

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ



**ΤΜΗΜΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΙΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΣΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ**

**ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ
ΜΗ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ**

Βασιλική Χ. Ράδου

Διπλωματική Εργασία

που υποβλήθηκε στο Τμήμα Στατιστικής και Ασφαλιστικής
Επιστήμης του Πανεπιστημίου Πειραιώς ως μέρος των
απαιτήσεων για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού
Διπλώματος Ειδίκευσης στην Εφαρμοσμένη Στατιστική

Πειραιάς
Ιούνιος 2014

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ



**ΤΜΗΜΑ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗΣ
ΚΑΙ ΑΣΦΑΛΙΣΤΙΚΗΣ ΕΠΙΣΤΗΜΗΣ**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΣΤΗΝ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΗ ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ**

**ΤΕΧΝΙΚΕΣ ΕΛΕΓΧΟΥ
ΜΗ ΠΑΡΑΓΩΓΙΚΩΝ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ**

Βασιλική Χ. Ράδου

Διπλωματική Εργασία

που υποβλήθηκε στο Τμήμα Στατιστικής και Ασφαλιστικής
Επιστήμης του Πανεπιστημίου Πειραιώς ως μέρος των
απαιτήσεων για την απόκτηση του Μεταπτυχιακού
Διπλώματος Ειδίκευσης στην Εφαρμοσμένη Στατιστική

Πειραιάς
Ιούνιος 2014

Η παρούσα Διπλωματική Εργασία εγκρίθηκε ομόφωνα από την Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή που ορίστηκε από τη ΓΣΕΣ του Τμήματος Στατιστικής και Ασφαλιστικής Επιστήμης του Πανεπιστημίου Πειραιώς στην υπ' αριθμ. συνεδρίασή του σύμφωνα με τον Εσωτερικό Κανονισμό Λειτουργίας του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών στην Εφαρμοσμένη Στατιστική

Τα μέλη της Επιτροπής ήταν:

- Μπερσίμης Σωτήριος (Επιβλέπων)
- Αντζουλάκος Δημήτριος
- Ευαγγελάρας Χαράλαμπος

Η έγκριση της Διπλωματικής Εργασίας από το Τμήμα Στατιστικής και Ασφαλιστικής Επιστήμης του Πανεπιστημίου Πειραιώς δεν υποδηλώνει αποδοχή των γνώμων του συγγραφέα.

UNIVERSITY OF PIRAEUS



**DEPARTMENT OF STATISTICS
AND INSURANCE SCIENCE**

**POSTGRADUATE PROGRAM IN
APPLIED STATISTICS**

**TECHNIQUES FOR CONTROLLING
NON-MANUFACTURING PROCESSES**

By

Vasiliki Ch. Radou

MSc Dissertation

submitted to the Department of Statistics and Insurance
Science of the University of Piraeus in partial fulfilment of
the requirements for the degree of Master of Science in
Applied Statistics

Piraeus, Greece
June 2014

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

Στους συμφοιτητές μου

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

Ευχαριστίες

Ευχαριστώ θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου κύριο Σωτήριο Μπερσίμη για το θέμα που μου εμπιστεύτηκε, την πολύτιμη βοήθεια και την συμβουλευτική κατεύθυνση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας, καθώς και τα μέλη της τριμελούς επιτροπής κ.κ. Αντζουλάκο Δ. και Ευαγγελάρα Χ. για τον χρόνο που αφιέρωσαν στη μελέτη και διόρθωσή της.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θέλω να εκφράσω και στους συναδέλφους μου Γιώργο Τσάκο και Στέφανο Παπαθανασίου για την διάθεση του περιορισμένου χρόνου τους και την πολύτιμη βοήθειά τους στη συλλογή και επεξεργασία των δεδομένων της εφαρμογής.

Τέλος, ένα μεγάλο «ευχαριστώ» στην οικογένειά μου για την συνεχή στήριξη που μου παρείχε όλα αυτά τα χρόνια, στην αδερφή μου για την κατανόηση και τις υποχωρήσεις που έκανε όλο το διάστημα των μεταπτυχιακών μου σπουδών και φυσικά στους φίλους μου για την υπομονή και την συμπαράστασή τους.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

Περίληψη

Ο Στατιστικός Έλεγχος Διεργασιών αποτελείται από ένα σύνολο στατιστικών μεθόδων και εργαλείων που χρησιμοποιούνται για την διασφάλιση της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων. Αν και αρχικά οι τεχνικές αυτές χρησιμοποιήθηκαν εκτενώς για τον έλεγχο αποκλειστικά βιομηχανικών διεργασιών, τα τελευταία χρόνια η χρήση τους έχει επεκταθεί σε ποικίλους τομείς εκτός της βιομηχανίας, όπως ο οικονομικός τομέας, το περιβάλλον, ο τομέας της υγείας, οι υπηρεσίες, η εκπαίδευση και πολλοί άλλοι.

Η παρούσα εργασία στοχεύει στην καταγραφή μιας σειράς από νέα πεδία εφαρμογής του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών, καθώς και στην διερεύνηση κάποιων θεμελιωδών ζητημάτων που προκύπτουν από την εξάπλωση των μεθόδων αυτών πέραν του βιομηχανικού κλάδου. Για την επίτευξη του σκοπού αυτού, στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται μια λεπτομερής παρουσίαση της έννοιας και των βασικών εργαλείων του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών, ενώ στο 3^ο κεφάλαιο περιλαμβάνεται μια πλήρης βιβλιογραφική ανασκόπηση των εφαρμογών του σε μη βιομηχανικές διεργασίες. Τέλος, στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια ακόμη μη βιομηχανική εφαρμογή από τον χώρο των υπηρεσιών συντήρησης αεροπλάνων, που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας με απώτερο σκοπό την ανάδειξη της λειτουργίας και της χρησιμότητας των τεχνικών του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών σε μη παραγωγικές διεργασίες.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

Abstract

Statistical Process Control consists of a set of statistical methods and tools used to ensure product quality. Initially, those techniques were extensively used in industry to keep manufacturing processes under control. Over the last years, though, their use has been expanded including various fields beside industry, such as economics, environment, healthcare, general services, education etc.

The aim of this thesis is to list a series of new application fields of Statistical Process Control. Also, it aims to discuss some fundamental issues arising from the expansion of those methods beyond the industrial sector. To achieve this goal, in chapter 2 takes place a detailed presentation of the concept and the basic tools of Statistical Process Control, while chapter 3 includes a thorough literature review of Statistical Process Control applications in non-manufacturing processes. Finally, in chapter 4, it is presented one new non-manufacturing application concerning maintenance services for wind farms, which was accomplished under the present thesis in the ultimate aim of designating the operational modes and utility of Statistical Process Control techniques in non-manufacturing processes.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	vii
Περίληψη	ix
Abstract	xi
Περιεχόμενα	xiii
1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	1
2. ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΟΣ ΕΛΕΓΧΟΣ ΔΙΕΡΓΑΣΙΩΝ	5
2.1. Εισαγωγή	5
2.2. Στατιστικός Έλεγχος Διεργασιών	6
2.2.1. Τα 7 κύρια Εργαλεία του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών	6
2.2.2. Κοινή και Ειδική Μεταβλητότητα	7
2.3. Διαγράμματα Ελέγχου	8
2.3.1. Περιγραφή ενός τυπικού Διαγράμματος Ελέγχου	8
2.3.2. Όρια Ελέγχου	9
2.3.3. Φάση I και Φάση II	11
2.3.4. Ταξινόμηση των Διαγραμμάτων Ελέγχου	12
2.4. Διαγράμματα Ελέγχου για Μεταβλητές	14
2.4.1. Διαγράμματα Ελέγχου τύπου Shewhart	14
2.4.1.1. Διάγραμμα Ελέγχου μέσης τιμής και εύρους $\bar{X} - R$ για δείγματα μεγέθους $n > 1$	14
2.4.1.2. Διάγραμμα Ελέγχου μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης $\bar{X} - S$ για δείγματα μεγέθους $n > 1$	18
2.4.1.3. Διαγράμματα Ελέγχου τύπου Shewhart για μεμονωμένες παρατηρήσεις ($n = 1$)	20
2.4.2. Αθροιστικά Διαγράμματα Ελέγχου (<i>CUSUM charts</i>)	23
2.4.2.1. Η Αλγοριθμική Μέθοδος για την παρακολούθηση του μέσου της διεργασίας	24
2.4.2.2. Η Μέθοδος V-Mask για την παρακολούθηση του μέσου της διεργασίας	25
2.4.2.3. Διάγραμμα Ελέγχου CUSUM για τη παρακολούθηση της διασποράς (<i>Scale CUSUM</i>)	26
2.4.3. Διαγράμματα Ελέγχου EWMA (<i>Exponentially Weighted Moving Average</i>)	27
2.4.3.1. Διάγραμμα Ελέγχου EWMA για την παρακολούθηση του μέσου της διεργασίας ($n = 1$)	27
2.4.3.2. Διάγραμμα Ελέγχου EWMA για την παρακολούθηση του μέσου της διεργασίας ($n > 1$)	29
2.4.3.3. Διάγραμμα Ελέγχου EWRMS για την παρακολούθηση της διασποράς	29
2.4.4. Διαγράμματα Ελέγχου Κινούμενου Μέσου (<i>Moving Average Control Charts</i>)	30
2.5. Διαγράμματα Ελέγχου για Ιδιότητες	32
2.5.1. Διάγραμμα Ελέγχου για το ποσοστό των ελαττωματικών προϊόντων (<i>p chart</i>)	32
2.5.2. Διάγραμμα Ελέγχου για τον αριθμό των ελαττωματικών προϊόντων (<i>np chart</i>)	35
2.5.3. Διάγραμμα Ελέγχου για τον αριθμό των ελαττωμάτων (<i>c chart</i>)	35
2.5.4. Διάγραμμα Ελέγχου για τον μέσο αριθμό ελαττωμάτων (<i>u chart</i>)	37
2.6. Διαγράμματα Ελέγχου υπό την παρουσία Αυτοσυσχέτισης	39
2.7. Πολυμεταβλητά Διαγράμματα Ελέγχου	42
2.7.1. <i>Hotteling T²</i> Διάγραμμα Ελέγχου	43
2.7.1.1. Μέγεθος δείγματος $n > 1$	43
2.7.1.2. Μέγεθος δείγματος $n = 1$	46

2.7.2.	Διάγραμμα Ελέγχου για την παρακολούθηση της διασποράς	47
2.7.3.	Διάγραμμα Ελέγχου MEWMA	49
3.	ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΜΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΕΦΑΡΜΟΓΩΝ	51
3.1.	Εισαγωγή	51
3.2.	Τομείς εφαρμογής	52
3.2.1.	Υγεία	56
3.2.1.1.	Εφαρμογές με χρήση διαγραμμάτων ελέγχου Shewhart	56
3.2.1.2.	Εφαρμογές με χρήση εξελιγμένων διαγραμμάτων ελέγχου	59
3.2.2.	Μηχανική και Περιβάλλον	62
3.2.2.1.	Εφαρμογές με χρήση διαγραμμάτων ελέγχου Shewhart	62
3.2.2.2.	Εφαρμογές με χρήση εξελιγμένων διαγραμμάτων ελέγχου	65
3.2.3.	Γενικές Υπηρεσίες	68
3.2.3.1.	Εφαρμογές με χρήση διαγραμμάτων ελέγχου Shewhart	69
3.2.3.2.	Εφαρμογές με χρήση εξελιγμένων διαγραμμάτων ελέγχου	72
3.2.4.	Πληροφορική	75
3.2.5.	Προβλέψεις	77
3.3.	Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα	79
4.	ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ : ΣΥΝΤΗΡΗΣΗ ΑΙΟΛΙΚΩΝ ΠΑΡΚΩΝ	83
4.1.	Εισαγωγή	83
4.2.	Συντήρηση Αιολικών Πάρκων	84
4.3.	Το Περιβάλλον Εφαρμογής	86
4.3.1.	Η εταιρία	87
4.3.2.	Διαδικασίες συντήρησης	87
4.3.3.	Διαδικασία συλλογής και αποθήκευσης δεδομένων	89
4.4.	Περιγραφή του Προβλήματος και των Δεδομένων	89
4.4.1.	Επιλογή της κατάλληλης μεταβλητής	90
4.4.2.	Επιλογή των δεδομένων	91
4.4.3.	Παρουσίαση των δεδομένων	93
4.5.	Εφαρμογή Διαγραμμάτων Ελέγχου	94
4.5.1.	Βλάβη 104	94
4.5.2.	Βλάβη 402	104
4.5.3.	Βλάβη 411	112
4.6.	Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα	118
5.	ΓΕΝΙΚΑ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	121
	Παραρτήματα	125
Π1.	Δεδομένα βλάβης 104	127
Π2.	Δεδομένα βλάβης 402	130
Π3.	Δεδομένα βλάβης 411	131
	Βιβλιογραφία	133

