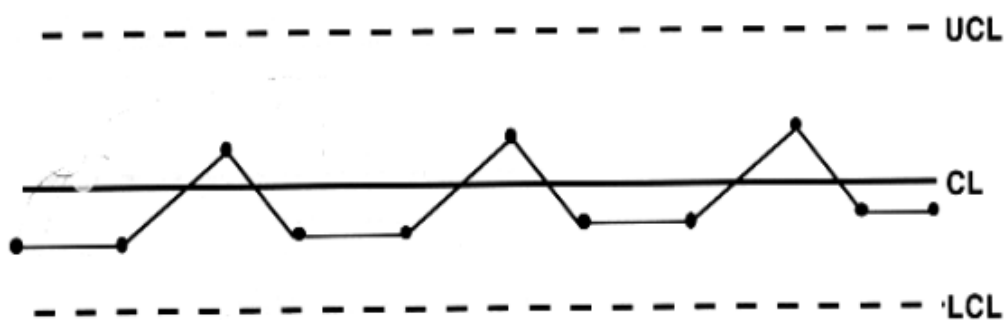
Οι κυριότερες μορφές που εμφανίζονται σε διαγράμματα ελέγχου και δείχνουν ότι η διαδικασία είναι εκτός στατιστικού ελέγχου, δίνονται στα σχήματα 3.3 έως 3.9 (Γαλετάκης, 2019):



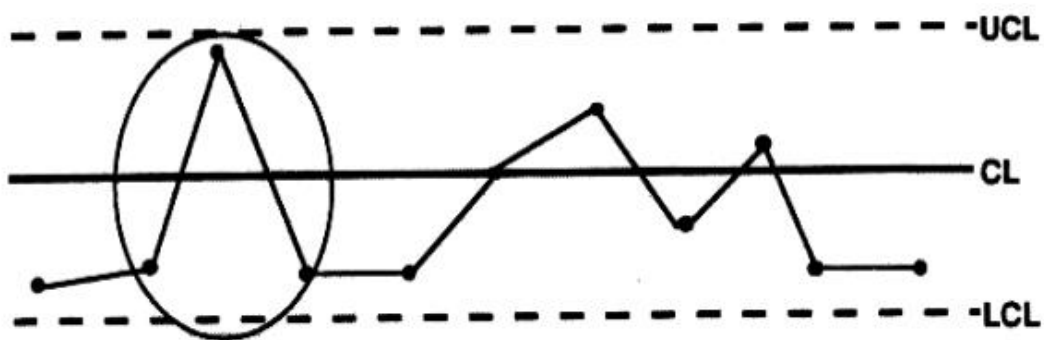
Σχήμα 3.3: Διαδικασία εκτός στατιστικού ελέγχου. Ένα σημείο βρίσκεται πάνω από το ανώτερο όριο ελέγχου.



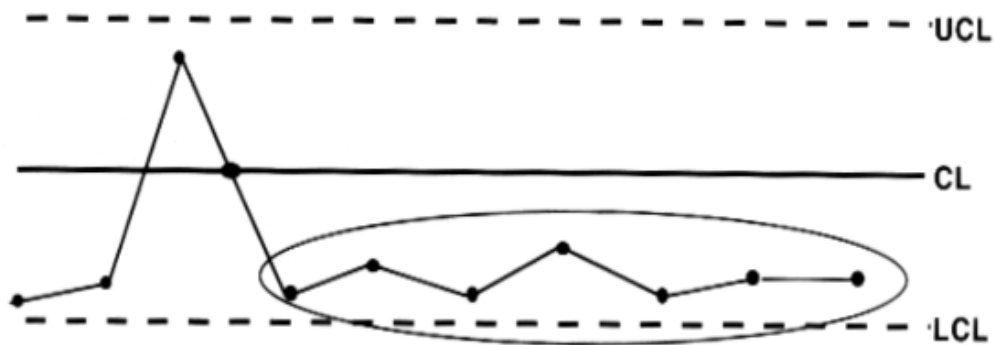
Σχήμα 3.4: Διαδικασία εκτός στατιστικού ελέγχου. Επτά συνεχόμενα σημεία βρίσκονται πάνω από την κεντρική γραμμή.



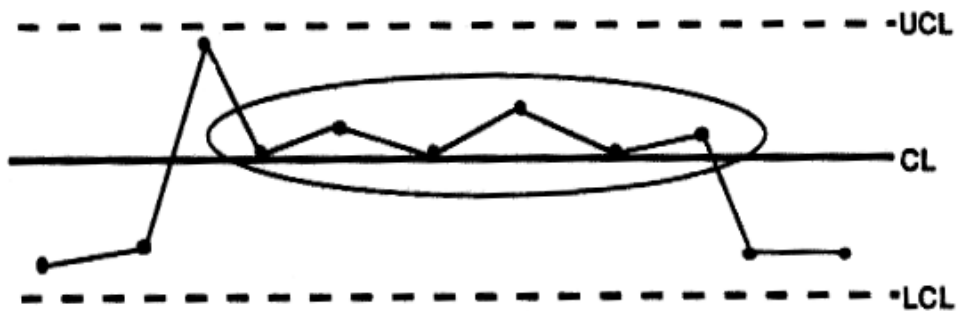
Σχήμα 3.5: Διαδικασία εκτός στατιστικού ελέγχου. Ύπαρξη περιοδικότητας.



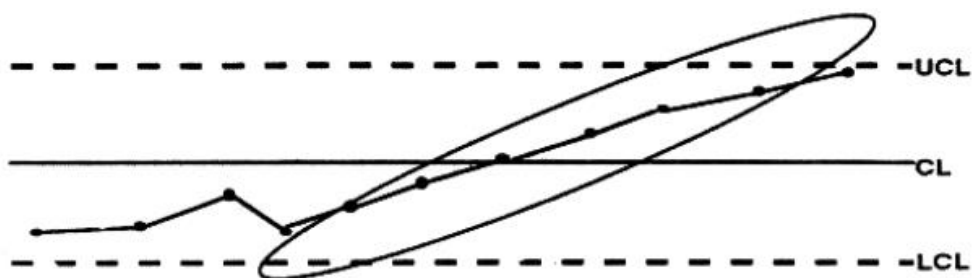
Σχήμα 3.6: Διαδικασία εκτός στατιστικού ελέγχου. Ύπαρξη αλμάτων.



Σχήμα 3.7: Διαδικασία εκτός στατιστικού ελέγχου. Επτά συνεχόμενα σημεία βρίσκονται κάτω από την κεντρική γραμμή.



Σχήμα 3.8: Διαδικασία εκτός στατιστικού ελέγχου. Συνεχόμενα σημεία βρίσκονται επί της κεντρικής γραμμής.



Σχήμα 3.9: Διαδικασία εκτός στατιστικού ελέγχου. Ύπαρξη τάσης.

3.2 Κατασκευή διαγράμματος ελέγχου μέσης τιμής – εύρους ($\bar{x} - R$)

Για την κατασκευή ενός διαγράμματος $\bar{x}-R$ λαμβάνονται k δείγματα μεγέθους n το καθένα κατά την παραγωγική διαδικασία. Συνηθισμένες ελάχιστες τιμές των k και n είναι αντίστοιχα 20 και 5, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται ότι η ενυπάρχουσα μεταβλητότητα στην παραγωγή απεικονίζεται ικανοποιητικά από τα δείγματα. Για κάθε δείγμα j υπολογίζεται ο μέσος όρος \bar{x}_j και το εύρος R από τις σχέσεις:

$$\bar{x}_j = \sum_{i=1}^n \frac{x_{i,j}}{n} \quad (3.1)$$

$$\begin{aligned} R_j &= x_{i,j \max} - x_{i,j \min} \\ i &= 1, 2, \dots, n \\ j &= 1, 2, \dots, k \end{aligned} \quad (3.2)$$

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

$$\bar{\bar{x}} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^n \bar{x}_j \quad (3.3)$$

$$\bar{R} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k R_j \quad (3.4)$$

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):

Διάγραμμα \bar{x}

$$UCL_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R} \quad (3.5)$$

$$LCL_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{R} \quad (3.6)$$

Διάγραμμα R

$$UCL_R = D_4 \bar{R} \quad (3.7)$$

$$LCL_R = D_3 \bar{R} \quad (3.8)$$

Η τυπική απόκλιση $\hat{\sigma}$ μπορεί να εκτιμηθεί από τη σχέση:

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (3.9)$$

Οι συντελεστές A_2 , D_3 και D_4 , είναι συνάρτηση του μεγέθους n του δείγματος και δίνονται από τον πίνακα 3.1.

Πίνακας 3.1: Τιμές των συντελεστών A_2, D_3 και D_4 συναρτήσει του μεγέθους n του δείγματος για τα διαγράμματα \bar{x} -R (Ταγαράς, 2001).

n	A_2	D_3	D_4	d_2
2	1,880	0	3,267	1,128
3	1,023	0	2,574	1,693
4	0,729	0	2,282	2,059
5	0,577	0	2,114	2,326
6	0,483	0	2,004	2,534
7	0,419	0,076	1,924	2,704
8	0,373	0,136	1,864	2,847
9	0,337	0,184	1,816	2,970
10	0,308	0,223	1,777	3,078
11	0,285	0,256	1,744	3,173
12	0,266	0,283	1,717	3,258
13	0,249	0,307	1,693	3,336
14	0,235	0,328	1,672	3,407
15	0,223	0,347	1,653	3,472
16	0,212	0,363	1,637	3,532
17	0,203	0,378	1,622	3,588
18	0,194	0,391	1,608	3,640
19	0,187	0,403	1,597	3,689
20	0,180	0,415	1,585	3,735
21	0,173	0,425	1,575	3,778
22	0,167	0,434	1,566	3,819
23	0,162	0,443	1,557	3,858
24	0,157	0,451	1,548	3,895
25	0,153	0,459	1,541	3,931

3.3 Διάγραμμα ελέγχου για μεμονωμένες τιμές

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

- Η διαδικασία χαρακτηρίζεται από τη 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 x_i και m προηγούμενες και ο μέσος \bar{x} υπολογίζεται ως ο κινητός μέσος εύρους m και το R ή το S , από τα m δείγματα σύμφωνα με τους παρακάτω τύπους (Bissel, 1994):

$$\bar{x}_i = \frac{x_{i-m+1} + x_{i-m+2} + \dots + x_{i-1} + x_i}{m} \quad (3.10)$$

$$R_i = x_{\max} - x_{\min} \quad (3.11)$$

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

$$\bar{x}_i = \frac{x_{i-1} + x_i}{2} \quad (3.12)$$

$$R_i = |x_i - x_{i-1}| \quad (3.13)$$

Τα άνω και κάτω όρια για το \bar{x} και το R υπολογίζονται όπως στα συνήθη διαγράμματα, ενώ οι συντελεστές επιλέγονται στο μέγεθος δείγματος που αντιστοιχεί στο πλάτος του κινητού μέσου που έχει χρησιμοποιηθεί.

3.4 Διάγραμμα ελέγχου μέσης τιμής – τυπικής απόκλισης (\bar{x} -S)

Η μόνη διαφορά στη λειτουργία του διαγράμματος ελέγχου τυπικής απόκλισης σε σχέση με το διάγραμμα R, έγκειται στη χρησιμοποιούμενη στατιστική δείγματος, η οποία στο διάγραμμα S είναι η τυπική απόκλιση δείγματος. Το διάγραμμα $\bar{x} - S$ χρησιμοποιείται για μεγάλα σχετικά μεγέθη δείγματος $n > 12$ και κατασκευάζεται όπως το διάγραμμα $\bar{x} - R$ (Ταγαράς, 2001). Η τυπική απόκλιση S κάθε δείγματος και η μέση τυπική απόκλιση \bar{S} υπολογίζονται από τις παρακάτω σχέσεις:

$$S_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_j - x_{i,j})^2}{n - 1}}$$
(3.14)

όπου $i = 1, 2, \dots, n$

$$\bar{S} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k S_j$$
(3.15)

όπου $j = 1, 2, \dots, k$

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

• Διάγραμμα \bar{x} :

$$UCL_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} + A_3 \bar{S}$$
(3.16)

$$LCL_{\bar{x}} = \bar{\bar{x}} - A_3 \bar{S}$$
(3.17)

• Διάγραμμα S :

$$UCL_S = B_4 \bar{S}$$
(3.18)

$$LCL_S = B_3 \bar{S}$$
(3.19)

• Τυπική απόκλιση

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{S}}{c_4} \quad (3.20)$$

Οι συντελεστές A_3 , B_3 και B_4 είναι συνάρτηση του μεγέθους n του δείγματος και δίνονται από τον παρακάτω πίνακα 3.2 (Ταγαράς, 2001).