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

Εισαγωγή

Η ποιότητα αναμφίβολα είναι σήμερα ένας από τους πιο σημαντικούς παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή του καταναλωτή ανάμεσα σε ανταγωνιστικά προϊόντα και υπηρεσίες. Οι επιχειρήσεις για να επιβιώσουν και να διαφοροποιηθούν πρέπει να εφαρμόζουν βιώσιμες στρατηγικές ανάπτυξης και να υιοθετούν μεθόδους που να διασφαλίζουν την ποιότητα στα παραγόμενα προϊόντα. Ο Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας (*Statistical Quality Control*) είναι ένα από τα πιο αξιόπιστα εργαλεία για την παρακολούθηση του παραγόμενου προϊόντος εξασφαλίζοντας ότι οι διεργασίες παραγωγής βρίσκονται υπό έλεγχο, ενώ παράλληλα επιτυγχάνει τη μακροχρόνια επιβίωση και ειδικότερα την κερδοφορία των επιχειρήσεων μέσα από την ικανοποίηση των πελατών τους (Montgomery, 2004).

Αν και παραδοσιακά η ποιότητα και τα αντίστοιχα εργαλεία διασφάλισής της έχουν χρησιμοποιηθεί κυρίως από βιομηχανικές μονάδες, τα τελευταία χρόνια η ανάγκη για ποιοτικά προϊόντα έχει υπεισέλθει και σε άλλους τομείς εκτός της βιομηχανίας. Η υγεία, οι υπηρεσίες, το περιβάλλον, η εκπαίδευση είναι κάποιοι μόνο από τους κλάδους που αξιοποίησαν επιτυχώς τέτοιου είδους μεθόδους, αποδεικνύοντας την αποτελεσματικότητά τους πέραν των τυπικών παραγωγικών διεργασιών. Αυτή η σημαντική διεύρυνση της χρήσης των μεθόδων του Στατιστικού Ελέγχου Ποιότητας σε τομείς εκτός της βιομηχανίας είναι και το κύριο θέμα της παρούσας εργασίας. Συγκεκριμένα, η εργασία αυτή ασχολείται με τον Στατιστικό Έλεγχο Διεργασιών (*Statistical Process Control*), ένα υποσύνολο του Στατιστικού Ελέγχου Ποιότητας, που χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση και τον έλεγχο της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων κατά της διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας, και τους τρόπους με τους οποίους η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε μη βιομηχανικές διεργασίες. Κύριος στόχος είναι να εντοπιστούν οι τομείς στους οποίους μέχρι σήμερα έχουν αξιοποιηθεί αυτά τα εργαλεία, οι τεχνικές που επιλέχθηκαν ή προτάθηκαν για τον έλεγχο των διεργασιών και τα προβλήματα που πιθανώς προκύπτουν από την χρήση των εργαλείων του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών σε μη παραγωγικές διεργασίες.

Το δεύτερο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας είναι κυρίως θεωρητικό και περιλαμβάνει αρχικά κάποια γενικά-εισαγωγικά στοιχεία για τον Στατιστικό Έλεγχο Διεργασιών. Το

υπόλοιπο, και μεγαλύτερο μέρος του κεφαλαίου, επικεντρώνεται στην περιγραφή του κύριου εργαλείου του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών που είναι τα Διαγράμματα Ελέγχου (*Control Charts*). Τα Διαγράμματα Ελέγχου βοηθούν στην έγκαιρη ανίχνευση των μη συμμορφούμενων με τις προδιαγραφές παραγόμενων προϊόντων και κατ' επέκταση στον άμεσο εντοπισμό των αιτιών που προκαλούν αυτήν την παρέκκλιση και την διόρθωσή τους, ώστε να διατηρείται συνεχώς η ποιότητα της παραγωγής σε υψηλά επίπεδα. Η δομή του κεφαλαίου διακρίνεται σε τέσσερις μεγάλες κατηγορίες διαγραμμάτων ελέγχου, και συγκεκριμένα στα διαγράμματα ελέγχου για μεταβλητές (*Control Charts for Variables*), στα διαγράμματα ελέγχου για ιδιότητες (*Control Charts for Attributes*), στα διαγράμματα ελέγχου υπό την παρουσία Αυτοσυσχέτισης (*Control Charts for Autocorrelated Data*) και στα Πολυμεταβλητά διαγράμματα ελέγχου (*Multivariate Control Charts*). Καθεμία από αυτές τις ενότητες περιλαμβάνει τους πιο γνωστούς τύπους διαγραμμάτων ελέγχου που έχουν προταθεί στη βιβλιογραφία και χρησιμοποιούνται ανάλογα με το μέγεθος ή τη φύση του διαθέσιμου δείγματος και τον σκοπό που εφαρμόζονται. Συγκεκριμένα, το Κεφάλαιο 2 της παρούσας εργασίας περιλαμβάνει τη στατιστική θεωρία βάσει της οποίας κατασκευάζονται τα διαγράμματα ελέγχου *Shewhart* $\bar{X} - R$, $\bar{X} - S$, $I - MR$, *CUSUM*, *EWMA*, *MA*, p , np , c , u , *ARIMA*, *Hotteling T²* και *MEWMA*.

Στο 3^ο κεφάλαιο ακολουθεί η βιβλιογραφική ανασκόπηση των μη βιομηχανικών εφαρμογών του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών που έχουν δημοσιευθεί από το 1989 έως τα μέσα του 2014. Το 2001, οι MacCathy and Wasusri δημοσίευσαν μια παρόμοια ανασκόπηση για τα έτη 1989 έως και 2000 και στην εργασία αυτή ουσιαστικά επεκτείνεται η δουλειά τους για τα έτη 2001 έως σήμερα. Συνολικά παρουσιάζονται 104 εφαρμογές, οι οποίες κατηγοριοποιήθηκαν σε πέντε τομείς ανάλογα με το κύριο αντικείμενο που μελετάνε. Επιπλέον, οι μελέτες χωρίστηκαν ανάλογα με την τεχνική που χρησιμοποιήθηκε στην εφαρμογή και παρατίθεται μια μικρή περίληψη αυτών που παρουσιάζουν μεγαλύτερο ενδιαφέρον. Σκοπός του κεφαλαίου είναι να αναδείξει τη δυνατότητα χρήσης των διαγραμμάτων ελέγχου στους ποικίλους τομείς εκτός της βιομηχανίας, και να παρουσιάσει τις μεθόδους αξιοποίησής τους πρακτικά.

Στο 4^ο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια μη βιομηχανική εφαρμογή των μεθόδων του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών στις υπηρεσίες συντήρησης αιολικών πάρκων, χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα από μια εταιρία που δραστηριοποιείται στον κλάδο αυτό. Η μεταβλητή που επιλέχθηκε για την κατασκευή των διαγραμμάτων ελέγχου

περιγράφει τον χρόνο που οι τεχνικοί συντήρησης της εταιρίας χρειάζονται για να επισκευάσουν μια βλάβη σε μια ανεμογεννήτρια και τα διαγράμματα που χρησιμοποιήθηκαν στην εφαρμογή είναι τα *I-MR*, *EWMA* και *ARIMA* για μεμονωμένες παρατηρήσεις. Στην αρχή του κεφαλαίου γίνεται μια περιγραφή της εταιρίας και του τρόπου που λειτουργεί, και στη συνέχεια παρατίθενται αναλυτικά όλα τα στάδια της διαδικασίας που ακολουθήθηκε, από την παρουσίαση του προβλήματος και των διαθέσιμων δεδομένων μέχρι την επιλογή της μεταβλητής που παρακολουθήθηκε και την κατασκευή των διαγραμμάτων ελέγχου. Στο τέλος του κεφαλαίου ακολουθεί συζήτηση των αποτελεσμάτων και προτάσεις για την μελλοντική χρήση των εργαλείων του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών από την υπό μελέτη εταιρία.

Τέλος, το 5^ο και τελευταίο κεφάλαιο περιλαμβάνει κάποια γενικά συμπεράσματα και σχόλια για την χρήση των εργαλείων του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών σε μη βιομηχανικές διεργασίες, όπως προέκυψαν τόσο από την βιβλιογραφική ανασκόπηση όσο και από την εφαρμογή που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

Στατιστικός Έλεγχος Διεργασιών

2.1 Εισαγωγή

Ο Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας (*Statistical Quality Control*) αναπτύχθηκε αρχικά ως ένα σύνολο τεχνικών στατιστικής ανάλυσης με επιμέρους στόχους τον δειγματοληπτικό έλεγχο σε παρτίδες προϊόντων πριν διανεμηθούν στην αγορά, τη συνεχή παρακολούθηση και έλεγχο των παραγωγικών διεργασιών και τη διεξαγωγή πειραμάτων με στόχο τη βελτίωση της παραγωγικής διαδικασίας. Το σύνολο των τεχνικών αυτών μπορεί να διαχωριστεί σε τρία κύρια υποσύνολα :

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

Ο Σχεδιασμός και η Ανάλυση Πειραμάτων εφαρμόζονται στο αρχικό στάδιο του σχεδιασμού του προϊόντος και της παραγωγικής διεργασίας. Στο στάδιο αυτό εντοπίζονται οι μεταβλητές που επηρεάζουν τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του προϊόντος και καθορίζονται οι βέλτιστες τιμές τους, οι οποίες χρησιμοποιούνται κατά την παραγωγή και συνεπώς επηρεάζουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Ο Στατιστικός Έλεγχος Διεργασιών εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διεργασίας και έχει ως βασικό στόχο να εξαλείψει την πιθανότητα παραγωγής προϊόντων εκτός προδιαγραφών. Τέλος, η Δειγματοληψία Αποδοχής εφαρμόζεται μετά την παραγωγή, επί των τελικών προϊόντων, και στοχεύει στην προστασία του καταναλωτή και του παραγωγού από τη διοχέτευση στην αγορά προϊόντων εκτός των προδιαγραφών (Μπερσίμης και Μαραβελάκης, 2006).

Παρόλο που οι τεχνικές αυτές αρχικά αναπτύχθηκαν για τον έλεγχο και την βελτίωση της ποιότητας των βιομηχανικών προϊόντων, τα τελευταία χρόνια το φάσμα εφαρμογής τους έχει επεκταθεί σε ποικίλους τομείς εκτός της βιομηχανίας, όπως είναι οι υπηρεσίες, ο οικονομικός τομέας, η εκπαίδευση, το περιβάλλον κ.α..

2.2 Στατιστικός Έλεγχος Διεργασιών

Ο Στατιστικός Έλεγχος Διεργασιών (*Statistical Process Control*) εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια της παραγωγικής διεργασίας, σε πραγματικό χρόνο, με στόχο την εξάλειψη της πιθανότητας παραγωγής προϊόντων εκτός των προδιαγραφών. Στηρίζεται στον στατιστικό έλεγχο των κρίσιμων σημείων της παραγωγικής διεργασίας (π.χ. εκείνων που έχουν καθοριστεί με την υιοθέτηση ενός συστήματος ποιότητας, όπως το HACCP), τα οποία συνδέονται με τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του τελικού προϊόντος. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται η σταθερότητα της παραγωγικής διεργασίας και κατά συνέπεια η ποιότητα των τελικών προϊόντων. Αυτό συμβαίνει επειδή οι τεχνικές του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών δρουν προληπτικά και επιτυγχάνουν την άμεση αναγνώριση ενός συστηματικού παράγοντα μεταβλητότητας πριν αυτός ανιχνευθεί από τους αντίστοιχους μηχανισμούς ασφαλείας των ίδιων των μηχανημάτων (Μπερσίμης και Μαραβελάκης, 2006).

2.2.1 Τα 7 κύρια Εργαλεία του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών

Τα επτά κύρια εργαλεία του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών που χρησιμοποιούνται με σκοπό να επιτυγχάνεται η σταθερότητα μιας διεργασίας μέσω της μείωσης της μεταβλητότητας, είναι γνωστά ως “*the magnificent seven*” και είναι τα ακόλουθα:

- Το Ιστόγραμμα ή το Διάγραμμα Μίσχου-Φύλλων (*Histogram or Stem-and-Leaf Plot*)
- Το Φύλλο Ελέγχου (*Check Sheet*)
- Το Διάγραμμα Pareto (*Pareto Chart*)
- Το Διάγραμμα Αιτίας-Αποτελέσματος (*Cause-and-Effect Diagram*)
- Το Διάγραμμα Συγκέντρωσης Ελαττωμάτων (*Defect Concentration Diagram*)
- Το Διάγραμμα Διασποράς ή Διασκόρπισης (*Scatter Plot*)
- Το Διάγραμμα Ελέγχου (*Control Chart*)

Από τα παραπάνω, τα διαγράμματα ελέγχου, τα οποία εισήχθησαν το 1924 από τον Walter A. Shewhart, είναι πιο εξελιγμένα και περισσότερο δομημένα από τα υπόλοιπα και θα αποτελέσουν το κύριο εργαλείο της παρούσας εργασίας.

2.2.2 Κοινή και Ειδική Μεταβλητότητα

Σε κάθε παραγωγική διεργασία, ανεξάρτητα από το πόσο καλά σχεδιασμένη είναι και το πόσο προσεκτικά επιβλέπεται και συντηρείται, υπάρχει πάντα μια μορφή μεταβλητότητας. Η μεταβλητότητα αυτή διακρίνεται στην κοινή και την ειδική μεταβλητότητα. Η κοινή μεταβλητότητα είναι η φυσική μεταβλητότητα που υπάρχει σε κάθε παραγωγική διαδικασία και προέρχεται από το άθροισμα της μεταβλητότητας πολλών μικρών αιτιών οι οποίες είναι αδύνατον να αποφευχθούν. Η ύπαρξή της οφείλεται στην τύχη και δεν μπορεί να αποδοθεί σε ελέγξιμους παράγοντες ούτε και να μειωθεί ή να εξαφανιστεί. Μια παραγωγική διεργασία που λειτουργεί υπό την παρουσία μόνο κοινής μεταβλητότητας θεωρείται ότι βρίσκεται εντός ελέγχου (*in control process*) ή σε ευσταθή κατάσταση (*stable state*).

Η ειδική μεταβλητότητα είναι αποτέλεσμα μη τυχαίων παραγόντων. Αυτοί προκαλούν ετερογένεια στη διεργασία με αποτέλεσμα να την επηρεάζουν και να οδηγούν σε παραγόμενα προϊόντα χαμηλής ποιότητας. Τέτοιοι παράγοντες μπορεί να είναι μικρές απορρυθμίσεις στα μηχανήματα, εσφαλμένη λειτουργία ορισμένων εξαρτημάτων, λάθη των χειριστών των μηχανημάτων κ.α.. Οι αιτίες που οδηγούν στην παρουσία ειδικής μεταβλητότητας ονομάζονται ειδικές ή συστηματικές αιτίες μεταβλητότητας (*special or assignable causes of variation*) και μια διεργασία που λειτουργεί υπό την παρουσία ειδικής μεταβλητότητας αναφέρεται ως εκτός ελέγχου διεργασία (*out of control process*) ή ότι λειτουργεί σε ασταθή κατάσταση (*unstable state*) (Μπερσίμης και Μαραβελάκης, 2006).

Στόχος των τεχνικών του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών είναι ο έγκαιρος εντοπισμός της ειδικής μεταβλητότητας που παρουσιάζεται στην παράμετρο-μεταβλητή X της παραγωγικής διεργασίας, πριν αυτή βγει εκτός των ορίων προδιαγραφών της (*specifications limits*). Τα όρια προδιαγραφών καθορίζονται στη φάση του σχεδιασμού του προϊόντος και αποτελούνται από το κάτω και το άνω όριο προδιαγραφών (*lower and upper specification limits, LSL and USL*). Οι τιμές του ποιοτικού χαρακτηριστικού για κάθε παραγόμενο προϊόν, προκειμένου να είναι ποιοτικά αποδεκτό, θα πρέπει να βρίσκονται εντός αυτών των ορίων. Τα πιο γνωστά και ευρέως χρησιμοποιούμενα εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση σε πραγματικό χρόνο ειδικών αιτιών μεταβλητότητας σε μια διεργασία, είναι τα διαγράμματα ελέγχου (*control charts*).

2.3 Διαγράμματα Ελέγχου

Τα διαγράμματα ελέγχου είναι η γραφική απεικόνιση ενός ή και περισσότερων ποιοτικών χαρακτηριστικών μιας παραγωγικής διεργασίας και χρησιμοποιούν την κατανομή και τις παραμέτρους αυτού ή αυτών των ποιοτικών χαρακτηριστικών προκειμένου να ανιχνεύσουν την πιθανή ύπαρξη ανωμαλιών στην παραγωγική διεργασία. Με άλλα λόγια, το χαρακτηριστικό X μιας σταθερής παραγωγικής διεργασίας ακολουθεί μια συγκεκριμένη κατανομή με συγκεκριμένες παραμέτρους (μέση τιμή και διακύμανση). Στην περίπτωση όμως που εμφανιστεί ειδική μεταβλητότητα, τότε αυτό μπορεί να επιφέρει αλλαγή στην κατανομή των τιμών αυτού του χαρακτηριστικού, είτε αλλάζοντας (μετατοπίζοντας) τον μέσο της κατανομής, είτε αλλάζοντας την διακύμανση της κατανομής, είτε αλλάζοντας και τα δύο ταυτόχρονα. Οι τεχνικές του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών, και συγκεκριμένα τα διαγράμματα ελέγχου, ανιχνεύουν έγκαιρα τέτοιου είδους αλλαγές σε μια διεργασία με σκοπό να γίνουν άμεσα οι κατάλληλες διορθωτικές ενέργειες προτού κατασκευαστούν αρκετά προϊόντα μη συμμορφούμενα (*nonconforming*) με τις προδιαγραφές.

2.3.1 Περιγραφή ενός τυπικού Διαγράμματος Ελέγχου

Στις παραγωγικές διεργασίες παρακολουθείται η συμπεριφορά μιας κρίσιμης ποσότητας ενός (μετρήσιμου) χαρακτηριστικού X (τυχαία μεταβλητή) των προϊόντων που παράγονται. Η διαδικασία παρακολούθησης της κρίσιμης ποσότητας βασίζεται σε μετρήσεις του χαρακτηριστικού X , όπως αυτές προκύπτουν από την επιλογή τυχαίων δειγμάτων προϊόντων από την παραγωγή σε διαφορετικές χρονικές στιγμές στις οποίες αντιστοιχούν τυχαία δείγματα τιμών του χαρακτηριστικού X , έστω τα X_1, X_2, \dots . Χρησιμοποιώντας τα τυχαία δείγματα X_1, X_2, \dots υπολογίζεται η τιμή $W_i = g(X_i)$, $i=1, 2, \dots$, μιας κατάλληλης στατιστικής συνάρτησης (τυχαίας μεταβλητής) που εκτιμά (συνήθως αμερόληπτη εκτιμήτρια) την κρίσιμη ποσότητα που μελετάται (π.χ. μέση τιμή ή διακύμανση της X). Έτσι η (διαχρονική) παρακολούθηση της συμπεριφοράς της κρίσιμης ποσότητας επιτυγχάνεται με την παρακολούθηση των τιμών που λαμβάνει η στατιστική συνάρτηση W στα διάφορα δείγματα.

Ένα τυπικό διάγραμμα ελέγχου είναι μια διδιάστατη γραφική παράσταση της εξέλιξης μιας διεργασίας στην πάροδο του χρόνου. Ο οριζόντιος άξονας του γραφήματος αντιπροσωπεύει είτε το χρόνο είτε τα δείγματα προϊόντων που επιλέχθηκαν τυχαία από την παραγωγή (σε διαφορετικές χρονικές στιγμές). Τα δείγματα αυτά τοποθετούνται σε

χρονολογική σειρά έτσι ώστε αριστερά να εμφανίζεται το πρώτο δείγμα που λαμβάνεται και κάθε νέο αποκτηθέν δείγμα να εμφανίζεται προς τα δεξιά. Ο κάθετος άξονας αντιπροσωπεύει την τιμή της στατιστικής συνάρτησης W . Οι τιμές της $W_i, i=1,2,\dots$ απεικονίζονται με σημεία τα οποία είναι ενωμένα με μια τεθλασμένη γραμμή. Ένα τυπικό διάγραμμα ελέγχου περιλαμβάνει επίσης τρεις παράλληλες οριζόντιες γραμμές, μία κεντρική γραμμή και δύο όρια ελέγχου. Η κεντρική γραμμή (*Center Line, CL*) ή μέσο επίπεδο της διεργασίας παριστάνει συνήθως τη μέση τιμή (*mean value*) της στατιστικής συνάρτησης W όπως αυτή προκύπτει από τη λειτουργία μιας εντός ελέγχου διεργασίας ή την τιμή στόχο του προϊόντος. Οι δύο γραμμές πάνω και κάτω από την κεντρική γραμμή ονομάζονται άνω και κάτω όρια ελέγχου (*upper and lower control limits, UCL and LCL*). Όσο οι τιμές (σημεία) της W εμφανίζονται εντός των ορίων ελέγχου και η συμπεριφορά τους είναι “τυχαία”, η διεργασία θεωρείται ότι παραμένει εντός στατιστικού ελέγχου και δεν χρειάζεται να γίνει κάποια διορθωτική ενέργεια. Αν όμως κάποιο σημείο βρεθεί εκτός των ορίων ελέγχου, τότε υπάρχει ένδειξη ότι η διεργασία είναι εκτός στατιστικού ελέγχου και πρέπει να γίνει έρευνα για να ανακαλυφθούν οι ειδικές αιτίες μεταβλητότητας που είναι υπεύθυνες για αυτή τη συμπεριφορά, και αν κριθεί απαραίτητο να ακολουθήσουν κατάλληλες διορθωτικές ενέργειες (Αντζουλάκος, 2010).