Πίνακας 3.2: Τιμές των συντελεστών A_3 , B_3 και B_4 συναρτήσει του μεγέθους n του δείγματος για τα διαγράμματα \bar{x} -S (Ταγαράς, 2001).

n	A₃	B₃	B₄	C₄
2	2,659	0	3,267	0,7979
3	1,954	0	2,568	0,8862
4	1,628	0	2,266	0,9213
5	1,427	0	2,089	0,9400
6	1,287	0,030	1,970	0,9515
7	1,182	0,118	1,882	0,9594
8	1,099	0,185	1,815	0,9650
9	1,032	0,239	1,761	0,9693
10	0,975	0,284	1,716	0,9727
11	0,927	0,321	1,679	0,9754
12	0,886	0,354	1,646	0,9776
13	0,850	0,382	1,618	0,9794
14	0,817	0,406	1,594	0,9810
15	0,789	0,428	1,572	0,9823
16	0,763	0,466	1,552	0,9835
17	0,739	0,482	1,534	0,9845
18	0,718	0,49	1,518	0,9854
19	0,698	0,510	1,503	0,9862
20	0,680	0,523	1,490	0,9869
21	0,663	0,534	1,477	0,9876
22	0,647	0,545	1,466	0,9882
23	0,633	0,555	1,455	0,9887
24	0,619	0,565	1,445	0,9892
25	0,606	0,565	1,435	0,9896

3.5 Διαγράμματα πολλαπλών χαρακτηριστικών

Στα διαγράμματα Shewhart ελέγχεται μια μεταβλητή ποιότητας \bar{x} κάθε φορά. Για p ποιοτικά χαρακτηριστικά που το καθένα εμφανίζει πιθανότητα $1-\alpha$ (α είναι η στάθμη σημαντικότητας), να λάβει τιμές εντός των ορίων $\mu \pm 3\sigma$ (διαδικασία ελεγχόμενη), η

πιθανότητα να είναι όλα τα ποιοτικά χαρακτηριστικά ταυτόχρονα εντός της περιοχής $\mu \pm 3\sigma$ είναι:

$$P(\mu - 3\sigma \leq \bar{x} \leq \mu + 3\sigma) = (1 - \alpha)^p \quad (3.21)$$

Όπως φαίνεται από την παραπάνω σχέση, η πιθανότητα αυτή ελαττώνεται σημαντικά με την αύξηση του p . Αν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά δεν είναι στατιστικά ανεξάρτητα, τότε η παραπάνω σχέση δεν ισχύει, αλλά δεν υπάρχει εύκολος τρόπος να διορθωθεί η επίδραση της συσχέτισης στον υπολογισμό. Για τη λύση παρόμοιων προβλημάτων ελέγχου της ποιότητας προτάθηκε από τον Hotelling, 1947, και καθιερώθηκε η χρήση του στατιστικού μεγέθους T^2 Hotelling. Ο έλεγχος μιας μόνο παραμέτρου, αντί για πολλών, παρουσιάζει 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. Οι υπολογιστικές δυσκολίες που υπήρχαν στο παρελθόν λόγω της πολυπλοκότητας των σχέσεων υπολογισμού του T^2 , δεν υφίστανται πλέον με την καθιέρωση των υπολογιστών και την ανάπτυξη κατάλληλου λογισμικού. Η δυσκολία που υπάρχει είναι να ερμηνευθεί η εκτός στατιστικού ελέγχου κατάσταση που έχει εντοπιστεί 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 (Ταγαράς, 2001).

Σχέσεις υπολογισμού του T^2 (Ταγαράς, 2001).

Συμβολισμοί:

μ = Μέση τιμή

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{X} = Τελική μέση τιμή ποιότητας όλων των δειγμάτων

m = Αριθμός των δειγμάτων

$F = H$ τιμή της κατανομής

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

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{x}_p \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Σύμφωνα με τον Hotelling, ο δείκτης ελέγχου ποιότητας T^2 ορίζεται όπως παρακάτω (Montgomery, 1997):

$$T^2 = n(\bar{x} - \bar{\bar{x}})S^{-1}(\bar{x} - \bar{\bar{x}}) \quad (3.23)$$

όπου:

$\bar{\bar{x}} = [\bar{\bar{x}}_1 + \bar{\bar{x}}_2 + \dots + \bar{\bar{x}}_p]$ είναι ο πίνακας των τελικών μέσων τιμών των δειγμάτων για τα ποιοτικά x_1, x_2, \dots, 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):

$$UCL = \left(\frac{mnp - mp - np + 1}{mn - m - p + 1} \right) F_{\alpha, p, (mn - m + p + 1)} \text{ για } n = p \quad (3.24)$$

όπου $F_{\alpha, p, (mn - m + p + 1)}$ 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 $\bar{\bar{x}}$ 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:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n x_{ijk} \quad (3.25)$$

$$s_{ij}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{ijk} - \bar{x}_{ij})^2 \quad (3.26)$$

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

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

$$s_{ihj} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (x_{ijk} - \bar{x}_{ij})(x_{hjk} - \bar{x}_{hj}) \quad (3.27)$$

όπου: $j=1,2,3 \dots m$ και $h \neq i$

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

$$\bar{x}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \bar{x}_{ij} \quad (3.28)$$

$$s_i^2 = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m S_{ij}^2 \quad (3.29)$$

$$s_{ih} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m S_{ihj} \quad (3.30)$$

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

$$S = \begin{bmatrix} S_1^2 & S_{12} & S_{13} & S_{1P} \\ & S_2^2 & S_{23} & S_{2P} \\ & & & \\ & & & S_P^2 \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

3.6 Εφαρμογές των διαγραμμάτων ελέγχου στην μεταλλευτική βιομηχανία – Βιβλιογραφική ανασκόπηση

Ο Ipek (1999) για τον έλεγχο ποιότητας της παραγωγής ενός εργοστασίου το οποίο τροφοδοτούνταν με μεταλλεύματα βορίου από δύο ορυχεία έκανε χρήση διαγραμμάτων ελέγχου Shewhart. Τα κύρια ορυκτά βορίου των μεταλλευμάτων ήταν ο κολεμανίτης και ο ουλεχίτης, ενώ το ποιοτικό χαρακτηριστικό που μετρήθηκε ήταν η περιεκτικότητα (%) του μεταλλεύματος σε οξείδιο του βορίου (B_2O_3). Χρησιμοποιώντας τα διαγράμματα ελέγχου για τη μέση τιμή και το εύρος (\bar{x} -R) διαπίστωσε ότι υπήρχαν μεγάλες διακυμάνσεις που ξεπερνούν τα αναμενόμενα όρια και πρότειναν ως βασικό μέτρο για τη μείωση της μεταβλητότητας την αποτελεσματικότερη ανάμιξη/ομογενοποίηση των μεταλλευμάτων.

Ο Γαλετάκης (2001) για τον έλεγχο ποιότητας της παραγωγής του λιγνίτη που εξορύσσεται από το ορυχείο του Νοτίου Πεδίου της Πτολεμαΐδας, χρησιμοποίησε τα συνήθη απλά μεμονωμένα διαγράμματα ελέγχου, όσο και συνδυαστικά τύπου Hotelling. Διαπιστώθηκε ότι τα συνήθη διαγράμματα ελέγχου δεν αποτελούν αξιόπιστα εργαλεία ελέγχου επειδή οι μετρούμενες παράμετροι ποιότητας (υγρασία, τέφρα επί ξηρού και κατώτερη θερμογόνοος δύναμη) δεν είναι ανεξάρτητες μεταξύ τους. Με τη χρήση των διαγραμμάτων Hotelling εντοπίστηκαν περιπτώσεις παραγωγής εκτός του στατιστικού ελέγχου, όπου δεν μπορούσαν να εντοπιστούν με χρήση των διαγραμμάτων Shewhart. Ο ίδιος ερευνητής σε άλλη εργασία του (Γαλετάκης, 2010) μελέτησε τη επίδραση της αυτοσυσχέτισης των μετρήσεων παραμέτρων ποιότητας εξορυσσομένου λιγνίτη από ορυχεία της περιοχής της Πτολεμαΐδας στην αποτελεσματικότητα των διαγραμμάτων ελέγχου. Διαπίστωσε ότι η ύπαρξη ισχυρής αυτοσυσχέτισης επηρεάζει την απόδοση των διαγραμμάτων ελέγχου και πρότεινε την κατασκευή τροποποιημένων διαγραμμάτων Hotelling που λαμβάνουν υπόψη την ύπαρξη αυτοσυσχέτισης.

Οι Groenewald et al., (2006) χρησιμοποίησαν πολυμεταβλητές στατιστικές μεθόδους για την ταυτόχρονη παρακολούθηση-έλεγχο των παραμέτρων σε ένα εργοστάσιο εμπλουτισμού μεταλλευμάτων και πιο συγκεκριμένα στο κύκλωμα θραύσης-λειοτρίβησης-ταξινόμησης-επίπλευσης. Το κύκλωμα αποτελούταν από τρεις θραυστήρες, κόσκινα, μονάδες επίπλευσης, ενώ έπειτα από την εφαρμογή των διαγραμμάτων πολλαπλών χαρακτηριστικών για την παράμετρο των ποσοστών των κοκκομετρικών κλασμάτων που διέρχονταν από το κάθε θραυστήρα διαπιστώθηκε ότι είναι χρήσιμα καθώς δίνει τη δυνατότητα έγκαιρης διόρθωσης για τις εκτός στατιστικού ελέγχου περιπτώσεις.

Οι Fu et al., (2016) μελέτησαν με τη χρήση διαγραμμάτων Shewhart τις διακυμάνσεις της ποιότητας του γαιάνθρακα σε μονάδα εμπλουτισμού. Η βασική παράμετρος ποιότητας του εμπλουτισμένου άνθρακα που χρησιμοποιήθηκε ήταν η περιεκτικότητα σε τέφρα. Διαπίστωσαν ότι, η χρήση των διαγραμμάτων ελέγχου είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς αποκαλύπτουν αρκετές περιπτώσεις που η παραγωγική διαδικασία είναι εκτός στατιστικού ελέγχου επιτρέποντας έτσι την έγκαιρη λήψη διορθωτικών μέτρων.

4. ΕΠΙΛΟΓΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΚΑΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΒΑΣΙΚΩΝ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΩΝ ΜΕΓΕΘΩΝ

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζονται τα δεδομένα ποιότητας των μεταλλευμάτων και γίνεται η επιλογή του χρονικού διαστήματος και του μεταλλείου που θα μελετηθεί. Στη συνέχεια πραγματοποιείται στατιστική ανάλυση για τον υπολογισμό των βασικών στατιστικών παραμέτρων, των συσχετίσεων και των κατανομών των ποιοτικών στοιχείων των μεταλλευμάτων που επιλέχθηκαν για μελέτη.

4.1 Προέλευση μεταλλευμάτων – τρόπος παράδοσης και ποιοτικού ελέγχου

Η προέλευση των μεταλλευμάτων που χρησιμοποιούνται από την ΛΑΡΚΟ και το υφιστάμενο σύστημα παράδοσης και ελέγχου της ποιότητας είναι:

- Μετάλλευμα από τα Μεταλλεία Ευβοίας (ΜΕΕ). Το εξορυσσόμενο μετάλλευμα ομογενοποιείται σε σωρούς στις εγκαταστάσεις του μεταλλείου και παραδίδεται με πλοίο σε παρτίδες 1.5-2.5kt και θεωρείται ότι έχει σταθερή ποιότητα ανά παρτίδα. Γίνεται δειγματοληψία και ανάλυση ανά παρτίδα. Η ανάλυση του ΜΕΕ, όπως και όλων των άλλων μεταλλευμάτων περιλαμβάνει τον προσδιορισμό του Ni%, Fe_{total}%, SiO₂%, S% και υγρασία % (όλες οι αναλύσεις δίνονται επί ξηρού).
- Μετάλλευμα από τα Μεταλλεία του Αγίου Ιωάννη (ΜΕΙ). Παραδίδεται με φορτηγά από τα οποία λαμβάνονται δείγματα και αναλύεται σε ημερήσια βάση.
- Μετάλλευμα από τα Μεταλλεία της Καστοριάς (ΜΕΚ). Παραδίδεται σε παρτίδες των 2-2.5kt. Γίνεται δειγματοληψία και ανάλυση ανά παρτίδα.
- Μετάλλευμα από το Μεταλλείο της Τσούκας (ΤΣΟΥΚΑ). Η παράδοση και ο έλεγχος γίνεται όπως για το μετάλλευμα από τα μεταλλεία του Αγίου Ιωάννη.

Η διαδικασία παράδοσης και ελέγχου του μεταλλεύματος από κάθε μεταλλείο καθορίζει και τη συχνότητα μετρήσεων. Η μεταφορά στα μεταλλεία του Αγίου Ιωάννη γίνεται με φορτηγά οχήματα με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται καθημερινή δειγματοληψία (έλεγχος του μεταλλεύματος). Τα φορτηγά παραδίδουν σε ημερήσια βάση το μετάλλευμα, συλλέγεται δείγμα από κάθε φορτηγό και δημιουργείται ένα μέσο

ημερήσιο δείγμα το οποίο μετά από ανάλυση δίνει τη μέση ημερήσια τιμή του μεταλλεύματος.

Η μεταφορά από τα μεταλλεία της Εύβοιας και της Καστοριάς γίνεται σε παρτίδες μεγάλου μεγέθους (θεωρούνται ομογενοποιημένες) και γίνεται μια ανάλυση ανά παρτίδα η οποία αντιστοιχεί σε εβδομαδιαίο δείγμα. Έτσι δεν υπάρχουν καθημερινές μετρήσεις και δεν υπάρχει η δυνατότητα μελέτης της ημερήσιας διακύμανσης. Επιπλέον τα μεταλλεία Καστοριάς συνήθως κλείνουν για σημαντικό χρονικό διάστημα κατά τη διάρκεια του χειμώνα λόγω των δυσμενών καιρικών συνθηκών. Επίσης δεν λειτούργησαν για μια χρονική περίοδο μεγαλύτερου του ενός έτους (από 19/02/2009 έως και 18/04/2010).

Για το μεταλλείο της Τσούκας (μικρής δυναμικότητας εκμετάλλευση με περιοδική λειτουργία) υπάρχουν μετρήσεις μόνο για ένα διάστημα περίπου επτά μηνών, από 12/06/2014 έως και 13/01/2015.