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

2.3.2 Όρια Ελέγχου

Ο προσδιορισμός των ορίων ελέγχου είναι μια από τις πιο σημαντικές αποφάσεις που πρέπει να ληφθούν κατά το σχεδιασμό ενός διαγράμματος ελέγχου. Μετακινώντας τα όρια ελέγχου μακριά από την κεντρική γραμμή μειώνεται η πιθανότητα σφάλματος τύπου I, δηλαδή η πιθανότητα ένα σημείο να βρεθεί πέραν των ορίων ελέγχου, καταδεικνύοντας μια κατάσταση εκτός ελέγχου χωρίς να υπάρχει κάποιο εμφανές ειδικό αίτιο. Επιπλέον, επιμηκύνοντας τα όρια ελέγχου αυξάνεται η πιθανότητα σφάλματος τύπου II, δηλαδή η

πιθανότητα ένα σημείο να βρεθεί εντός των ορίων ελέγχου όταν η διεργασία στην πραγματικότητα είναι εκτός στατιστικού ελέγχου. Αν τα όρια ελέγχου μετακινηθούν πιο κοντά στην κεντρική γραμμή θα συμβεί το αντίθετο, δηλαδή η πιθανότητα σφάλματος τύπου I θα αυξηθεί ενώ η πιθανότητα σφάλματος τύπου II θα μειωθεί. Για την κατασκευή των ορίων ελέγχου υπάρχουν δύο μέθοδοι: το μοντέλο ορίων σίγμα (*sigma limits model*) και το μοντέλο ορίων πιθανότητας (*probability limits model*).

Στο μοντέλο ορίων σίγμα για την κατασκευή ενός διαγράμματος ελέγχου η κεντρική γραμμή καθώς και το άνω και κάτω όριο ελέγχου ορίζονται ως εξής :

$$UCL = \mu_W + L\sigma_W$$

$$Center Line = \mu_W$$

$$LCL = \mu_W - L\sigma_W ,$$

όπου μ_W και σ_W δηλώνουν τη μέση τιμή και την τυπική απόκλιση της στατιστικής συνάρτησης W όπως προκύπτουν από τη λειτουργία μιας εντός ελέγχου διεργασίας, ενώ ο αριθμός L δηλώνει την απόσταση των ορίων ελέγχου από την κεντρική γραμμή σε μονάδες τυπικής απόκλισης. Για την αποτελεσματική χρήση ενός τέτοιου διαγράμματος ελέγχου θα πρέπει η W να ακολουθεί κανονική κατανομή.

Στο μοντέλο ορίων πιθανότητας (μοντέλο ορίων πιθανότητας α) για κανονική (ή προσεγγιστικά) κανονική κατανομή της στατιστικής συνάρτησης W η κεντρική γραμμή και τα όρια ελέγχου ορίζονται ως εξής :

$$UCL = \mu_W + z_{\alpha/2}\sigma_W = w_{\alpha/2}$$

$$Center Line = \mu_W$$

$$LCL = \mu_W - z_{\alpha/2}\sigma_W = w_{1-(\alpha/2)} ,$$

όπου w_α το άνω α ποσοστιαίο σημείο της W .

Η γενική θεωρία των ορίων ελέγχου διατυπώθηκε πρώτη φορά από τον Walter A. Shewhart και για το λόγο αυτό τα διαγράμματα ελέγχου που ακολουθούν τις βασικές αυτές αρχές συχνά ονομάζονται «Διαγράμματα Ελέγχου Shewhart».

Σε κάποιες περιπτώσεις για να γίνει πιο ευαίσθητο ένα διάγραμμα ελέγχου ως προς την ικανότητά του να ανιχνεύει πιο γρήγορα εκτός ελέγχου διεργασίες, εκτός από τη σχεδίαση των ορίων ελέγχου, σχεδιάζονται ταυτόχρονα προειδοποιητικά όρια (*warning limits*) εσωτερικά των ορίων ελέγχου. Για παράδειγμα, στην περίπτωση που χρησιμοποιούνται τα 3σ όρια ελέγχου, που είναι και τα συνηθέστερα, τα προειδοποιητικά όρια σχεδιάζονται σε

απόσταση 2σ από την κεντρική γραμμή. Εάν ένα ή περισσότερα σημεία του διαγράμματος ελέγχου εντοπιστούν μεταξύ των προειδοποιητικών ορίων και των ορίων ελέγχου υπάρχει υποψία ότι κάτι δεν λειτουργεί σωστά. Στην περίπτωση αυτή, αυξάνοντας τη συχνότητα δειγματοληψίας και/ή το μέγεθος του δείγματος, μπορούν να αντληθούν γρηγορότερα περισσότερες πληροφορίες για τη διεργασία και να γίνουν άμεσα οι κατάλληλες διορθωτικές ενέργειες (Montgomery, 2009). Η χρήση των προειδοποιητικών ορίων σαφώς αυξάνει την ευαισθησία του διαγράμματος, ωστόσο μπορεί παράλληλα να μπερδέψει τους χειριστές των διαγραμμάτων, ενώ αυξάνει ταυτόχρονα το ρίσκο λανθασμένης προειδοποίησης.

2.3.3 Φάση I και Φάση II

Στη βιβλιογραφία υπάρχουν δύο φάσεις (*phases*) για τον έλεγχο μιας παραγωγικής διεργασίας με τη χρήση διαγραμμάτων ελέγχου, η Φάση I και η Φάση II.

Φάση I (*Phase I*): Σε αυτή τη φάση συλλέγεται ένα σύνολο δεδομένων από τη διεργασία που αναλύονται όλα μαζί, για να καθοριστεί αν η διεργασία ήταν εντός ή εκτός ελέγχου κατά τη χρονική περίοδο συλλογής των δεδομένων. Σε αυτή την φάση τα διαγράμματα ελέγχου βοηθούν τον διαχειριστή της διαδικασίας να «φέρει» τη διεργασία εντός στατιστικού ελέγχου με τη χρήση δοκιμαστικών ορίων ελέγχου. Όταν αυτό επιτευχθεί, τα διαγράμματα ελέγχου που προκύπτουν (κεντρική γραμμή και όρια ελέγχου) είναι κατάλληλα για την παρακολούθηση της μελλοντικής συμπεριφοράς της διεργασίας (Φάση II). Αυτή η χρήση των διαγραμμάτων ελέγχου αναφέρεται και ως αναδρομική (*retrospective*). Γενικά πολύ περισσότερες δράσεις και σκέψεις εξελίσσονται κατά την διάρκεια αυτής της φάσης πλην της απλής διαγραμματοποίησης κάποιων δεδομένων. Ο διαχειριστής της διαδικασίας μελετά σε βάθος τη διεργασία και αυτό γιατί δεν είναι εύκολο να αποφασίσει αν η διεργασία ήταν εντός ή εκτός στατιστικού ελέγχου κατά τη χρονική περίοδο που συλλέχθηκαν τα δεδομένα.

Φάση II (*Phase II*): Σε αυτή τη φάση τα διαγράμματα ελέγχου χρησιμοποιούνται προκειμένου να ελέγχεται συνεχώς αν η διαδικασία παραμένει εντός ελέγχου. Στη φάση αυτή ο διαχειριστής έχει στα χέρια του ένα πολύτιμο εργαλείο μέσω του οποίου είναι δυνατόν να παρακολουθεί συνεχώς την παραγωγική διεργασία και να ανιχνεύει εγκαίρως μια πιθανή αλλαγή στο μέσο επίπεδο των χαρακτηριστικών που καθορίζουν την ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος. Δηλαδή, σε κάθε χρονική περίοδο που ένα δείγμα λαμβάνεται από την διεργασία ο διαχειριστής δίνει άμεσα μια απάντηση στο ερώτημα αν η διεργασία παραμένει εντός ελέγχου. Σε αυτή την φάση ο διαχειριστής αδιαφορεί για τον τρόπο με τον

οποίο το μέσο επίπεδο της διεργασίας είχε εκτιμηθεί, ή αν αυτό ήταν εκ των προτέρων γνωστό (Αντζουλάκος, 2010).

2.3.4 Ταξινόμηση των Διαγραμμάτων Ελέγχου

Τα διαγράμματα ελέγχου ταξινομούνται σε δύο μεγάλες κατηγορίες ανάλογα με το είδος της μεταβλητής που περιγράφει το ποιοτικό χαρακτηριστικό του προϊόντος. Στην περίπτωση που οι τιμές του ποιοτικού χαρακτηριστικού του προϊόντος περιγράφονται από μια συνεχή τυχαία μεταβλητή (*variable*), δηλαδή από μια μεταβλητή που παίρνει τιμές σε μια συνεχή κλίμακα, χρησιμοποιούνται τα διαγράμματα ελέγχου για μεταβλητές (*control charts for variables*). Πολλά ποιοτικά χαρακτηριστικά όμως δεν είναι δυνατό να μετρηθούν σε μια συνεχή κλίμακα, αλλά παίρνουν αριθμησιμο πλήθος τιμών και περιγράφονται από διακριτές τυχαίες μεταβλητές (*attributes*). Τα διαγράμματα ελέγχου με τέτοιου είδους ποιοτικά χαρακτηριστικά ονομάζονται διαγράμματα ελέγχου για ιδιότητες (*control charts for attributes*).

Μία άλλη κατηγοριοποίηση των διαγραμμάτων ελέγχων μπορεί να γίνει ανάλογα με το μέγεθος του δείγματος που λαμβάνεται από την παραγωγική διεργασία. Αν λαμβάνονται δείγματα μεγέθους μεγαλύτερου της μονάδας χρησιμοποιούνται διαγράμματα ελέγχου για ομάδες (*control charts for rational subgroups*), ενώ αν τα δείγματα είναι μεγέθους ένα, χρησιμοποιούνται διαγράμματα ελέγχου για μεμονωμένες παρατηρήσεις (*control charts for individual observations*). Επίσης, αν παρακολουθείται ένα ποιοτικό χαρακτηριστικό χρησιμοποιούνται μονομεταβλητά διαγράμματα ελέγχου, ενώ για την ταυτόχρονη παρακολούθηση περισσότερων ποιοτικών χαρακτηριστικών χρησιμοποιούνται πολυμεταβλητά διαγράμματα ελέγχου. Τέλος, αν οι μετρήσεις που λαμβάνονται ακολουθούν μια γνωστή κατανομή χρησιμοποιούνται παραμετρικά διαγράμματα ελέγχου, ενώ στην αντίθετη περίπτωση χρησιμοποιούνται μη παραμετρικά διαγράμματα ελέγχου.

Επίσης, υπάρχουν διαφορετικοί τύποι διαγραμμάτων ελέγχου ανάλογα με τη στατιστική θεωρία που στηρίζει την κατασκευή τους και η τελική επιλογή κάποιου από αυτά εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως τα μέσα που διαθέτει ο χρήστης, το κόστος, την επιθυμητή ευαισθησία του διαγράμματος κ.α.. Γενικά, στην περίπτωση που πρέπει να ανιχνευθούν μεγάλες αλλαγές του μέσου επιπέδου της διεργασίας και είναι γνωστή η κατανομή των αρχικών παρατηρήσεων ή του δειγματικού χαρακτηριστικού που απεικονίζεται στο διάγραμμα, χρησιμοποιούνται διαγράμματα ελέγχου τύπου *Shewhart* (*Shewhart type control*

charts). Στην αντίστοιχη περίπτωση, όπου όμως απαιτείται η ανίχνευση μικρών αλλαγών του μέσου της διεργασίας, χρησιμοποιούνται τα Αθροιστικά διαγράμματα ελέγχου (*Cumulative sum – CUSUM type control charts*) είτε τα διαγράμματα ελέγχου τύπου *EWMA* (*Exponentially weighted moving average – EWMA type control charts*) και σπανιότερα χρησιμοποιούνται τα διαγράμματα ελέγχου Κινούμενου Μέσου (*Moving Average control charts*). Τέλος, όταν δεν είναι γνωστή η κατανομή των αρχικών παρατηρήσεων ή του δειγματικού χαρακτηριστικού που απεικονίζεται στο διάγραμμα χρησιμοποιούνται τα διαγράμματα ελέγχου τύπου *EWMA* (Koutras, Bersimis and Maravelakis, 2007).