Με βάση τα παραπάνω το μεταλλείο που επιλέχθηκε να μελετηθεί είναι του Αγίου Ιωάννη Λάρυμνας διότι είναι εκείνο με την πληρέστερη δειγματοληψία και με μεγάλο διαθέσιμο αριθμό αναλύσεων σε ημερήσια βάση. Οι μετρήσεις για τα ποιοτικά χαρακτηριστικά Ni, Fe_{total}, S, SiO₂ και υγρασία (%) που παραχωρήθηκαν από την εταιρεία ΛΑΡΚΟ, αφορούν το χρονικό διάστημα από 01/01/2005 έως και 13/01/2015, διάστημα και αντιστοιχεί σε 3.665 ημερήσιες καταγραφές τιμών. Λόγω διαφόρων προβλημάτων και απρόβλεπτων γεγονότων δεν είχαν καταχωρηθεί από την εταιρεία τιμές για τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του μεταλλεύματος για 36 ημέρες (αντιστοιχεί στο 0,87% του συνόλου των διαθέσιμων τιμών). Οι τιμές αυτές συμπληρώθηκαν λαμβάνοντας υπόψη τις προηγούμενες και επόμενες τιμές. Τυπικό απόσπασμα των αναλύσεων σε ημερήσια βάση για το μέταλλευμα από τα Μεταλλεία Αγίου Ιωάννη δίνεται στον πίνακα 4.1.

Πίνακας 4.1: Τυπικό απόσπασμα αναλύσεων μεταλλευμάτων σε ημερήσια βάση από τα Μεταλλεία Αγίου Ιωάννη.

A/A	Ημερομηνία	Ni (%)	SiO ₂ (%)	Fe _{total} (%)	S(%)	Υγρασία(%)
1788	22/11/09	0,92	17,60	34,00	0,135	5,17
1789	23/11/09	0,96	21,25	31,80	0,135	6,38
1790	24/11/09	0,92	21,65	34,50	0,140	6,36
1791	25/11/09	0,90	15,50	35,60	0,180	6,36
1792	26/11/09	0,90	24,20	30,30	0,100	7,43

4.2 Μεθοδολογία στατιστικής ανάλυσης και λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε

Τα δεδομένα που επιλέχθηκαν, ελέγχθησαν για την ορθότητα τους και πραγματοποιήθηκε συμπλήρωση των ημερήσιων μετρήσεων που απουσίαζαν. Απεικονίστηκε η χρονική μεταβολή τους, έγινε η επιλογή του χρονικού διαστήματος που θα μελετηθεί και πραγματοποιήθηκε η στατιστική ανάλυση για τον υπολογισμό των βασικών στατιστικών παραμέτρων, των συσχετίσεων και των κατανομών των ποιοτικών στοιχείων των μεταλλευμάτων. Το λογισμικό το οποίο χρησιμοποιήθηκε για την στατιστική ανάλυση είναι το Statgraphics της StatPoint (έκδοση V).

Το Statgraphics είναι ένα ευρέως διαδεδομένο λογισμικό στατιστικής ανάλυσης και απεικόνισης δεδομένων. Ισχυρά σημεία του Statgraphics θεωρούνται οι δυνατότητες του στην στατιστική ανάλυση δεδομένων και χρονοσειρών, οι δυνατότητες του στον σχεδιασμό πειραμάτων και την ανάλυση των αποτελεσμάτων του (factorial design and analysis) καθώς και οι δυνατότητες του στον στατιστικό έλεγχο διεργασιών για τη βελτίωση της ποιότητας (statistical process control).

Οι βασικοί λόγοι για τους οποίους επιλέχθηκε το πρόγραμμα Statgraphics Centurion για την ανάλυση των δεδομένων είναι:

- Είναι φιλικό στο χρήστη και ο απαιτούμενος χρόνος εκμάθησης του είναι μικρός.
- Μπορεί να χειριστεί με ευκολία δεδομένα διαφόρων τύπων και οι απαιτούμενοι χρόνοι εισαγωγής και ανάλυσης είναι μικροί.
- Έχει ενσωματωμένη βοήθεια για την ερμηνεία των αποτελεσμάτων της στατιστικής ανάλυσης (Stat Advisor). Αν και η ερμηνεία που δίνει ακολουθεί συγκεκριμένη προτυποποίηση (τυποποιημένα σχόλια), εντούτοις κρίνεται ιδιαίτερα σημαντική αφού βοηθά σημαντικά εκείνον που κάνει την ανάλυση να εξάγει τα δικά του εξειδικευμένα συμπεράσματα-σχόλια.
- Τα αποτελέσματα της ανάλυσης συνοδεύονται από πλήθος γραφημάτων που αποδίδουν με παραστατικό τρόπο τις μεταβολές, συσχετίσεις κ.α. των δεδομένων και δίνει τη δυνατότητα οργανωμένης καταγραφής (Stat Reporter) των αποτελεσμάτων της ανάλυσης και της μεταφοράς του σε άλλες εφαρμογές για περαιτέρω επεξεργασία ή τεκμηρίωση.

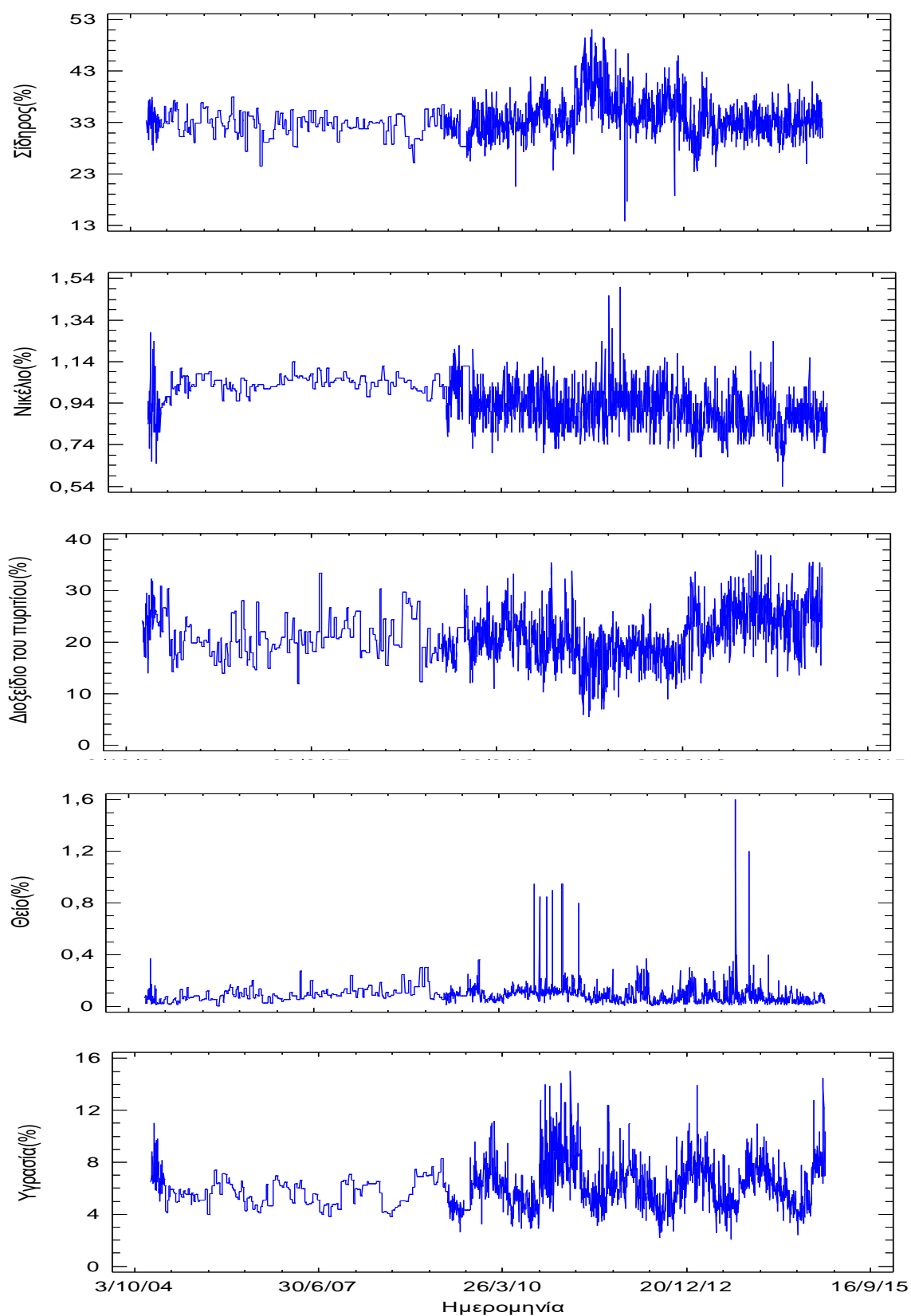
- Διαθέτει εξειδικευμένες λειτουργίες για τον στατιστικό έλεγχο ποιότητας (Statistical Quality Control).

Τα κύρια βήματα που ακολουθήθηκαν για την ανάλυση των δεδομένων μέσω του λογισμικού Statgraphics είναι:

- Εισαγωγή αρχείου δεδομένων σε μορφή Excel και μετατροπή του σε μορφή κατάλληλη για το λογισμικό Statgraphics.
- Επιλογή τύπου ανάλυσης (Υπολογισμός βασικών στατιστικών παραμέτρων, κατασκευή διαγραμμάτων \bar{x} -R, \bar{x} -S, πολλαπλών χαρακτηριστικών κ.α.)
- Αξιολόγηση και τεκμηρίωση της ανάλυσης (σχήματα, πίνακες τιμών κ.α.)

4.3 Επιλογή χρονικού διαστήματος μελέτης

Προκειμένου να επιλέξουμε το κατάλληλο χρονικό διάστημα για τη μελέτη της διαχρονικής εξέλιξης, πραγματοποιήθηκε η απεικόνιση της μεταβολής όλων των ποιοτικών παραμέτρων του μεταλλεύματος που προέρχεται από το μεταλλείο του Αγίου Ιωάννη για το όλο χρονικό διάστημα που υπήρχαν διαθέσιμες τιμές (από 01/01/2005 έως και 13/01/2015. Οι μεταβολές των ποιοτικών χαρακτηριστικών του μεταλλεύματος (ημερήσιες τιμές για Fe_{total} %, Ni %, SiO_2 %, S % και υγρασία %) δίνεται στο σχήμα 4.2.



Σχήμα 4.1: Διαχρονική εξέλιξη των ημερήσιων τιμών περιεκτικότητας (%) σιδήρου, νικελίου, διοξειδίου του πυριτίου, θείου και υγρασίας στο μετάλλευμα Αγίου Ιωάννη από 01/01/2005 έως 13/01/2015.

Από το Σχήμα 4.2 φαίνεται ότι το χρονικό διάστημα από 01/01/2005 μέχρι 31/10/2009 εμφανίζεται πολύ μικρή διακύμανση των ποιοτικών χαρακτηριστικών του μεταλλεύματος, ενώ επιπλέον υπάρχουν χρονικά διαστήματα για τα οποία παρατηρείται η ίδια επαναλαμβανόμενη τιμή. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι σε αυτά τα χρονικά διαστήματα δεν γίνονταν τακτικές δειγματοληψίες σε ημερήσια βάση αλλά σε εβδομαδιαία ή και με μικρότερη ακόμη συχνότητα. Άρα για το χρονικό αυτό διάστημα δεν υπάρχει η δυνατότητα μελέτης της μεταβολής της ημερήσιας ποιότητας. Αντίθετα το χρονικό διάστημα από 01/11/2009 έως και 13/01/2015 πραγματοποιήθηκε δειγματοληψία σε ημερήσια βάση και για το λόγο αυτό αποφασίστηκε να μελετηθεί η διαχρονική εξέλιξη της ποιότητας του μεταλλεύματος εντός αυτού του χρονικού διαστήματος.

4.4 Υπολογισμός βασικών στατιστικών μεγεθών

Τα βασικά στατιστικά μεγέθη για τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του μεταλλεύματος υπολογίστηκαν τόσο για το σύνολο των διαθέσιμων δεδομένων (όλο το χρονικό διάστημα) όσο για το χρονικό διάστημα που επιλέχθηκε για τη μελέτη της διαχρονικής εξέλιξης (από 01/11/2009 έως και 13/01/2015). Επιπρόσθετα, υπολογίστηκαν οι συντελεστές συσχέτισης και έγινε έλεγχος των κατανομών που ακολουθούν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του μεταλλεύματος.

Στον πίνακα 4.2 δίνονται τα αποτελέσματα των βασικών στατιστικών παραμέτρων που υπολογίστηκαν (μέση τιμή, τυπική απόκλιση, συντελεστής μεταβλητότητας, ελάχιστη τιμή, μέγιστη τιμή και εύρος) τόσο για το σύνολο των διαθέσιμων δεδομένων της περιόδου 01/01/2005-13/01/2015 (Π1) όσο και για την περίοδο που επιλέχθηκε από 01/11/2009-13/01/2015 (Π2).

Πίνακας 4.2: Βασικές στατιστικές παράμετροι που υπολογίστηκαν για τα ποιοτικά στοιχεία του μεταλλεύματος για την περίοδο 01/01/2005-13/01/2015 (Π1) και για την περίοδο 01/11/2009-13/01/2015 (Π2).

Ποιοτικό χαρακτηριστικό	Σίδηρος (Fe _{total}) (%)		Νικέλιο (Ni) (%)		Υγρασία (%)		Διοξείδιο του πυριτίου (SiO ₂) (%)		Θείο (S) (%)	
	Π1	Π2	Π1	Π2	Π1	Π2	Π1	Π2	Π1	Π2
Πλήθος μετρήσεων	3665	1900	3665	1900	3665	1900	3665	1900	3665	1900
Μέση τιμή	33,39	34,24	0,97	0,91	6,00	6,34	21,16	21,29	0,09	0,09
Τυπική απόκλιση	3,36	3,88	0,10	0,10	1,53	1,82	4,47	4,95	0,08	0,10
Συντελεστής μεταβλητότητας	10,08	11,33	10,34	10,55	25,56	28,64	21,14	23,25	86,20	109,11
Ελάχιστη τιμή	13,80	13,80	0,54	0,54	2,05	2,05	5,50	5,50	0,01	0,01
Μέγιστη τιμή	51,10	51,10	1,50	1,50	15,04	15,04	37,9	37,9	1,60	1,60
Εύρος	37,30	37,30	0,96	0,96	12,99	12,99	32,40	32,40	1,59	1,59

Από τον συγκεντρωτικό πίνακα φαίνεται ότι η τυπική απόκλιση και ο συντελεστής μεταβλητότητας των ποιοτικών χαρακτηριστικών για τη περίοδο που επιλέχθηκε (Π2) είναι μεγαλύτερος σε σχέση με εκείνη του ολικού διαστήματος (Π1). Η μεγαλύτερη αυτή διακύμανση είναι αναμενόμενη αφού στο επιλεγμένο διάστημα μελέτης (Π2) υπάρχουν διαθέσιμες μετρήσεις σε ημερήσια βάση ενώ σε ένα μεγάλο μέρος του αρχικού διαστήματος (Π1) υπάρχει επανάληψη τιμών αφού έχει γίνει μόνο μια μέτρηση ανά εβδομάδα. Όσον αφορά τις μέσες τιμές οι σημαντικότερες διαφορές εντοπίζονται στο νικέλιο (0,97 για το Π1 και 0,91 για το Π2) και στο σίδηρο (33,39 για το Π1 και 34,24 για το Π2). Στα άλλα ποιοτικά χαρακτηριστικά οι διαφορές θεωρούνται αμελητέες.

Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο συντελεστής συσχέτισης (Pearson) μεταξύ των ποιοτικών χαρακτηριστικών. Ο συντελεστής συσχέτισης εκφράζει το βαθμό και τον τρόπο που δύο μεταβλητές συσχετίζονται, δηλαδή πως η μία μεταβάλλεται ως προς την άλλη. Ο συντελεστής παίρνει τιμές στο διάστημα $[-1,1]$. Οι τιμές του ερμηνεύονται ως εξής:

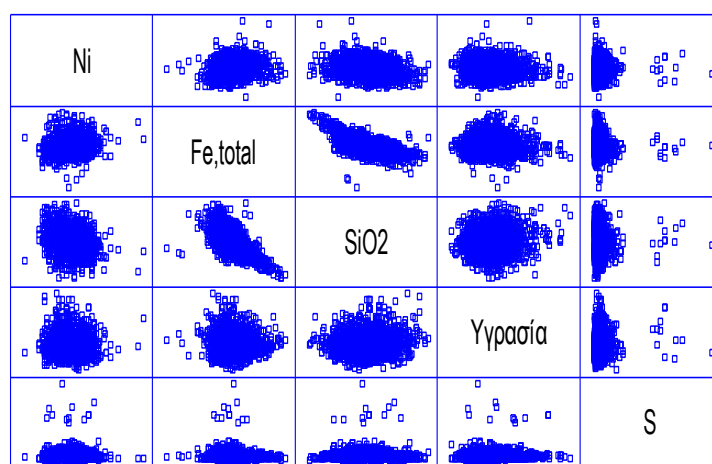
+1: Υπάρχει τέλεια θετική συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών.

0: Δεν υπάρχει καμιά (γραμμική) συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών.

-1: Υπάρχει τέλεια αρνητική συσχέτιση μεταξύ των μεταβλητών.

Όταν ο συντελεστής συσχέτισης είναι κοντά στο +1 ή στο -1 η γραμμική συσχέτιση των δύο μεταβλητών είναι ισχυρή (συνήθως χαρακτηρίζονται πολύ ισχυρές τις συσχετίσεις που είναι μεγαλύτερες του 0,9) ενώ όταν είναι κοντά στο 0 οι μεταβλητές είναι πρακτικά ασυσχέτιστες.

Στο Σχήμα 4.2 δίνονται τα διαγράμματα συσχέτισης των ποιοτικών χαρακτηριστικών του μεταλλεύματος από τα μεταλλεία Αγίου Ιωάννη, για την περίοδο 01/11/2009 έως 13/01/2015 και στον Πίνακα 4.3 οι συντελεστές συσχέτισης (Pearson) που υπολογίστηκαν.



Σχήμα 4.2: Διαγράμματα συσχέτισης των ποιοτικών χαρακτηριστικών του μεταλλεύματος από τα μεταλλεία Αγίου Ιωάννη, για την περίοδο 01/11/2009 έως 13/01/2015.

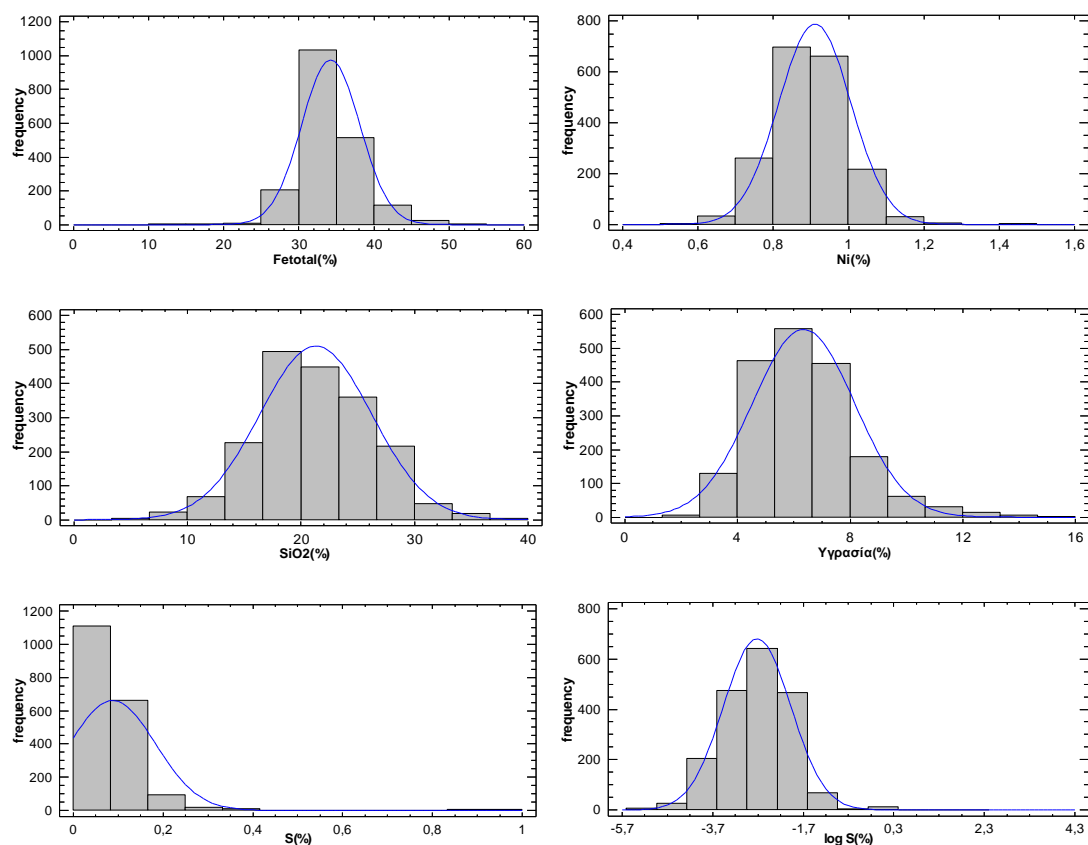
Πίνακας 4.3: Συντελεστές συσχέτισης Pearson για τα ποιοτικά χαρακτηριστικά στα μεταλλεία Αγίου Ιωάννη την περίοδο 01/11/2009 έως 13/01/2015.

	Νικέλιο (%)	Σίδηρος (%)	Διοξείδιο του πυριτίου (%)	Υγρασία (%)	Θείο (%)
Νικέλιο (%)	1	0,1790	-0,2665	-0,0863	0,0371
Σίδηρος (%)		1	-0,6512	-0,0155	-0,0690
Διοξείδιο του πυριτίου (%)			1	0,0932	-0,0327
Υγρασία (%)				1	0,0807
Θείο (%)					1

Εκτός από τον υπολογισμό του συντελεστή συσχέτισης Pearson, όπου εξετάζεται εάν είναι γραμμική η συσχέτιση μεταξύ δύο μεταβλητών, υπολογίστηκε και ο συντελεστής συσχέτισης Spearman προκειμένου να εντοπιστούν μη γραμμικές συσχετίσεις. Οι συντελεστές Spearman που υπολογίστηκαν είναι σχεδόν ίδιοι με τους συντελεστές Pearson οπότε θεωρήθηκε ότι οι υπάρχουσες συσχετίσεις αποδίδονται ικανοποιητικά από τον πίνακα 4.3.

Παρατηρείται από τον πίνακα 4.3 ότι τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που συσχετίζονται είναι ο σίδηρος (Fe_{total}) και το διοξείδιο του πυριτίου (SiO_2). Η τιμή του συντελεστή συσχέτισης είναι -0,6512 γεγονός που σημαίνει ότι υπάρχει μέτρια αρνητική συσχέτιση μεταξύ τους. Δηλαδή, με την αύξηση της περιεκτικότητας του σιδήρου, η περιεκτικότητα του διοξειδίου του πυριτίου μειώνεται.

Στη συνέχεια έγινε ο έλεγχος των κατανομών των ποιοτικών χαρακτηριστικών με την κατασκευή των ιστογραμμάτων και έγινε προσαρμογή θεωρητικών καμπυλών (κανονική κατανομή) για το επιλεγθέν χρονικό διάστημα από 01/11/2009 έως και 13/01/2015. Η γνώση της κατανομής της παραμέτρου ποιότητας που ελέγχεται με τα διαγράμματα στατιστικού ελέγχου είναι σημαντική. Στα περισσότερα διαγράμματα στατιστικού ελέγχου (όπως διαγράμματα \bar{x} -R και ή \bar{x} -S), ειδικά αν το μέγεθος του λαμβανόμενου κάθε φορά δείγματος είναι μικρό, απαιτείται η ύπαρξη κανονικής κατανομής. Τα ιστογράμματα με την προσαρμοσθείσα κανονική κατανομή δίνονται στο Σχήμα 4.3.

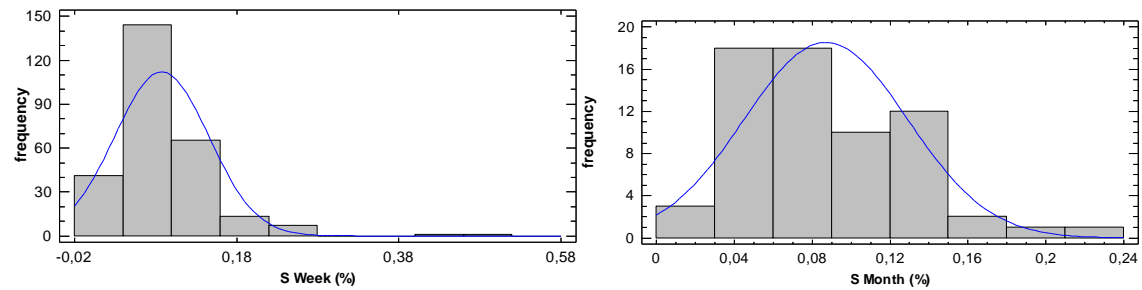


Σχήμα 4.3: Ιστογράμματα περιεκτικότητας Fe_{total} , Ni, SiO_2 , υγρασίας και S για το μέταλλευμα Αγίου Ιωάννη για την περίοδο 01/11/2009 έως 13/01/2015. Με μπλε γραμμή δίνεται η μορφή της προσαρμοσθείσας κανονικής κατανομής.

Από την κατασκευή των ιστογραμμάτων των ημερήσιων τιμών των ποιοτικών χαρακτηριστικών και τον έλεγχο για τη θεωρητική κατανομή που ακολουθούν, διαπιστώνεται ότι όλα τα ποιοτικά χαρακτηριστικά, πλην του θείου, προσεγγίζουν ικανοποιητικά την κανονική κατανομή. Η ημερήσια τιμή της περιεκτικότητας του θείου διαπιστώθηκε ότι προσεγγίζει τη λογαριθμική κατανομή.

Για το θείο έγινε έλεγχος της κατανομής για την εβδομαδιαία και μηνιαία τιμή και τα ιστογράμματα που προέκυψαν φαίνονται στο σχήμα 4.4. Παρατηρείται ότι οι εβδομαδιαίες και μηνιαίες τιμές προσεγγίζουν ικανοποιητικά την κανονική κατανομή και για το λόγο αυτό, έγινε η κατασκευή των στατιστικών διαγραμμάτων ελέγχου του θείου σε εβδομαδιαία, μηνιαία και ετήσια βάση όπως των υπολοίπων ποιοτικών χαρακτηριστικών.

Ο έλεγχος των κατανομών για τις εβδομαδιαίες τιμές των ποιοτικών χαρακτηριστικών, έδειξε ότι όλα τα ποιοτικά χαρακτηριστικά προσεγγίζουν ικανοποιητικά την κανονική κατανομή.

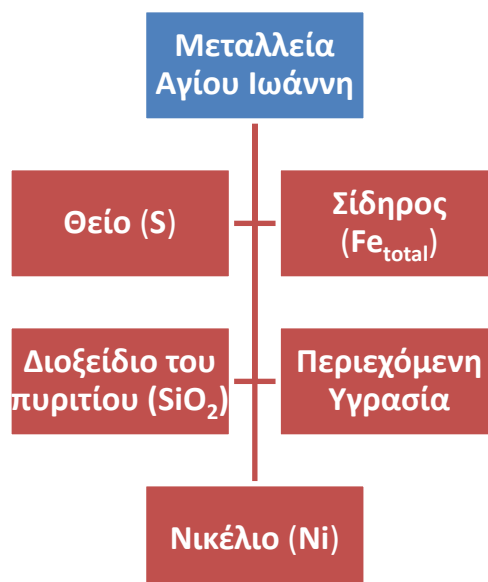


Σχήμα 4.4: Ιστογράμματα περιεκτικότητας S για το μέταλλευμα Αγίου Ιωάννη για την περίοδο 01/11/2009 έως 13/01/2015 σε εβδομαδιαία και μηνιαία βάση. Με μπλε γραμμή δίνεται η μορφή της προσαρμοσθείσας κανονικής κατανομής.