Αξίζει κλείνοντας την παράγραφο αυτή να αναφέρουμε ότι πολλές παραλλαγές των παραπάνω διαγραμμάτων ελέγχου έχουν παρουσιαστεί στη σύγχρονη βιβλιογραφία, εξαιτίας της πολυπλοκότητας που παρουσιάζουν σε κάθε περίπτωση τα δεδομένα προς ανάλυση. Ο Στατιστικός Έλεγχος Διεργασιών με τη χρήση διαγραμμάτων ελέγχου έχει αρχίσει να εισέρχεται σε πολλούς διαφορετικούς κλάδους πέραν της βιομηχανίας και κατ' επέκταση τα χαρακτηριστικά και οι ιδιαιτερότητες του κάθε κλάδου απαιτούν τη χρήση εξελιγμένων εργαλείων.

2.4 Διαγράμματα Ελέγχου για Μεταβλητές

Εφόσον έχει γίνει η επιλογή των δεδομένων και η φύση τους απαιτεί τη χρήση διαγραμμάτων ελέγχου για μεταβλητές, η περαιτέρω επιλογή του κατάλληλου διαγράμματος ελέγχου βασίζεται στο μέγεθος n του δείγματος που συλλέγεται σε τακτά χρονικά διαστήματα. Όταν λαμβάνονται δείγματα μεγέθους $n=1$, εφαρμόζονται διαγράμματα ελέγχου για μεμονωμένες παρατηρήσεις, ενώ όταν λαμβάνονται δείγματα μεγέθους $n > 1$ εφαρμόζονται διαγράμματα ελέγχου για ομάδες. Στη βιβλιογραφία έχουν προταθεί διάφοροι τύποι διαγραμμάτων ελέγχου για μεταβλητές τα οποία έχουν αναπτυχθεί τόσο για ομάδες όσο και για μεμονωμένες παρατηρήσεις, τα διαγράμματα ελέγχου τύπου *Shewhart*, τα αθροιστικά διαγράμματα ελέγχου (*CUSUM charts*), τα διαγράμματα ελέγχου *EWMA* και τα διαγράμματα ελέγχου Κινούμενου Μέσου. Η τελική επιλογή του κατάλληλου διαγράμματος ελέγχου εξαρτάται από παράγοντες όπως η απαιτούμενη ευαισθησία του διαγράμματος (μέγεθος μετατόπισης που πρέπει να ανιχνευτεί), διαθέσιμοι πόροι, κόστος κ.α.

2.4.1 Διαγράμματα Ελέγχου τύπου *Shewhart*

Η απλούστερη μορφή διαγραμμάτων ελέγχου είναι τα *Shewhart* διαγράμματα, τα οποία παρουσιάστηκαν αρχικά από τον Walter A. Shewhart το 1924, από όπου και πήραν το όνομά τους. Στη συνέχεια παρουσιάζονται όλες οι μορφές διαγραμμάτων ελέγχου τύπου *Shewhart* για μεταβλητές, στην περίπτωση των δειγμάτων μεγέθους $n > 1$ και στην περίπτωση των δειγμάτων μεγέθους $n = 1$.

2.4.1.1 Διάγραμμα Ελέγχου μέσης τιμής και εύρους $\bar{X} - R$ για δείγματα μεγέθους $n > 1$

Εκτός από τις μεταβολές στη μέση τιμή του χαρακτηριστικού X , μια διεργασία ελέγχεται και για τυχόν αλλαγές στη διασπορά. Με αυτόν τον τρόπο λαμβάνεται μια ταχύτερη ένδειξη ύπαρξης ειδικών αιτιών μεταβλητότητας στη διεργασία από ότι όταν ελέγχεται μεμονωμένα η μεταβολή της μέσης τιμής. Ένα διάγραμμα ελέγχου για τη διασπορά του ποιοτικού χαρακτηριστικού X μπορεί να βασιστεί σε ένα διάγραμμα όπου η απεικονιζόμενη ποσότητα θα είναι το εύρος R_i των δειγμάτων, που είναι ένα μέτρο διασποράς της X . Είναι απαραίτητο το διάγραμμα ελέγχου μέσης τιμής \bar{X} να μελετάται ταυτόχρονα με το διάγραμμα ελέγχου εύρους R για ορθότερα συμπεράσματα.

Έστω το χαρακτηριστικό X των παραγόμενων προϊόντων το οποίο ακολουθεί την κανονική κατανομή $N(\mu, \sigma^2)$, με μ και σ γνωστά, και έστω επίσης ανεξάρτητα τυχαία δείγματα μεγέθους n το καθένα, τα $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in})$, $i \geq 1$. Για κάθε τυχαίο δείγμα $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in})$ είναι γνωστό βάσει του ΚΟΘ ότι ο δειγματικός μέσος

$$W_i = \bar{X}_i = \frac{X_{i1} + X_{i2} + \dots + X_{in}}{n}$$

ακολουθεί την κατανομή $N(\mu, \sigma^2/n)$ και είναι αμερόληπτος εκτιμητής της μέσης τιμής μ του χαρακτηριστικού X . Έτσι για οποιοδήποτε δείγμα μεγέθους n ο δειγματικός μέσος $W_i = \bar{X}_i$ παίρνει τιμές στο διάστημα

$$\left[\mu - z_{a/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \mu + z_{a/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right]$$

με πιθανότητα $1 - a$. Για $a = 0.0027$, δηλαδή για $z_{a/2} = 3$ προκύπτει το διάστημα

$$\left[\mu - 3 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \mu + 3 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right]$$

στο οποίο υπάρχει πιθανότητα 99.73% να βρεθεί ο δειγματικός μέσος $W_i = \bar{X}_i$.

Επομένως, τα 3σ όρια ελέγχου και η κεντρική γραμμή του διαγράμματος ελέγχου για την παρακολούθηση της μέσης τιμής (\bar{X} διάγραμμα) του χαρακτηριστικού X είναι τα ακόλουθα:

$$UCL = \mu + A\sigma$$

$$CL = \mu$$

$$LCL = \mu - A\sigma$$

όπου η σταθερά A είναι ίση με $A = 3/\sqrt{n}$.

Αξίζει να σημειωθεί ότι στην περίπτωση που απαιτούνται όρια ελέγχου διαφορετικά των 3σ , τότε χρησιμοποιούνται οι σχέσεις :

$$UCL = \mu + L \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$CL = \mu$$

$$LCL = \mu - L \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

ενώ για το αντίστοιχο διάγραμμα ελέγχου με όρια ελέγχου πιθανότητας a χρησιμοποιούνται οι σχέσεις :

$$UCL = \mu + z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

$$CL = \mu$$

$$LCL = \mu - z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

Τα παραπάνω όρια ελέγχου είναι γνωστά ως όρια ελέγχου Φάσης II επειδή δεν προκύπτει καμία δυσκολία για την εύρεσή τους, αφού η μέση τιμή και η διακύμανση του χαρακτηριστικού X θεωρούνται γνωστά (είτε είναι δεδομένα είτε έχουν προκύψει ως αποτέλεσμα της χρήσης διαγραμμάτων ελέγχου Φάσης I). Έτσι λοιπόν αν τα μ και σ είναι γνωστά οι παραπάνω σχέσεις θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν ως άνω και κάτω όρια ελέγχου. Στην πράξη όμως οι παράμετροι αυτοί είναι άγνωστες και θα πρέπει να εκτιμηθούν.

Για το σκοπό αυτό χρησιμοποιούνται m ανεξάρτητα προκαταρκτικά τυχαία δείγματα μεγέθους n το καθένα $\mathbf{X}_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in})$, $1 \leq i \leq m$, για να εκτιμηθούν οι ποσότητες μ και σ , υποθέτοντας ότι η επιλογή των προκαταρκτικών δειγμάτων έγινε όταν η διεργασία ήταν εντός στατιστικού ελέγχου (τα μ και σ ήταν σταθερά καθ' όλη τη διάρκεια της δειγματοληψίας). Οι εκτιμήσεις $\hat{\mu}$ και $\hat{\sigma}$ προκύπτουν συνήθως από 20 έως 25 προκαταρκτικά δείγματα μεγέθους 4 έως 6. Υποθέτοντας ότι το χαρακτηριστικό X ακολουθεί κατανομή $N(\mu, \sigma^2)$, ως εκτίμηση του μ θεωρείται η στατιστική συνάρτηση

$$\hat{\mu} = \bar{\bar{X}}$$

και ως εκτίμηση του σ μπορεί να χρησιμοποιηθεί οποιαδήποτε από τις ακόλουθες στατιστικές συναρτήσεις

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2}, \quad \hat{\sigma} = \frac{\bar{S}}{c_4}, \quad \hat{\sigma} = \sqrt{S^2}$$

Ανάλογα με την εκτίμηση που χρησιμοποιείται για την τυπική απόκλιση σ προκύπτει και διαφορετικό διάγραμμα ελέγχου για τη μέση τιμή. Χρησιμοποιώντας ως εκτίμηση του μ την ποσότητα $\hat{\mu} = \bar{\bar{X}}$ και ως εκτίμηση του σ την ποσότητα $\hat{\sigma} = \bar{R}/d_2$, τα 3σ όρια ελέγχου Φάσης I και η κεντρική γραμμή του διαγράμματος ελέγχου για τη μέση τιμή παίρνουν τη μορφή :

$$\begin{aligned} LCL &= \bar{\bar{X}} - 3 \frac{\bar{R}}{d_2 \sqrt{n}} \\ CL &= \bar{\bar{X}} \\ UCL &= \bar{\bar{X}} + 3 \frac{\bar{R}}{d_2 \sqrt{n}} \end{aligned}$$

Στη συνέχεια, για τον υπολογισμό των ορίων ελέγχου του διαγράμματος ελέγχου R , θεωρείται ότι το χαρακτηριστικό X ακολουθεί την κανονική κατανομή $N(\mu, \sigma^2)$ με σ γνωστό. Αν $\mathbf{X}_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{in})$, $i \geq 1$, είναι ένα τυχαίο δείγμα μεγέθους n από την X τότε για τη στατιστική συνάρτηση $W_i = R_i = X_{i(n)} - X_{i(1)}$ είναι γνωστό ότι

$$\mu_{R_i} = E(R_i) = \sigma d_2, \quad \sigma_{R_i} = \sqrt{V(R_i)} = \sigma d_3,$$

όπου οι ποσότητες d_2 και d_3 εξαρτώνται από το μέγεθος n του δείγματος. Επομένως, τα 3σ όρια ελέγχου Φάσης II για το R διάγραμμα είναι τα ακόλουθα :

$$LCL = D_2 \sigma$$

$$CL = d_2 \sigma$$

$$UCL = D_1 \sigma$$

όπου $D_1 = d_2 - 3d_3$ και $D_2 = d_2 + 3d_3$. Σημειώνεται εδώ, ότι επειδή $D_1 < 0$ για $n \leq 6$, σε αυτές τις περιπτώσεις τίθεται $D_1 = 0$.

Για τα όρια ελέγχου Φάσης I, όπου η ποσότητα σ είναι άγνωστη και πρέπει να εκτιμηθεί χρησιμοποιείται, όπως και για το διάγραμμα \bar{X} , η εκτίμηση $\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2}$ και τελικά τα 3σ όρια ελέγχου παίρνουν τη μορφή :

$$LCL = D_4 \bar{R}$$

$$CL = \bar{R}$$

$$UCL = D_3 \bar{R}$$

όπου $D_3 = 1 - (3d_3 / d_2)$ και $D_4 = 1 + (3d_3 / d_2)$. Σημειώνεται ότι επειδή $D_3 < 0$ για $n \leq 6$, σε αυτές τις περιπτώσεις τίθεται $D_3 = 0$.