5. ΧΡΗΣΗ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΕΛΕΓΧΟΥ \bar{x} -S ΚΑΙ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ ΠΟΛΛΑΠΛΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΗΣ ΤΩΝ ΠΟΙΟΤΙΚΩΝ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΩΝ

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Στο κεφάλαιο κατασκευάζονται και ερμηνεύονται τα διαγράμματα ελέγχου μέσης τιμής-τυπικής απόκλισης \bar{x} -S για τον έλεγχο της μεταβολής της εβδομαδιαίας, μηνιαίας και ετήσιας διακύμανσης για όλα τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του μεταλλεύματος που προέρχεται από τα μεταλλεία Αγίου Ιωάννη (Σχήμα 5.1). Πέραν της δημιουργίας των μεμονωμένων διαγραμμάτων ελέγχου, κατασκευάζονται επίσης και τα διαγράμματα πολλαπλών χαρακτηριστικών Hotelling για τα ποιοτικά χαρακτηριστικά που εμφανίζουν συσχέτιση, τα οποία διαπιστώθηκε στο κεφάλαιο 3 ότι είναι ο Fe_{total} και το SiO_2 .



Σχήμα 5.1: Ποιοτικά χαρακτηριστικά του μεταλλεύματος από τα μεταλλεία Αγίου Ιωάννη που ελέγχθησαν.

Για τον εντοπισμό των περιπτώσεων όπου εμφανίζονται μεταβολές στα ποιοτικά που κρίνονται ως μη αναμενόμενες (εκτός στατιστικού ελέγχου καταστάσεις) χρησιμοποιήθηκαν τα παρακάτω κριτήρια:

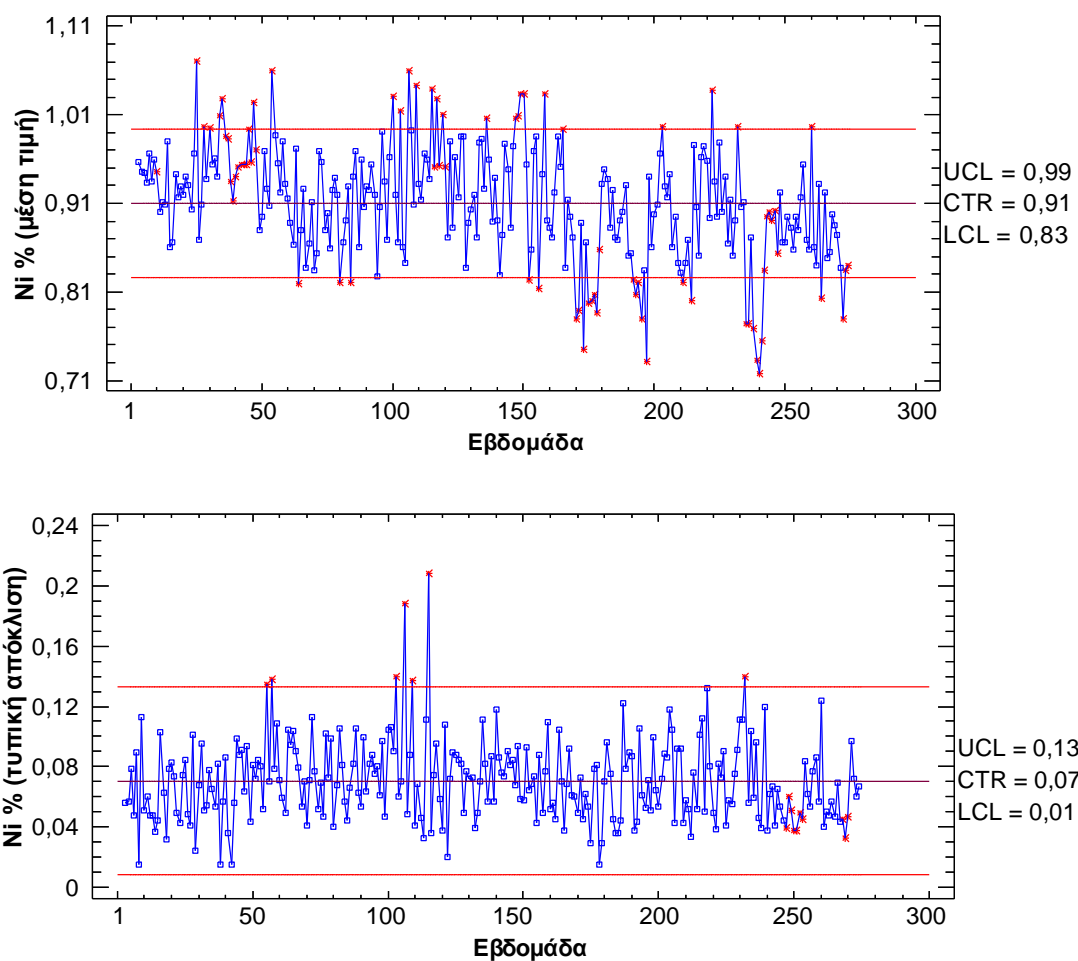
- Εντοπισμός σημείων του διαγράμματος ελέγχου που είναι εκτός του ανώτερου ή κατώτερου ορίου στατιστικού ελέγχου (UCL, LCL).
- Ύπαρξη περισσότερων των επτά συνεχόμενων σημείων άνω ή κάτω της κεντρικής γραμμής (CL).
- Ύπαρξη ανοδικών ή καθοδικών τάσεων που δημιουργούνται από επτά ή περισσότερα συνεχόμενα σημεία.
- Ύπαρξη κυκλικότητας στη μεταβολή των ποιοτικών χαρακτηριστικών.

5.1. Κατασκευή μεμονωμένων διαγραμμάτων ελέγχου περιεκτικότητας Ni σε εβδομαδιαία, μηνιαία και ετήσια βάση

Στο Σχήμα 5.2 δίνεται το διάγραμμα στατιστικού ελέγχου της μέσης εβδομαδιαίας τιμής και της τυπικής απόκλισης (\bar{x} -S) για το Ni % για το χρονικό διάστημα από 01/11/2009 έως 13/01/2015. Η εβδομάδα Νο1 είναι εκείνη που αρχίζει στις 01/11/2009. Τα όρια του στατιστικού ελέγχου για τον έλεγχο της μέσης εβδομαδιαίας τιμής του Ni% υπολογίστηκαν σε LCL=0,83% και UCL=0,99% ενώ η κεντρική γραμμή σε CL=0,91%. Οι υπολογισμοί έγιναν με βάση τις σχέσεις 3.16 και 3.17.

Για το διάγραμμα ελέγχου της τυπικής απόκλισης του Ni% εντός του εβδομαδιαίου δείγματος υπολογίστηκαν επίσης τα όρια του στατιστικού ελέγχου LCL=0,01% και UCL=0,13% και κεντρική γραμμή CL=0,07% με βάση τις σχέσεις 3.18 και 3.19.

Στη συνέχεια έγινε έλεγχος για εντοπισμό περιπτώσεων που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου σύμφωνα με τα κριτήρια που αναφέρθηκαν. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.



Σχήμα 5.2: Διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης για την εβδομαδιαία διακύμανση του Ni (%) από 01/11/2009 έως 13/01/2015. Η εβδομάδα Νο1 είναι εκείνη που αρχίζει στις 01/11/2009. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.

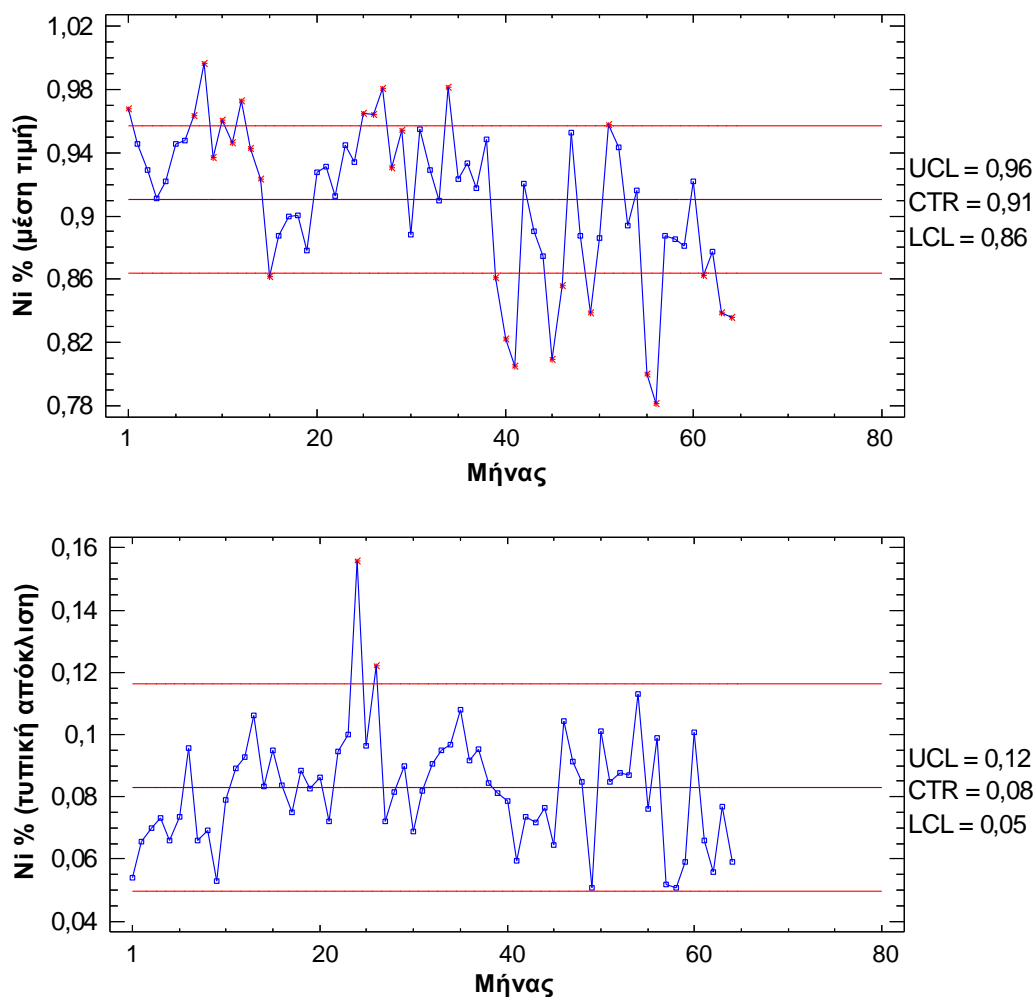
Η μεταβολή της μέσης εβδομαδιαίας τιμής του Ni εμφανίζει σημαντικό αριθμό περιπτώσεων που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου. Η πλειοψηφία των περιπτώσεων αφορά καταστάσεις όπου οι τιμές του Ni είναι εκτός των ορίων (53 περιπτώσεις). Εντοπίζονται επίσης και περιπτώσεις (35) όπου περισσότερα των επτά συνεχόμενων σημείων βρίσκονται άνω ή κάτω της κεντρικής γραμμής (CL). Όλες οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου σημειώνονται με κόκκινους αστερίσκους.

Όσον αφορά τη μεταβολή της τυπικής απόκλισης παρατηρείται ότι οι εμφανιζόμενες εκτός στατιστικού ελέγχου περιπτώσεις είναι σαφώς λιγότερες. Πιο συγκεκριμένα, παρουσιάζονται 7 σημεία εκτός του ανώτερου ορίου (UCL), ενώ υπάρχουν 10

περιπτώσεις εκτός στατιστικού ελέγχου όπου περισσότερα των επτά συνεχόμενων σημείων βρίσκονται κάτω από τη κεντρική γραμμή (CL).

Εάν θεωρηθεί ότι η εβδομαδιαία τιμή όπου λαμβάνετε αντιπροσωπεύει την μέση τιμή του μεταλλεύματος που προέρχεται από τη δημιουργία παρτίδων μιας εβδομάδος έπειτα από διαδικασίες ομογενοποίησης, προκύπτει ότι οι διακυμάνσεις εντός της εβδομάδας είναι μικρές και ελεγχόμενες. Επομένως, το πρόβλημα εντοπίζεται στη διακύμανση που εμφανίζουν οι μέσες εβδομαδιαίες τιμές (διαφορές στην ποιότητα ανάμεσα σε παρτίδες με μέγεθος που αντιπροσωπεύει την παραγωγή μια εβδομάδας).

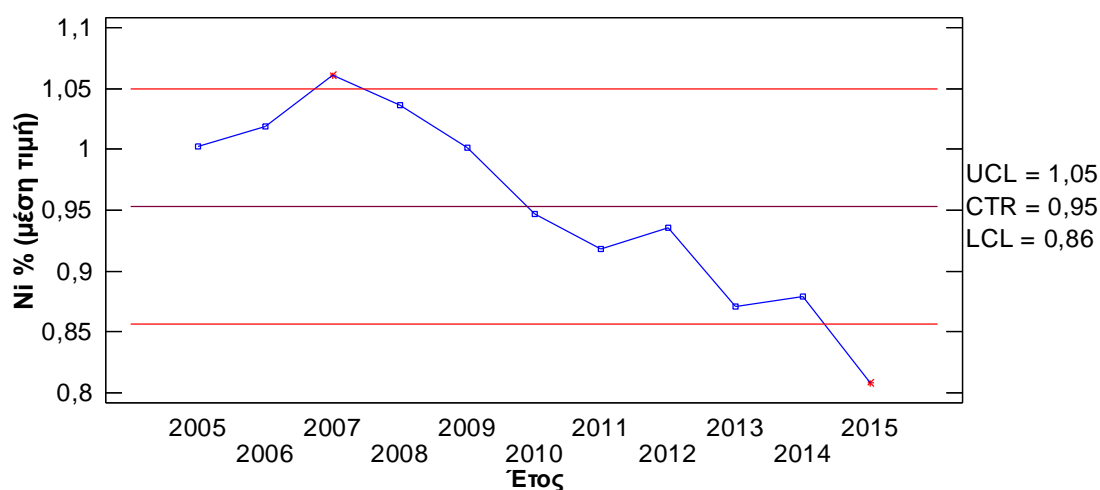
Στη συνέχεια κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα ελέγχου για τις μηνιαίες τιμές, όπως φαίνονται στο Σχήμα 5.3.



Σχήμα 5.3: Τυπικό διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης για την μηνιαία διακύμανση του Ni (%) από 01/11/2009 έως 13/01/2015. Ο μήνας Νο1 είναι εκείνος που αρχίζει στις 01/11/2009. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.

Από τα διαγράμματα ελέγχου για τη μηνιαία διακύμανση παρατηρείται ότι εμφανίζονται 22 σημεία εκτός των ανώτερων και κατώτερων ορίων ενώ υπάρχουν 11 περιπτώσεις εκτός στατιστικού ελέγχου όπου περισσότερα των επτά συνεχόμενων σημείων βρίσκονται πάνω ή κάτω από τη κεντρική γραμμή (CL). Όσον αφορά την τυπική απόκλιση της ημερήσιας τιμής εντός του μηνιαίου δείγματος παρατηρούνται μόνο 2 περιπτώσεις εκτός στατιστικού ελέγχου, πάνω από το ανώτερο όριο (UCL). Επιπλέον διαφαίνεται και μια μακροχρόνια πτωτική τάση της περιεκτικότητας σε Ni. Όπως και στην περίπτωση της μελέτης της εβδομαδιαίας τιμής και στην περίπτωση αυτή το πρόβλημα εντοπίζεται στη διακύμανση που εμφανίζουν οι μέσες μηνιαίες τιμές και στην πτωτική τάση που εμφανίζουν.

Τέλος για τη μελέτη της μακροχρόνια διακύμανσης κατασκευάστηκε το διάγραμμα μεταβολής της μέσης ετήσιας τιμής του Ni% (Σχήμα 5.4).

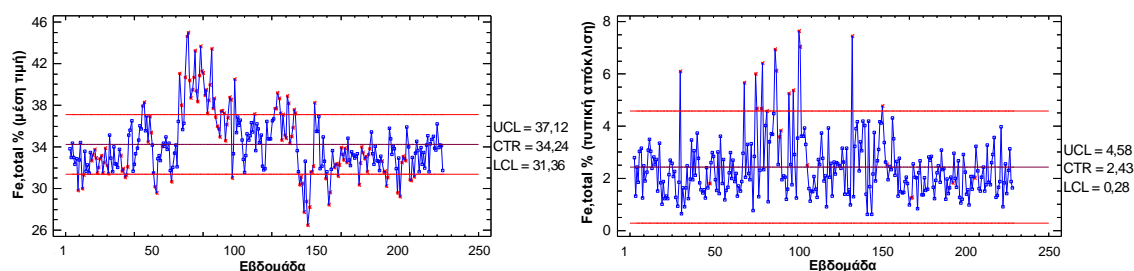


Σχήμα 5.4: Τυπικό διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής για την ετήσια διακύμανση του Ni (%) βασισμένο στις μηνιαίες τιμές από 01/01/2005 έως 13/01/2015. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.

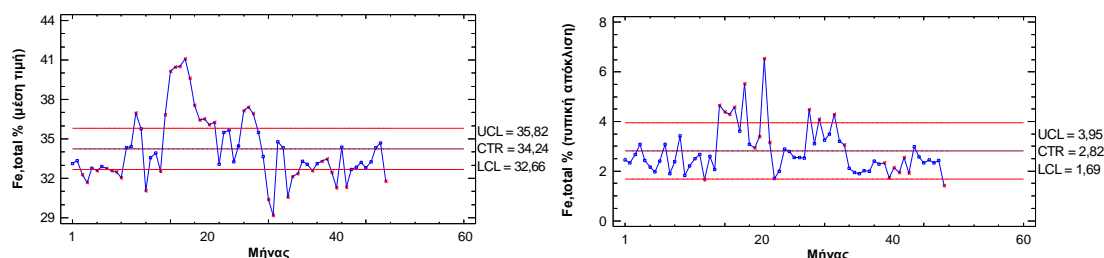
Από την κατασκευή του διαγράμματος ελέγχου της μέσης τιμής του Ni % σε ετήσια βάση, παρατηρούνται μόνο 2 περιπτώσεις σημείων εκτός στατιστικού ελέγχου όπου αντιπροσωπεύουν τα έτη 2007 και 2015. Όμως το πλέον σημαντικό πρόβλημα, αποτελεί η διαρκής πτωτική πορεία της περιεκτικότητας σε Ni η οποία μπορεί να αποδοθεί στην σταδιακή μετατόπιση της εκμετάλλευσης στα φτωχότερα τμήματα των σιδηρονικελιούχων κοιτασμάτων της περιοχής του Αγίου Ιωάννη.

5.2 Κατασκευή μεμονωμένων διαγραμμάτων ελέγχου περιεκτικότητας Fe σε εβδομαδιαία, μηνιαία και ετήσια βάση.

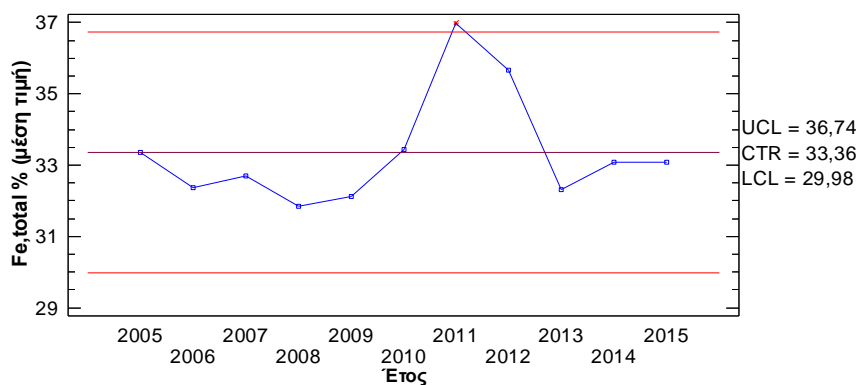
Με τον ίδιο τρόπο κατασκευάστηκαν τα διαγράμματα ελέγχου για την περιεκτικότητα του μεταλλεύματος σε σίδηρο (Fe_{total} %), σε εβδομαδιαία, μηνιαία και ετήσια βάση και δίνονται στα σχήματα 5.5-5.7.



Σχήμα 5.5: Διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης για την εβδομαδιαία διακύμανση του Fe_{total} (%) από 01/11/2009 έως 13/01/2015. Η εβδομάδα No1 είναι εκείνη που αρχίζει στις 01/11/2009. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.



Σχήμα 5.6: Διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης για την μηνιαία διακύμανση του Fe_{total} (%) από 01/11/2009 έως 13/01/2015. Ο μήνας No1 είναι εκείνος που αρχίζει στις 01/11/2009. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.



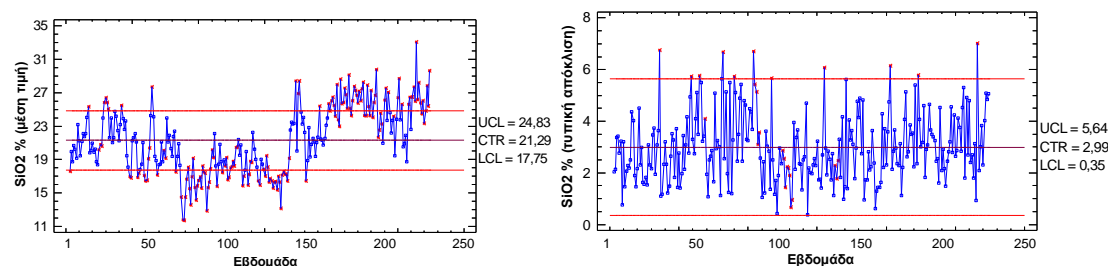
Σχήμα 5.7: Διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής για την ετήσια διακύμανση του Fe_{total} (%) βασισμένο στις μηνιαίες τιμές από 01/01/2005 έως 13/01/2015. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.

Από τα διαγράμματα ελέγχου της μέσης τιμής για το σίδηρο (εβδομαδιαία, μηνιαία και ετήσια) συμπεραίνεται ότι δεν εμφανίζει μακροχρόνια τάση αλλά σε αρκετές περιπτώσεις υπάρχουν τιμές εκτός των ορίων του στατιστικού ελέγχου. Εξαίρεση αποτελεί το διάγραμμα ελέγχου μέσης ετήσιας τιμής όπου παρουσιάζεται μόνο ένα σημείο εκτός στατιστικού ελέγχου για το έτος 2011 όπου η τιμή του σιδήρου εμφανίζεται ιδιαίτερα υψηλή. Το διάστημα 2011-2012 οι τιμές είναι σημαντικά υψηλότερες σε σχέση με τα υπόλοιπα έτη.

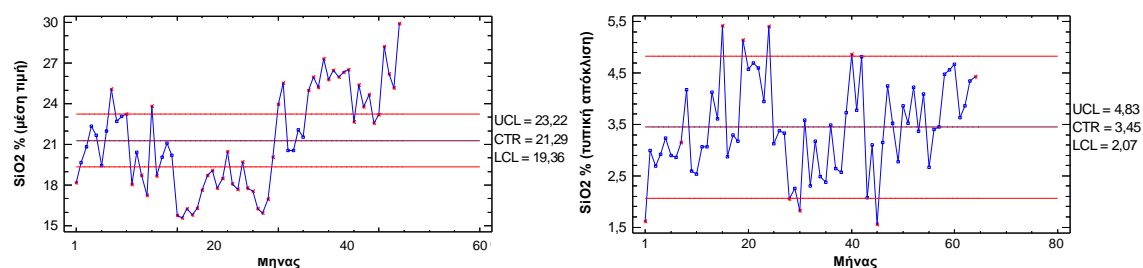
Στα διαγράμματα ελέγχου της τυπικής απόκλισης εμφανίζονται λιγότερες περιπτώσεις εκτός στατιστικού ελέγχου και αφορούν κυρίως περιπτώσεις όπου οι ημερήσιες διακυμάνσεις εντός της εβδομάδας ή του μήνα ήταν υψηλότερες του ανώτερου ορίου του στατιστικού ελέγχου (UCL).

5.3 Κατασκευή μεμονωμένων διαγραμμάτων ελέγχου περιεκτικότητας SiO₂ σε εβδομαδιαία, μηνιαία και ετήσια βάση

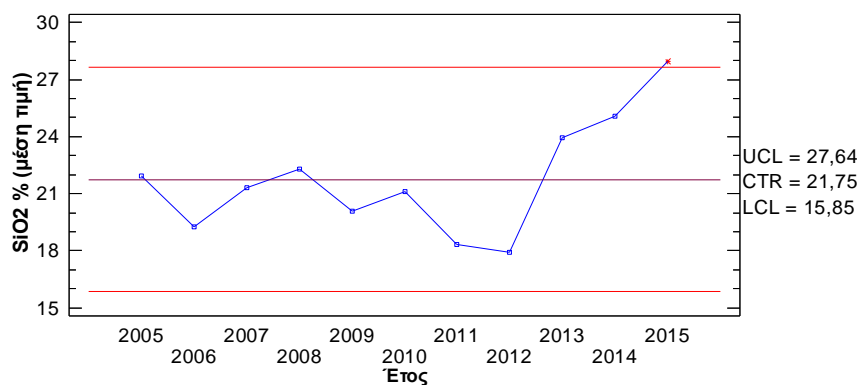
Τα διαγράμματα ελέγχου για την περιεκτικότητα του μεταλλεύματος σε διοξείδιο του πυριτίου (SiO₂ %), σε εβδομαδιαία, μηνιαία και ετήσια βάση και δίνονται στα σχήματα 5.8-5.10.



Σχήμα 5.8: Διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης για την εβδομαδιαία διακύμανση του SiO₂ (%) από 01/11/2009 έως 13/01/2015. Η εβδομάδα Νο1 είναι εκείνη που αρχίζει στις 01/11/2009. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.



Σχήμα 5.9: Διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης για την μηνιαία διακύμανση του SiO₂ (%) από 01/11/2009 έως 13/01/2015. Ο μήνας Νο1 είναι εκείνος που αρχίζει στις 01/11/2009. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.

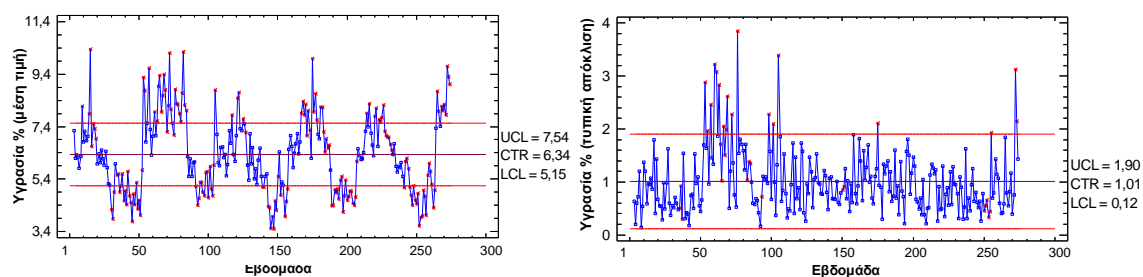


Σχήμα 5.10: Διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής για την ετήσια διακύμανση του SiO₂ (%) βασισμένο στις μηνιαίες τιμές από 01/01/2005 έως 13/01/2015. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.