2.4.1.2 Διάγραμμα Ελέγχου μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης $\bar{X} - S$ για δείγματα μεγέθους $n > 1$

Παρόλο που τα διαγράμματα \bar{X} και R χρησιμοποιούνται πολύ συχνά δεν προσφέρονται για την απευθείας εκτίμηση της τυπικής απόκλισης, παρά μόνο μέσω του εύρους R . Αυτό οδηγεί στη χρήση των διαγραμμάτων \bar{X} και S τα οποία είναι κατάλληλα για δείγματα μεγέθους n μεγαλύτερου του 10. Η μέθοδος που ακολουθείται για τον υπολογισμό των ορίων ελέγχου είναι παρόμοια με αυτή που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο για τα διαγράμματα ελέγχου \bar{X} και R .

Στη Φάση II, όπου μ και σ θεωρούνται γνωστά, τα 3σ όρια ελέγχου για την παρακολούθηση της μέσης τιμής (\bar{X} διάγραμμα) του χαρακτηριστικού X είναι τα ακόλουθα:

$$UCL = \mu + A\sigma$$

$$CL = \mu$$

$$LCL = \mu - A\sigma$$

όπου η σταθερά A είναι ίση με $A = 3/\sqrt{n}$.

Όταν όμως τα μ και σ είναι άγνωστα και πρέπει να εκτιμηθούν, χρησιμοποιείται η εκτίμηση $\hat{\mu} = \bar{\bar{X}}$ για το μ , και η εκτίμηση $\hat{\sigma} = \bar{S}/c_4$ για το σ . Έτσι, στα διαγράμματα ελέγχου $\bar{X}-S$ τα 3σ όρια ελέγχου Φάσης I για την παρακολούθηση της μέσης τιμής του χαρακτηριστικού X είναι τα ακόλουθα :

$$UCL = \bar{\bar{X}} + A_3\bar{S}$$

$$CL = \bar{\bar{X}}$$

$$LCL = \bar{\bar{X}} - A_3\bar{S}$$

όπου η σταθερά A_3 είναι ίση με $A_3 = 3/(c_4/\sqrt{n})$.

Για την παρακολούθηση της διασποράς του χαρακτηριστικού X μπορεί να χρησιμοποιηθεί η στατιστική συνάρτηση

$$W_i = S_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_i)^2},$$

για την οποία ισχύει ότι

$$\mu_{S_i} = E(S_i) = \sigma c_4, \quad \sigma_{S_i} = \sqrt{V(S_i)} = \sigma \sqrt{1 - c_4^2}.$$

Συνεπώς, εάν το σ είναι γνωστό, τα 3σ όρια ελέγχου Φάσης II για το διάγραμμα S θα δίνονται από τις σχέσεις :

$$UCL = B_6\sigma$$

$$CL = c_4\sigma$$

$$LCL = B_5\sigma$$

όπου $B_5 = c_4 - 3\sqrt{1 - c_4^2}$ και $B_6 = c_4 + 3\sqrt{1 - c_4^2}$. Σημειώνεται ότι επειδή $B_5 < 0$ για $n \leq 5$, σε αυτές τις περιπτώσεις τίθεται $B_5 = 0$.

Όταν το σ είναι άγνωστο και πρέπει να εκτιμηθεί, χρησιμοποιείται κι εδώ η εκτίμηση $\hat{\sigma} = \bar{S} / c_4$ και τα 3σ όρια ελέγχου Φάσης I για την παρακολούθηση της διασποράς (διάγραμμα S) δίνονται από τις επόμενες σχέσεις :

$$UCL = B_4\bar{S}$$

$$CL = \bar{S}$$

$$LCL = B_3\bar{S}$$

όπου $B_3 = 1 - (3/c_4)\sqrt{1 - c_4^2}$ και $B_4 = 1 + (3/c_4)\sqrt{1 - c_4^2}$. Σημειώνεται ότι επειδή $B_3 < 0$ για $n \leq 5$, σε αυτές τις περιπτώσεις τίθεται $B_3 = 0$.

2.4.1.3 Διαγράμματα Ελέγχου τύπου *Shewhart* για μεμονωμένες παρατηρήσεις (n=1)

Έστω ότι η κατανομή του χαρακτηριστικού X των προϊόντων που παράγονται ακολουθεί κανονική κατανομή $N(\mu, \sigma^2)$ με μ και σ γνωστά και έστω ακόμη οι ανεξάρτητες παρατηρήσεις $X_i, i \geq 1$, του χαρακτηριστικού X . Για την παρακολούθηση της μέσης τιμής μ κατασκευάζεται ένα διάγραμμα ελέγχου στο οποίο απεικονίζονται οι μεμονωμένες παρατηρήσεις X_i ($W_i = X_i, i \geq 1$). Το διάγραμμα ονομάζεται X ή I διάγραμμα ελέγχου και τα 3σ όρια ελέγχου Φάσης II και η κεντρική γραμμή του δίνονται από τις σχέσεις :

$$UCL = \mu + 3\sigma$$

$$CL = \mu$$

$$LCL = \mu - 3\sigma$$

Για τη συμπεριφορά της διασποράς του χαρακτηριστικού X το αντίστοιχο R διάγραμμα ελέγχου δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί, επειδή για $n=1$ δεν έχει νόημα να υπολογιστεί το εύρος R μιας μόνο παρατήρησης. Σε αυτή την περίπτωση χρησιμοποιείται το κινούμενο εύρος (*moving range*) των μεμονωμένων παρατηρήσεων που ορίζεται από τη σχέση

$$MR_i = |X_i - X_{i-1}| = \max(X_{i-1}, X_i) - \min(X_{i-1}, X_i), \quad i \geq 2$$

και για το οποίο ισχύει ότι

$$\mu_{MR_i} = E(MR_i) = \sigma d_2 \quad \text{και} \quad \sigma_{MR_i} = \sqrt{V(MR_i)} = \sigma d_3 .$$

Σημειώνεται ότι οι σταθερές d_2 και d_3 υπολογίζονται για $n=2$.

Συνεπώς, ένα διάγραμμα ελέγχου για τη διασπορά του χαρακτηριστικού X μπορεί να βασιστεί σε ένα διάγραμμα όπου η απεικονιζόμενη ποσότητα θα είναι το κινούμενο εύρος MR_i των παρατηρήσεων (το διάγραμμα ονομάζεται MR διάγραμμα ελέγχου). Το διάγραμμα ελέγχου θα έχει 3σ όρια ελέγχου Φάσης II και κεντρική γραμμή που δίνονται από τις ακόλουθε σχέσεις :

$$UCL = D_2\sigma$$

$$CL = d_2\sigma$$

$$LCL = D_1\sigma$$

όπου $D_1 = d_2 - 3d_3$ και $D_2 = d_2 + 3d_3$.

Για την ανάπτυξη των αντίστοιχων διαγραμμάτων ελέγχου Φάσης I, όπου η μέση τιμή μ και η διασπορά σ είναι άγνωστες, χρησιμοποιούνται οι εκτιμήσεις τους. Έστω $\mathbf{X} = (X_1, X_2, \dots, X_m)$ τυχαίο δείγμα μεγέθους m από το χαρακτηριστικό X . Τότε, η εκτίμηση του μέσου δίνεται από τη σχέση

$$\hat{\mu} = \bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_m}{m} \quad \text{και} \quad \bar{X} \sim N(\mu, \sigma^2 / m).$$

Για την εκτίμηση του σ , θέτοντας

$$\overline{MR} = \frac{MR_2 + MR_3 + \dots + MR_m}{m-1}$$

προκύπτει ότι $E(\overline{MR}) = \sigma d_2$, οπότε η ποσότητα \overline{MR} / d_2 είναι αμερόληπτη εκτιμήτρια της ποσότητας σ , και χρησιμοποιείται ως εκτίμησή της, δηλαδή $\hat{\sigma} = \overline{MR} / d_2$.

Με τη χρήση των παραπάνω σχέσεων προκύπτουν τα 3σ όρια ελέγχου Φάσης I για την παρακολούθηση της μέσης τιμής της διεργασίας ως :

$$\begin{aligned} UCL &= \bar{X} + 3 \frac{\overline{MR}}{d_2} \\ CL &= \bar{X} \\ LCL &= \bar{X} - 3 \frac{\overline{MR}}{d_2} \end{aligned}$$

Αντίστοιχα, τα 3σ όρια ελέγχου Φάσης I για την παρακολούθηση της διασποράς (MR διάγραμμα) είναι τα ακόλουθα :

$$\begin{aligned} UCL &= D_4 \overline{MR} \\ CL &= \overline{MR} \\ LCL &= D_3 \overline{MR} \end{aligned}$$

όπου $D_3 = 1 - (3d_3 / d_2)$ και $D_4 = 1 + (3d_3 / d_2)$. Σημειώνεται ότι οι σταθερές D_3 και D_4 υπολογίζονται για $n = 2$.

Αξίζει να σημειωθεί ότι μια αποτελεσματικότερη εκτίμηση της τυπικής απόκλισης σ προκύπτει χρησιμοποιώντας τη σχέση $\hat{\sigma} = S / c_4$ (η σταθερά c_4 υπολογίζεται για $n = m$), όπου

$$S = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (X_i - \bar{X})^2}$$

(Αντζουλάκος, 2010).

2.4.2 Αθροιστικά Διαγράμματα Ελέγχου (*CUSUM charts*)

Τα διαγράμματα τύπου *Shewhart* που παρουσιάστηκαν στην προηγούμενη παράγραφο είναι πολύ αποτελεσματικά στον εντοπισμό μετατοπίσεων του μέσου της διεργασίας μεγέθους 1.5σ με 2σ ή και μεγαλύτερων. Στην περίπτωση όμως μικρότερων μετατοπίσεων αποτυγχάνουν καθώς βασίζονται σε πληροφορίες που δίνει ένα μόνο δείγμα (το πιο πρόσφατο) αγνοώντας πληροφορίες που μπορούν να δώσουν προηγούμενα δείγματα. Στις περιπτώσεις, λοιπόν, που είναι σημαντικός ο εντοπισμός μικρών μετατοπίσεων του μέσου χρησιμοποιείται εναλλακτικά το Αθροιστικό Διάγραμμα ελέγχου (*CUSUM chart*), το οποίο παρουσιάστηκε αρχικά από τον Page (1954).

Το διάγραμμα ελέγχου *CUSUM* ενσωματώνει όλη την πληροφορία της ακολουθίας των τιμών του δείγματος, με την γραφική απεικόνιση των συσσωρευμένων αθροισμάτων (*cumulative sums*) των αποκλίσεων των παρατηρήσεων από την τιμή στόχο της διεργασίας (Montgomery, 2001). Για παράδειγμα, έστω δείγματα μεγέθους $n \geq 1$, και \bar{X}_j ο μέσος του j δείγματος. Τότε, αν μ_0 είναι η τιμή στόχος της διεργασίας, στο διάγραμμα ελέγχου *CUSUM* απεικονίζονται τα συσσωρευμένα αθροίσματα που υπολογίζονται από τον τύπο

$$C_i = \sum_{j=1}^i (\bar{X}_j - \mu_0)$$

έναντι του δείγματος i .