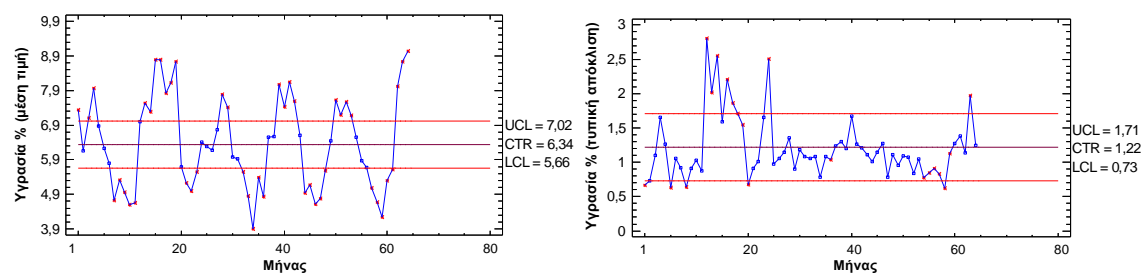
Από τη μελέτη των διαγραμμάτων ελέγχου της μέσης τιμής για το διοξείδιο του πυριτίου (εβδομαδιαία και μηνιαία) φαίνεται ότι υπάρχουν πολλές περιπτώσεις με τιμές εκτός των ορίων του στατιστικού ελέγχου. Το διάγραμμα ελέγχου μέσης ετήσιας τιμής όπου παρουσιάζεται μόνο ένα σημείο εκτός στατιστικού ελέγχου, ενώ για μετά το έτος 2012 εμφανίζει μια αυξητική τάση. Οι χαμηλές τιμές για το διάστημα 2011-2012 συμπίπτουν με τις αντίστοιχες υψηλές για τον σίδηρο (Σχήμα 5.7). Το γεγονός αυτό είναι αναμενόμενο με βάση τη συσχέτιση που εμφανίζουν τα ποιοτικά αυτά χαρακτηριστικά.

Στα διαγράμματα ελέγχου της τυπικής απόκλισης εμφανίζονται λιγότερες περιπτώσεις εκτός στατιστικού ελέγχου και αφορούν κυρίως περιπτώσεις όπου οι ημερήσιες διακυμάνσεις εντός της εβδομάδας ή του μήνα ήταν υψηλότερες του ανώτερου ορίου του στατιστικού ελέγχου (UCL).

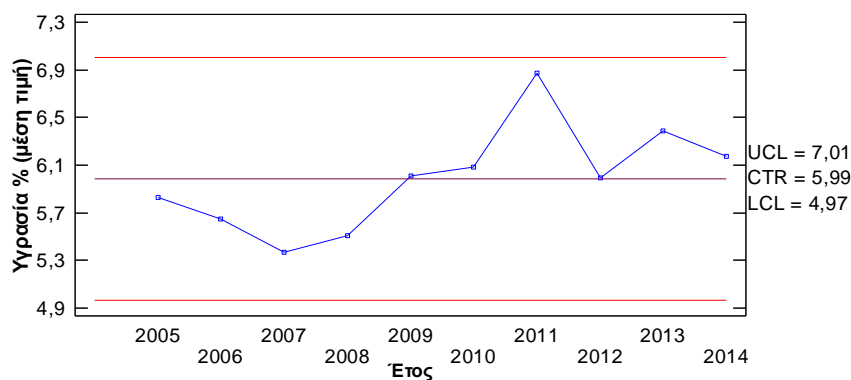
5.4 Κατασκευή μεμονωμένων διαγραμμάτων ελέγχου περιεκτικότητας υγρασίας σε εβδομαδιαία, μηνιαία και ετήσια βάση



Σχήμα 5.11: Διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης για την εβδομαδιαία διακύμανση της υγρασίας (%) από 01/11/2009 έως 13/01/2015. Η εβδομάδα No1 είναι εκείνη που αρχίζει στις 01/11/2009. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.



Σχήμα 5.12: Διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης για την μηνιαία διακύμανση της υγρασίας (%) από 01/11/2009 έως 13/01/2015. Ο μήνας No1 είναι εκείνος που αρχίζει στις 01/11/2009. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.

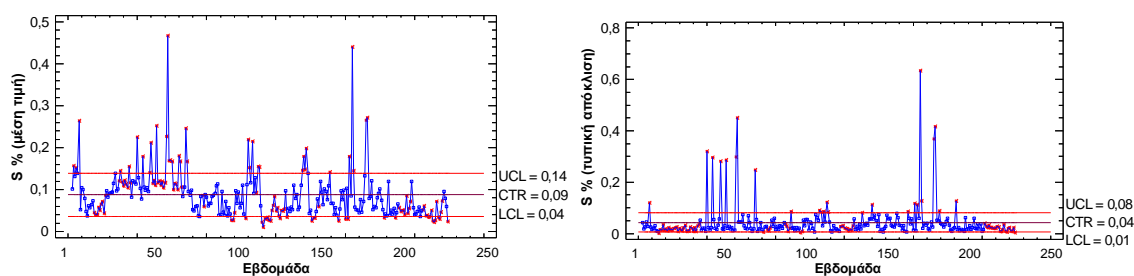


Σχήμα 5.13: Διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής για την ετήσια διακύμανση της υγρασίας (%) βασισμένο στις μηνιαίες τιμές από 01/01/2005 έως 31/12/2014. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.

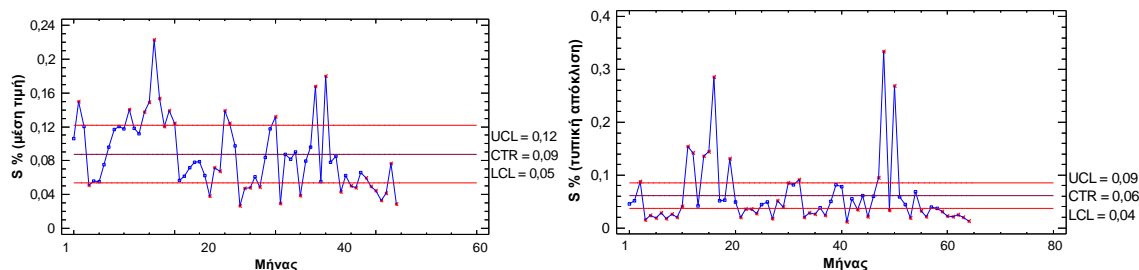
Η μεταβολή της μέσης εβδομαδιαίας και μηνιαίας υγρασίας του μεταλλεύματος (αποθηκεύεται σε υπαίθριες πλατείες) παρουσιάζει περιοδικότητα που συνδέεται με τις εναλλαγές των εποχών του έτους. Έτσι εμφανίζονται συνεχόμενες τιμές πάνω από την κεντρική τιμή καθώς και τιμές που υπερβαίνουν το ανώτερο όριο κατά τη διάρκεια των χειμερινών μηνών. Τα διαστήματα αυτά εναλλάσσονται με άλλα όπου συνεχόμενες τιμές υγρασίας είναι κάτω από την κεντρική τιμή καθώς και τιμές που είναι μικρότερες του κατώτερου ορίου. Τα διαστήματα αυτά αντιστοιχούν στους θερινούς ξηρούς μήνες. Η υγρή περίοδος των χειμερινών μηνών με τις βροχοπτώσεις και η ξηρή περίοδος των καλοκαιρινών μηνών όπου απουσιάζουν οι βροχοπτώσεις καθορίζουν λοιπόν την κυκλικότητα που εμφανίζει η υγρασία του μεταλλεύματος που η διαχείριση-αποθήκευση του γίνεται σε υπαίθριους χώρους.

Όσον αφορά τη μεταβολή της ετήσιας τιμής της υγρασίας δεν εμφανίζει κάποια τάση ή τιμές εκτός των ορίων του διαγράμματος ελέγχου.

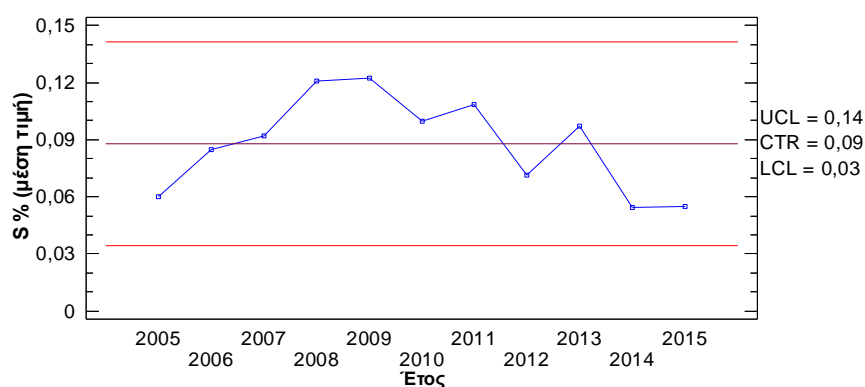
5.5 Κατασκευή μεμονωμένων διαγραμμάτων ελέγχου περιεκτικότητας θείου σε εβδομαδιαία, μηνιαία και ετήσια βάση



Σχήμα 5.14: Διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης για την εβδομαδιαία διακύμανση του S (%) από 01/11/2009 έως 13/01/2015. Η εβδομάδα Νο1 είναι εκείνη που αρχίζει στις 01/11/2009. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.



Σχήμα 5.15: Διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής και της τυπικής απόκλισης για την μηνιαία διακύμανση του S (%) από 01/11/2009 έως 13/01/2015. Ο μήνας Νο1 είναι εκείνος που αρχίζει στις 01/11/2009. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.



Σχήμα 5.16: Διάγραμμα ελέγχου της μέσης τιμής για την ετήσια διακύμανση του S (%) βασισμένο στις μηνιαίες τιμές από 01/01/2005 έως 13/01/2015. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.

Το θείο αποτελεί το ποιοτικό χαρακτηριστικό με τον μεγαλύτερο αριθμό περιπτώσεων εκτός του στατιστικού ελέγχου, ιδιαίτερα εκείνων των περιπτώσεων που είναι εκτός των ορίων στατιστικού ελέγχου. Αυτό προκύπτει τόσο από τα διαγράμματα ελέγχου μέσης τιμής όσο και από εκείνα της τυπικής απόκλισης σε εβδομαδιαία και μηνιαία βάση. Όσον αφορά τη μεταβολή της ετήσιας τιμής του θείου δεν εμφανίζει κάποια τάση ή τιμές εκτός των ορίων του διαγράμματος ελέγχου.

Στον πίνακα 5.1 δίνονται τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των περιπτώσεων εκτός στατιστικού ελέγχου που εντοπίστηκαν για τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του μεταλλεύματος για τις εβδομαδιαίες και μηνιαίες τιμές.

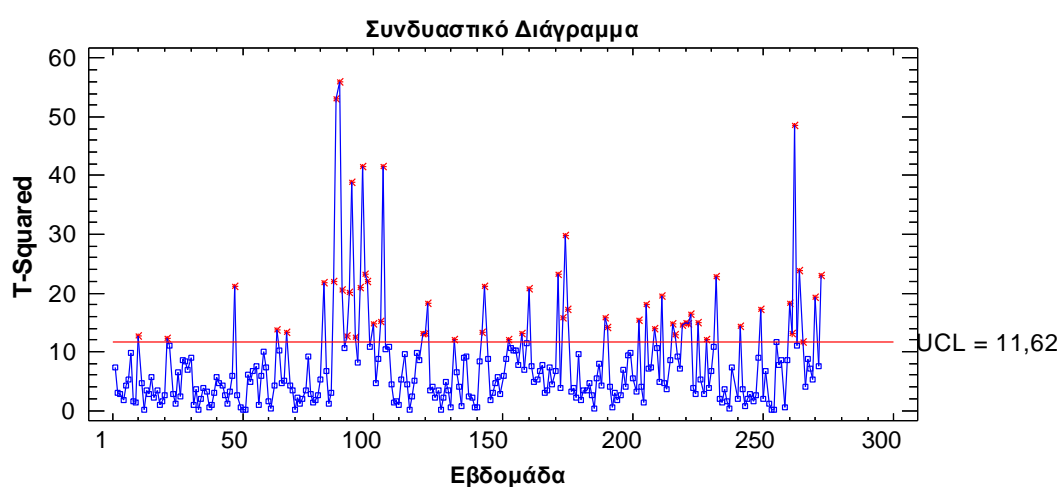
Πίνακας 5.1. Συγκεντρωτικός αριθμός των περιπτώσεων που βρίσκονται εκτός στατιστικού ελέγχου από τα μεμονωμένα διαγράμματα ελέγχου $\bar{x} - S$ για όλα τα ποιοτικά χαρακτηριστικά.

Χρονικό διάστημα	Εξεταζόμενο στατιστικό μέγεθος	Περιπτώσεις εκτός ορίων στατιστικού ελέγχου				
		Ni (%)	Fe _{total} (%)	SiO ₂ (%)	Υγρασία (%)	S (%)
Εβδομάδα	\bar{x}	53	71	116	126	61
	S	7	15	11	18	29
Μήνας	\bar{x}	22	33	43	46	29
	S	2	11	8	13	41

5.6 Διαγράμματα πολλαπλών χαρακτηριστικών

Μελετήθηκε με χρήση συνδυαστικού διαγράμματος Hotelling η ταυτόχρονη μεταβολή του σιδήρου Fe_{total} (%) και του διοξειδίου του πυριτίου και SiO_2 (%) διότι όπως παρατηρήθηκε στο κεφάλαιο 4, τα ποιοτικά αυτά χαρακτηριστικά συσχετίζονται σημαντικά.

Για την κατασκευή του συνδυαστικού διαγράμματος Hotelling υπολογίστηκε το μέγεθος T^2 για τις εβδομαδιαίες τιμές και η μεταβολή του δίνεται στο Σχήμα 5.17. Ο υπολογισμός του T^2 έγινε με βάση τις σχέσεις 3.22 – 3.31 του κεφαλαίου 3.5.