Από τον παραπάνω τύπο είναι φανερό ότι όσο η διεργασία παραμένει εντός στατιστικού ελέγχου, οι αποκλίσεις των μέσων των δειγμάτων από την τιμή στόχο μ_0 θα είναι μικρές και τα συσσωρευμένα αθροίσματα C_i θα κινούνται γύρω από την τιμή 0. Στην περίπτωση όμως που ο μέσος μετατοπιστεί στη θέση $\mu_1 > \mu_0$, θα υπάρξουν περισσότερες θετικές αποκλίσεις και συνεπώς τα συσσωρευμένα αθροίσματα C_i θα παρουσιάσουν μια ανοδική κίνηση. Στην αντίθετη περίπτωση, όπου $\mu_1 < \mu_0$, θα προκύψουν τα αντίθετα αποτελέσματα, δηλαδή μια καθοδική κίνηση των συσσωρευμένων αθροισμάτων C_i . Επομένως, αν κάποια από τις τάσεις που περιγράφηκαν παραπάνω παρουσιαστεί στο διάγραμμα ελέγχου, θα υπάρχει μια σαφής ένδειξη ότι ο μέσος της διεργασίας έχει μετατοπιστεί προς τα πάνω ή προς τα κάτω αντίστοιχα, και θα πρέπει να ελεγχθεί αν υπάρχουν ειδικές αιτίες μεταβλητότητας που είναι υπεύθυνες για αυτή τη συμπεριφορά.

Σαφώς, το διάγραμμα που περιγράφηκε παραπάνω δεν είναι ένα διάγραμμα ελέγχου, αφού δεν περιέχει όρια στατιστικού ελέγχου. Για τον λόγο αυτό, έχουν προταθεί δύο μέθοδοι γραφικής αναπαράστασης συσσωρευμένων αθροισμάτων με όρια ελέγχου, η αλγοριθμική μέθοδος (ή *tabular*) και η μέθοδος *V-Mask*.

2.4.2.1 Η Αλγοριθμική μέθοδος για την παρακολούθηση του μέσου της διεργασίας

Έστω X_i η i παρατήρηση της διεργασίας. Όταν η διεργασία είναι εντός στατιστικού ελέγχου, η X_i ακολουθεί κανονική κατανομή με μέσο μ_0 και τυπική απόκλιση σ (θεωρείται ότι το σ είτε είναι γνωστό είτε υπάρχει η εκτίμησή του). Η αλγοριθμική μέθοδος για την ανίχνευση μετατοπίσεων του μέσου της διεργασίας της μορφής $\mu_1 = \mu_0 \pm \delta\sigma$, $\delta > 0$, χρησιμοποιεί τις ακόλουθες στατιστικές συναρτήσεις

$$\begin{aligned} C_i^+ &= \max[0, X_i - (\mu_0 + K) + C_{i-1}^+], & C_0^+ &= 0 \\ C_i^- &= \max[0, (\mu_0 - K) - X_i + C_{i-1}^-], & C_0^- &= 0 \end{aligned}$$

Η ποσότητα K καλείται τιμή αναφοράς (*reference value*) και υπολογίζεται συνήθως από τον τύπο

$$K = \frac{\delta}{2} \sigma = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{2}.$$

Οι ποσότητες C_i^+ και C_i^- μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τους ελέγχους υποθέσεων

$$\begin{aligned} H_0 : \mu = \mu_0 & \quad - \quad H_1^+ : \mu = \mu_1 = \mu_0 + \delta\sigma, \quad \delta > 0 \\ H_0 : \mu = \mu_0 & \quad - \quad H_1^- : \mu = \mu_1 = \mu_0 - \delta\sigma, \quad \delta > 0 \end{aligned}$$

αντίστοιχα. Μεγάλες (θετικές) τιμές της C_i^+ οδηγούν στην αποδοχή της υπόθεσης H_1^+ ενώ μικρές (αρνητικές) τιμές της C_i^- οδηγούν στην αποδοχή της υπόθεσης H_1^- . Η αποδοχή ή όχι των δύο εναλλακτικών υποθέσεων εξαρτάται από το αν ισχύει $C_i^+ > H$ ή $C_i^- < -H$, όπου H μια θετική σταθερά που δίνεται συνήθως από τη σχέση $H = h\sigma$ και ονομάζεται διάστημα απόφασης (*decision interval*). Μια λογική τιμή για το h , η οποία και χρησιμοποιείται συχνότερα, είναι το 5.

Παραπάνω αναπτύχθηκε η αλγοριθμική μέθοδος για την κατασκευή διαγραμμάτων ελέγχου *CUSUM* στην περίπτωση των μεμονωμένων παρατηρήσεων ($n = 1$). Στην περίπτωση

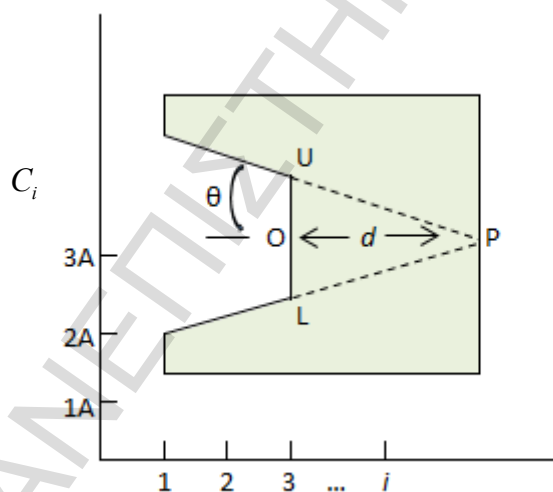
των δειγμάτων μεγέθους $n > 1$, ακολουθείται ακριβώς η ίδια διαδικασία αντικαθιστώντας όπου X_i το \bar{X}_i , δηλαδή τον μέσο του i -δείγματος, και όπου σ το $\sigma_{\bar{x}} = \sigma / \sqrt{n}$. Παρόλο όμως που η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί στην περίπτωση των δειγμάτων μεγέθους $n > 1$, δεν λειτουργεί τόσο αποτελεσματικά όσο τα διαγράμματα ελέγχου τύπου *Shewhart*. Γενικά, μόνο εάν συντρέχουν σημαντικοί λόγοι (π.χ. οικονομικοί) για την λήψη δειγμάτων μεγέθους μεγαλύτερου της μονάδας, θα πρέπει να χρησιμοποιούνται τα διαγράμματα ελέγχου *CUSUM* για ομάδες (Montgomery, 2001).

2.4.2.2 Η μέθοδος V-Mask για την παρακολούθηση του μέσου της διεργασίας

Ένας εναλλακτικός τρόπος για την ανάπτυξη ενός διαγράμματος ελέγχου *CUSUM*, προτάθηκε το 1959 από τον Barnard και είναι γνωστό ως το διάγραμμα ελέγχου *V-Mask*. Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί την στατιστική συνάρτηση

$$C_i = \sum_{j=1}^i Y_j = Y_i + C_{i-1}$$

όπου Y_i είναι η τυποποιημένη (*standardized*) παρατήρηση $Y_i = (X_i - \mu_0) / \sigma$. Ένα τυπικό διάγραμμα *V-Mask* παρουσιάζεται στη συνέχεια.



2.1 Διάγραμμα Ελέγχου *V-Mask*

Ουσιαστικά, τοποθετείται στο διάγραμμα *CUSUM* ένα σχήμα της μορφής «V» (*V-mask*), όπου το σημείο O παριστάνει την τιμή του C_i . Εάν όλα τα προηγούμενα συσσωρευμένα αθροίσματα C_1, C_2, \dots, C_i βρεθούν εντός των πλευρών του *V-mask*, η διαδικασία θα είναι εντός στατιστικού ελέγχου. Σε αντίθετη περίπτωση, δηλαδή αν κάποιο από τα σημεία βρεθεί

πάνω ή κάτω από τις πλευρές του *V-mask*, η διεργασία θεωρείται εκτός στατιστικού ελέγχου. Η θέση όπου τοποθετείται το *V-mask* στο διάγραμμα καθορίζεται από την γωνία θ καθώς και από την απόσταση d , όπως φαίνεται στο Διάγραμμα 2.1.

Η μέθοδος *V-Mask* είναι ισοδύναμη με την αλγοριθμική μέθοδο όταν $K = A \tan \theta$ και $h = Ad \tan(\theta) = dK$.

Γενικά, συνιστάται να αποφεύγεται η χρήση της μεθόδου *V-mask* καθώς παρουσιάζει πολλά μειονεκτήματα και είναι πολύπλοκη για τον χρήστη (Montgomery, 2001).

2.4.2.3 Διάγραμμα Ελέγχου CUSUM για την παρακολούθηση της διασποράς (*Scale Cusum*)

Τα διαγράμματα ελέγχου *CUSUM* για την παρακολούθηση της διασποράς μιας διεργασίας προτάθηκαν αρχικά από τον Hawkins το 1981 και ο ίδιος μάλιστα το 1993 πρότεινε να απεικονίζονται ταυτόχρονα στο ίδιο διάγραμμα η διασπορά και η μέση τιμή. Εάν στο διάγραμμα *CUSUM* για την παρακολούθηση της διασποράς, κάποιο σημείο δείξει ότι η διεργασία είναι εκτός στατιστικού ελέγχου, τότε υπάρχει υποψία ότι η διασπορά μεταβλήθηκε. Όταν όμως υπάρξουν ενδείξεις εκτός ελέγχου διεργασίας και στα δύο διαγράμματα, τότε υπάρχει ένδειξη ότι ο μέσος μετατοπίστηκε.

Έστω οι μεμονωμένες παρατηρήσεις X_i , οι οποίες ακολουθούν κανονική κατανομή με μέση τιμή μ_0 και τυπική απόκλιση σ , και έστω η τυποποιημένη (*standardized*) τιμή της $Y_i = (X_i - \mu_0) / \sigma$. Ο Hawkins πρότεινε την δημιουργία μιας νέας τυποποιημένης ποσότητας,

$$\text{της } v_i = \frac{\sqrt{|Y_i|} - 0.822}{0.349}$$

της οποίας η εντός ελέγχου κατανομή είναι προσεγγιστικά η $N(0,1)$. Για τον λόγο αυτό, η ποσότητα v_i είναι ευαίσθητη σε αλλαγές της διακύμανσης της διεργασίας και όχι τόσο στις μετατοπίσεις του μέσου. Για το διάγραμμα ελέγχου της διασποράς της διεργασίας (*Scale Cusum*) χρησιμοποιούνται οι ποσότητες

$$S_i^+ = \max[0, v_i - k + S_{i-1}^+]$$

$$S_i^- = \max[0, -k - v_i + S_{i-1}^-]$$

όπου οι ποσότητες k και h επιλέγονται με την ίδια διαδικασία που περιγράφηκε στην Παράγραφο 2.4.2.1 για την κατασκευή ενός διαγράμματος *CUSUM* για την παρακολούθηση του μέσου της διεργασίας (Montgomery, 2001).

2.4.3 Διαγράμματα Ελέγχου EWMA (*Exponentially Weighted Moving Average*)

Τα διαγράμματα ελέγχου *EWMA* είναι επίσης μια χρήσιμη εναλλακτική επιλογή έναντι των διαγραμμάτων ελέγχου *Shewhart* όταν απαιτείται η ανίχνευση μικρών μετατοπίσεων του μέσου της διεργασίας. Η κατασκευή των διαγραμμάτων ελέγχου *EWMA* είναι περίπου ίδια με αυτή των διαγραμμάτων *CUSUM* και κάποιες φορές είναι πιο εύκολα στην κατασκευή και τη χρήση. Χρησιμοποιούνται κυρίως στη περίπτωση των μεμονωμένων παρατηρήσεων ($n = 1$), αλλά μπορούν να αναπτυχθούν και για δείγματα μεγέθους μεγαλύτερου της μονάδας ($n > 1$). Προτάθηκαν το 1959 από τον Roberts και έχουν μελετηθεί εκτενώς από τον Crowder (1987a, 1989) και τους Lucas and Saccucci (1990).