Σχήμα 5.17 : Συνδυαστικό διάγραμμα ελέγχου T^2 για την εβδομαδιαία διακύμανση του Fe_{total} (%) και SiO_2 (%) από 01/11/2009 έως και 13/01/2015. Η εβδομάδα No1 είναι εκείνη που αρχίζει στις 01/11/2009. Με κόκκινους αστερίσκους σημειώνεται οι περιπτώσεις που θεωρούνται εκτός στατιστικού ελέγχου.

Για την ερμηνεία του συνδυαστικού διαγράμματος έγινε σύγκριση του με τα αντίστοιχα απλά διαγράμματα Shewhart για τον σίδηρο και το διοξείδιο του πυριτίου. Ο αριθμός των περιπτώσεων που εντοπίστηκαν να είναι εκτός στατιστικού ελέγχου δίνεται στον Πίνακα 5.2

Πίνακας 5.2 : Περιπτώσεις εκτός στατιστικού ελέγχου με βάση τα μεμονωμένα διαγράμματα ελέγχου και από το συνδυαστικό διάγραμμα T^2 για τις εβδομαδιαίες τιμές των Fe_{total} και SiO_2 . Η εβδομάδα Νο1 είναι εκείνη που αρχίζει στις 01/11/2009.

Α/Α εβδομάδας	Εκτός στατιστικού ελέγχου		
	Fe_{total} %	SiO_2 %	T^2
7	29,82		
10	29,98		12,68
21			12,22*
47			21,10*
63		27,67	13,68
64	29,60		
67			13,23*
81	41,02		21,75
85	40,68	14,51	21,90
86	44,64	11,77	53,07
87	44,97	11,70	55,98
88	40,37	14,51	20,54
89	38,73		
90	39,46		12,73
91	40,66	15,53	20,04
92	43,25	13,60	38,92
93	39,37		12,53
95	40,86	15,64	20,98
96	43,65	14,17	41,44
97	41,27	15,88	23,15
98	41,11		21,96
99	38,95		
100	39,47	15,59	14,77
103	39,95		15,14
104	43,43	12,85	41,50
105		15,68	
106	38,62		
112		15,83	
117	38,76		
118	38,54		
119			13,14*
120			13,13*
121	40,51		18,30
131		15,90	11,97
135		15,95	
142			13,34*
143			21,18*
144		15,97	
152	39,20		12,04
153	38,68		
154		15,60	
157		15,38	13,09
159	38,87		
160		13,15	20,69
171	27,74	28,44	23,20
173	28,74	26,91	15,80
174	26,48	28,41	29,74
175	28,23		17,13
189	28,44		15,79
190	29,62		14,04

202		28,01	15,44
205		28,64	18,13
208		27,55	13,93
209	26,75		
211		29,14	19,44
215		27,73	14,70
216		27,25	12,90
217	26,67		
219		27,20	14,50
220			14,85*
221		27,49	14,70
222		28,26	16,40
225		27,88	14,94
228		27,25	12,05
231	26,67		
232		29,75	22,87
239	27,53		
241	29,20	27,06	14,41
249		28,70	17,30
260		27,68	18,29
261			13,01*
262		33,05	48,55
264		28,21	23,89
265			11,74*
270		27,82	19,26
272		29,62	22,95

Από τον Πίνακα 5.2 διαπιστώνεται ότι στην πλειοψηφία των περιπτώσεων που είναι εκτός στατιστικού ελέγχου έχουν ήδη εντοπιστεί και από τα μεμονωμένα διαγράμματα Shewhart. Εντοπίστηκαν όμως και περιπτώσεις όπου αν και στα μεμονωμένα διαγράμματα Shewhart δεν εμφανίζονταν εκτός στατιστικού ελέγχου καταστάσεις εμφανίζονταν στο συνδυαστικό διάγραμμα T^2 . Πρόκειται για περιπτώσεις όπου ο συνδυασμός των τιμών Fe_{total} και SiO_2 δεν είναι σε συμφωνία με την αρνητική συσχέτιση που έχουν δείξει αυτές οι παράμετροι ποιότητας. Οι περιπτώσεις αυτές επισημαίνονται με αστερίσκο στον πίνακα 5.2. Επιπλέον παρατηρήθηκε ότι σε αρκετές περιπτώσεις (17) όπου, ενώ υπήρχαν σημεία εκτός στατιστικού ελέγχου, είτε από το μεμονωμένο διάγραμμα ελέγχου του Fe_{total} (%), είτε από το SiO_2 (%), στη συνδυαστική περίπτωση δεν προέκυψε εκτός στατιστικού ελέγχου κατάσταση.

6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ ΚΑΙ ΠΡΟΤΑΣΕΙΣ

Από τον υπολογισμό των βασικών στατιστικών παραμέτρων και των συσχετίσεων των ποιοτικών χαρακτηριστικών των σιδηρονικελιούχων μεταλλευμάτων έδειξε ότι, τα στοιχεία νικέλιο, σίδηρος, διοξείδιο του πυριτίου και υγρασία ακολουθούν την κανονική κατανομή τόσο όσον αφορά τις ημερήσιες, εβδομαδιαίες, μηνιαίες και ετήσιες τιμές. Το θείο σε ημερήσια βάση ακολουθεί την λογαριθμική κατανομή, όμως οι μέσες εβδομαδιαίες, μηνιαίες και ετήσιες τιμές ακολουθούν την κανονική κατανομή. Όσον αφορά τις συσχετίσεις, με βάση την τιμή του συντελεστή συσχέτισης Pearson, τα μοναδικά στοιχεία που συσχετίζονται είναι ο σίδηρος και το διοξείδιο του πυριτίου.

Επιπλέον, η στατιστική ανάλυση των αποτελεσμάτων, έδειξε ότι το ποιοτικό χαρακτηριστικό που εμφανίζει την ισχυρότερη μεγαλύτερη διακύμανση (συντελεστής μεταβλητότητας) είναι το θείο. Ακολουθούν με σημαντικά μικρότερη μεταβλητότητα το διοξείδιο του πυριτίου και η υγρασία.

Η μελέτη της διαχρονικής μεταβολής των παραμέτρων ποιότητας (εβδομαδιαία, μηνιαία και ετήσια τιμή) με βάση τα διαγράμματα Shewhart, έδειξε:

- Η διαδικασία ανάμειξης-ομογενοποίησης λειτουργεί ικανοποιητικά και αποδοτικά.
- Το νικέλιο, που αποτελεί το βασικό ποιοτικό χαρακτηριστικό, παρουσιάζει σημαντική διακύμανση της μέσης εβδομαδιαίας και μηνιαίας τιμής του αφού εντοπίστηκαν πολλές περιπτώσεις εκτός στατιστικού ελέγχου καταστάσεις. Αντίθετα οι διακυμάνσεις των ημερήσιων τιμών εντός της εβδομάδας και του μήνα είναι μικρές. Η μελέτη της μακροχρόνιας διακύμανσης του νικελίου, έδειξε ότι το πλέον σημαντικό πρόβλημα, αποτελεί η διαρκής πτωτική πορεία της περιεκτικότητας σε Ni % η οποία μπορεί να αποδοθεί στην σταδιακή μετατόπιση της εκμετάλλευσης στα φτωχότερα τμήματα των σιδηρονικελιούχων κοιτασμάτων της περιοχής του Αγίου Ιωάννη.
- Όσον αφορά τα υπόλοιπα ποιοτικά χαρακτηριστικά, παρατηρείται ότι ο σίδηρος, το διοξείδιο του πυριτίου και το θείο παρουσιάζουν αρκετές εκτός ελέγχου καταστάσεις, όμως δεν εμφανίζουν κάποια μακροχρόνια τάση. Η διακύμανση της υγρασίας εμφανίζει κυκλικότητα η οποία σχετίζεται με τις εποχές του χρόνου.

- Από την κατασκευή του συνδυαστικού διαγράμματος Hotelling για το σίδηρο και το διοξείδιο του πυριτίου διαπιστώθηκε ότι η πλειοψηφία των περιπτώσεων που είναι εκτός στατιστικού ελέγχου έχουν ήδη εντοπιστεί και από τα μεμονωμένα διαγράμματα Shewhart. Όμως, εντοπίστηκε και ένας περιορισμένος αριθμός περιπτώσεων εκτός στατιστικού ελέγχου στο συνδυαστικό διάγραμμα που δεν είχαν εντοπιστεί από τα μεμονωμένα διαγράμματα. Η ταυτόχρονη χρήση του μεμονωμένα διαγράμματα επιφέρει μια σχετικά μικρή βελτίωση στην αποτελεσματικότητα του ελέγχου.

Λόγω της διαχρονικής τάσης μείωσης της περιεκτικότητας του μεταλλεύματος που εξορύσσεται από τα μεταλλεία του Αγίου Ιωάννη, θα πρέπει να εξεταστεί η δυνατότητα αύξησης της συμμετοχής στο μίγμα τροφοδοσίας του εργοστασίου των μεταλλευμάτων που προέρχονται κυρίως από τα ορυχεία της Καστοριάς (πλούσιο σε Ni) και δευτερευόντως από της Εύβοιας. Προτείνεται λοιπόν να εξεταστεί η δυνατότητα αύξησης της παραγωγής των μεταλλείων Καστοριάς και Ευβοίας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Διεθνής βιβλιογραφία

Aft, L., (1998), Fundamentals of Industrial Quality Control.

D, Bissell. (1994). Statistical Methods for SPC and TQM.

D, Montgomery. (1985). Introduction to Statistical Quality Control.

H. Ipek, H. Ankara & H. Ozdag (1999). Technical Note, The application of statistical process control. Pergamon. σελ.1-9

J.W. de V.Groenewald, L.P. Coetzer, C. Aldrich (2006). Statistical monitoring of a grinding circuit: An industrial case study. Elsevier, σελ.1-11

J.F. MacGregor & T. Kourti. (1994). Statistical process control of multivariate processes, Pergamon 3(3), σελ.1-12

Xiang, F., Ran-fengWang, & Dong, Z.-y. (2016). Application of a Shewhart control chart to monitor clean ash during coal preparation. Elsevier, International Journal of Mineral Processing. σελ.1-10

Ελληνική βιβλιογραφία

Αλεβίζος, Γ. (1997). Ορυκτολογία, γεωχημεία και γένεση ιζηματογενών νικελιούχων σιδηρομεταλλευμάτων Λοκρίδας (Κεντρική Ελλάδα). Διδακτορική διατριβή, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά. σελ.282.

Αντζουλάκος, Δ. (2008). Σημειώσεις παραδόσεων Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας, Τμήμα Στατιστικής και Ασφαλιστικής Επιστήμης. Πανεπιστήμιο Πειραιώς. σελ.26-34.

Αποστολίκας, Α. (2010). Κοιτασματολογία Νικελίου, εκδόσεις ΕΦΥΡΑ, Καστοριά.

Γαλετάκης, Μ. (2001). Ποιοτικός έλεγχος παραγωγής βασιζόμενος σε μετρήσεις πολλαπλών συσχετιζόμενων παραμέτρων. Η περίπτωση του λιγνιτωρυχείου του Ν. Πεδίου- Πτολεμαΐδας. Μεταλλευτική Τεχνολογία. σελ.1-10

Γαλετάκης, Μ. (2019). Σημειώσεις του μαθήματος του 8^{ου} εξαμήνου "Έλεγχος ποιότητας ορυκτών πρώτων υλών". Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά. σελ.91-134

Καντηράνης, Ν. Σημειώσεις του μαθήματος Πετρολογίας ιζηματογενών πετρωμάτων, Τμήμα Γεωλογίας, Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης.

Κωστάκης, Γ. (1988). Φυσικές ιδιότητες των ορυκτών, Σημειώσεις του μαθήματος, Τμήμα Μηχανικών Ορυκτών Πόρων, Πολυτεχνείο Κρήτης, Χανιά. σελ.33

Μιχαηλίδης, Κ. (1982). Κοιτασματολογική μελέτη των σιδηρονικελιούχων με χρώμιο λατεριτών της περιοχής Έδεσσας, Διδακτορική Διατριβή, Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης, σελ.363

Στουρνάρας, Γ. (1989). Σημειώσεις Τεχνικής Γεωλογίας, Μέρος Β'. Αθήνα: Πανεπιστήμιο Αθηνών, Τμήμα Γεωλογίας, Τομέας Δυναμικής-Τεκτονικής-Εφαρμοσμένης Γεωλογίας. Εκδόσεις Τζιόλας. σελ.428

Ταγαράς, Γ. (2001). Στατιστικός έλεγχος ποιότητας. Εκδόσεις ΖΗΤΗ. σελ.458

Τσέλιος, Δ. (2012). Σημειώσεις Εργαστηρίων του Μαθήματος Διοίκηση Ποιότητας, ΤΕΙ Λάρισας ΣΔΟ, Λάρισα.

Ιστοσελίδες

<http://www.larco.gr/content/koitasmatalogia.pdf> (ημερομηνία προσπέλασης 10/06/2019)

<http://artemis.library.tuc.gr/DT2013-0272/DT2013-0272.pdf> (ημερομηνία προσπέλασης 18/06/2019)

http://www.larco.gr/el.our_history.php (ημερομηνία προσπέλασης 28/06/2019)

<http://www.larco.gr/el.nickel.php> (ημερομηνία προσπέλασης 28/06/2019)

http://www.geo.auth.gr/courses/gmo/gmo645y/pdf_theory/ni.pdf (ημερομηνία προσπέλασης 30/06/2019)

<https://s3-us-west-2.amazonaws.com/prd-wret/assets/palladium/production/mineral-pubs/mcs/mcs2014.pdf> (ημερομηνία προσπέλασης 01/07/2019)