2.4.3.1 Διάγραμμα Ελέγχου EWMA για την παρακολούθηση του μέσου της διεργασίας ($n=1$)

Όπως προαναφέρθηκε, τα διαγράμματα ελέγχου *EWMA* τυπικά χρησιμοποιούνται στην περίπτωση των μεμονωμένων παρατηρήσεων, επομένως αρχικά θα αναλυθεί αυτή η περίπτωση ($n = 1$). Σε αυτού του είδους τα διαγράμματα ελέγχου απεικονίζονται οι τιμές της στατιστικής συνάρτησης

$$Z_i = \lambda X_i + (1 - \lambda)Z_{i-1},$$

όπου $0 < \lambda \leq 1$ είναι μια σταθερά, και η τιμή εκκίνησης (η οποία χρειάζεται για να υπολογιστεί η τιμή για το πρώτο δείγμα, $i = 1$) είναι συνήθως η τιμή στόχος της διεργασίας, δηλαδή $z_0 = \mu_0$. Στις περιπτώσεις που είναι διαθέσιμα ιστορικά δεδομένα και είναι γνωστός ο μέσος \bar{X} , τότε χρησιμοποιείται αυτός ως τιμή εκκίνησης, δηλαδή $z_0 = \bar{X}$.

Για την κατασκευή ενός διαγράμματος ελέγχου *EWMA* χρησιμοποιούνται τα όρια ελέγχου και η κεντρική γραμμή που δίνονται παρακάτω :

$$UCL = \mu_0 + L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)} [1 - (1-\lambda)^{2i}]}$$

$$CL = \mu_0$$

$$LCL = \mu_0 - L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)} [1 - (1-\lambda)^{2i}]}$$

Όπως είναι φανερό από τις παραπάνω ισότητες, τα όρια ελέγχου είναι μεταβλητά και η ποσότητα $[1-(1-\lambda)^{2i}]$ τείνει στη μονάδα όσο το i αυξάνεται. Επομένως, αφού απεικονιστούν στο διάγραμμα οι τιμές z_i των πρώτων δειγμάτων, σε σύντομο χρονικό διάστημα τα όρια ελέγχου σταθεροποιούνται και δίνονται από τις σχέσεις :

$$UCL = \mu_0 + L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{2-\lambda}}$$

$$LCL = \mu_0 - L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{2-\lambda}}$$

Σημειώνεται εδώ ότι για την επιλογή των παραμέτρων L και λ καθορίζονται πρώτα το εντός ελέγχου μέσο μήκος ροής και η μετατόπιση του μέσου της διεργασίας που πρέπει να ανιχνευθεί και κατόπιν επιλέγονται οι τιμές των L και λ από τους διαθέσιμους πίνακες, με κριτήριο το μικρότερο εκτός ελέγχου μέσο μήκος ροής. Γενικά, έχει αποδειχθεί ότι οι τιμές του λ στο διάστημα $0.05 \leq \lambda \leq 0.25$ λειτουργούν καλά στην πράξη, με πιο συχνά χρησιμοποιούμενες τις τιμές $\lambda = 0.05$, $\lambda = 0.10$ και $\lambda = 0.20$. Ένας εμπειρικός κανόνας είναι να επιλέγονται μικρές τιμές του λ όταν πρέπει να ανιχνευθούν μικρότερες μετατοπίσεις του μέσου. Επίσης, τα 3σ όρια ελέγχου ($L=3$) λειτουργούν ικανοποιητικά ειδικά σε συνδυασμό με μεγάλες τιμές του λ . Αντίθετα, όταν οι τιμές του λ είναι μικρότερες (π.χ. $\lambda \leq 0.1$), χρησιμοποιούνται τιμές για το L από 2.6 μέχρι 2.8 περίπου, και έτσι μειώνεται το εύρος των ορίων ελέγχου (Montgomery, 2001).

Κλείνοντας την παρούσα παράγραφο, αξίζει να σημειωθεί ότι παρόλο που τα διαγράμματα ελέγχου τύπου *Shewhart* υπερτερούν των διαγραμμάτων ελέγχου *EWMA* στην ανίχνευση μεγάλων μετατοπίσεων του μέσου, επηρεάζονται σημαντικά από την παραβίαση της υπόθεσης της κανονικότητας των δεδομένων. Αντίθετα, τα διαγράμματα ελέγχου *EWMA* έχει παρατηρηθεί ότι δεν είναι τόσο ευαίσθητα σε αυτή την παραβίαση και για τον λόγο αυτό ένα κατάλληλα σχεδιασμένο διάγραμμα ελέγχου *EWMA* είναι ίσως η καλύτερη λύση για μη παραμετρικές διεργασίες.

2.4.3.2 Διάγραμμα Ελέγχου EWMA για την παρακολούθηση του μέσου της διεργασίας (n>1)

Παρόλο που τα διαγράμματα ελέγχου *EWMA* χρησιμοποιούνται κυρίως για μεμονωμένες παρατηρήσεις, μπορούν να αναπτυχθούν και στην περίπτωση που τα δείγματα είναι μεγέθους $n > 1$, αντικαθιστώντας όπου X_i το \bar{X}_i και όπου σ το $\sigma_{\bar{x}} = \sigma / \sqrt{n}$. Συνεπώς, στο διάγραμμα ελέγχου απεικονίζεται η ποσότητα

$$Z_i = \lambda \bar{X}_i + (1 - \lambda)Z_{i-1}$$

και τα όρια ελέγχου και η κεντρική γραμμή δίνονται από τις παρακάτω σχέσεις :

$$\begin{aligned} UCL &= \mu_0 + L \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)} [1 - (1-\lambda)^{2i}]} \\ CL &= \mu_0 \\ LCL &= \mu_0 - L \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)} [1 - (1-\lambda)^{2i}]} \end{aligned}$$

2.4.3.3 Διάγραμμα Ελέγχου EWMS για την παρακολούθηση της διασποράς

Οι MacGregor and Harris, το 1993, πρότειναν ένα διάγραμμα βασισμένο στα διαγράμματα ελέγχου *EWMA* για την παρακολούθηση της διασποράς της διεργασίας. Έστω μεμονωμένες παρατηρήσεις X_i , οι οποίες κατανέμονται κανονικά με μέση τιμή μ και τυπική απόκλιση σ . Έχει αποδειχθεί ότι για την ποσότητα (*EWMS*) που δίνεται από τη σχέση

$$S_i^2 = \lambda(X_i - \mu)^2 + (1 - \lambda)S_{i-1}^2$$

ισχύει ότι $E(S_i^2) = \sigma^2$ για μεγάλες τιμές του i . Επίσης, αν οι παρατηρήσεις X_i είναι ανεξάρτητες, η ποσότητα αυτή ακολουθεί προσεγγιστικά την κατανομή χ^2 με $\nu = (2 - \lambda) / \lambda$ βαθμούς ελευθερίας. Επομένως, αν σ_0 είναι η εντός ελέγχου τυπική απόκλιση (ή η τιμή

στόχος της), μπορούν να απεικονιστούν γραφικά σε ένα διάγραμμα ελέγχου (*EWMS*) οι τιμές της ποσότητας $\sqrt{S_i^2}$, με όρια ελέγχου τα ακόλουθα :

$$UCL = \sigma_0 \sqrt{\frac{\chi_{v,a/2}^2}{v}}$$

$$LCL = \sigma_0 \sqrt{\frac{\chi_{v,1-(a/2)}^2}{v}}$$

Οι MacGregor and Harris (1993) παρατήρησαν ότι η ποσότητα S_i^2 είναι ευαίσθητη τόσο στις μετατοπίσεις του μέσου όσο και στην τυπική απόκλιση της διεργασίας και πρότειναν εναλλακτικά τη χρήση ενός εκτιμητή της μέσης τιμής μ σε κάθε χρονική στιγμή ($\hat{\mu}_i$) αντί για τη χρήση της ίδιας της μέσης τιμής μ . Ένας λογικός εκτιμητής για το μ είναι η ποσότητα Z_i που χρησιμοποιείται στα διαγράμματα ελέγχου *EWMA* που περιγράφηκαν στην προηγούμενη Παράγραφο (2.4.3.1). Αντικαθιστώντας τελικά την μέση τιμή με την εκτίμησή της προκύπτει η παρακάτω σχέση

$$S_i^2 = \lambda(X_i - Z_i)^2 + (1 - \lambda)S_{i-1}^2$$

και τα όρια ελέγχου που προτάθηκαν από τους MacGregor and Harris (1993) υπολογίζονται σύμφωνα με την ποσότητα αυτή (*EWMS*).

Πολλές διαφορετικές προσεγγίσεις για την ανάπτυξη τέτοιου είδους διαγραμμάτων έχουν δημοσιευθεί, όπως για παράδειγμα των Wortham and Ringer (1971), Wortham (1972), Sweet (1986), Ng and Case (1989), Domangue and Patch (1991), Crowder and Hamilton (1992), Acosta-Mejia and Pignatiello (2000).

2.4.4 Διαγράμματα Ελέγχου Κινούμενου Μέσου

Τα διαγράμματα ελέγχου κινούμενου μέσου (*Moving Average Control Charts*) είναι και αυτά πιο αποτελεσματικά στην ανίχνευση μικρών μετατοπίσεων του μέσου της διεργασίας, σε σχέση με τα διαγράμματα ελέγχου *Shewhart*. Παρόλα αυτά μειονεκτούν γενικά έναντι των διαγραμμάτων ελέγχου *CUSUM* και *EWMA* και χρησιμοποιούνται κυρίως γιατί θεωρούνται πιο εύκολα στην εφαρμογή τους.

Έστω ότι έχουν συλλεχθεί ανεξάρτητες παρατηρήσεις X_1, X_2, \dots . Τότε, σε ένα διάγραμμα κινούμενου μέσου για την παρακολούθηση της μέσης τιμής της διεργασίας, απεικονίζονται οι τιμές του κινούμενου μέσου

$$M_i = \frac{X_i + X_{i-1} + \dots + X_{i-w+1}}{w}.$$

Για μια εντός ελέγχου διεργασία με μέσο μ_0 και διακύμανση σ^2 , για τον κινούμενο μέσο M_i ισχύει ότι $E(M_i) = \mu_0$ και $Var(M_i) = \sigma^2 / w$.

Συνεπώς η κατασκευή ενός διαγράμματος ελέγχου κινούμενου μέσου μπορεί να βασιστεί στην ποσότητα M_i με όρια ελέγχου και κεντρική γραμμή που δίνονται από τις επόμενες σχέσεις :

$$UCL = \mu_0 + L \frac{\sigma}{\sqrt{w}}$$

$$CL = \mu_0$$

$$LCL = \mu_0 - L \frac{\sigma}{\sqrt{w}}$$

Τα διαγράμματα ελέγχου κινούμενου μέσου μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν και στην περίπτωση των δειγμάτων μεγέθους μεγαλύτερου της μονάδας ($n > 1$), αντικαθιστώντας στις παραπάνω σχέσεις όπου X_i τον μέσο του κάθε δείγματος \bar{X}_i και όπου σ το σ / \sqrt{n} .

2.5 Διαγράμματα Ελέγχου για Ιδιότητες

Στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκαν τα διαγράμματα ελέγχου για την παρακολούθηση ενός ποιοτικού χαρακτηριστικού το οποίο περιγράφεται από μια συνεχή μεταβλητή. Παρόλο που τα διαγράμματα αυτά εφαρμόζονται ευρέως, δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην περίπτωση όπου το ποιοτικό χαρακτηριστικό εκφράζεται μέσω μιας διακριτής μεταβλητής. Για τον λόγο αυτό έχουν αναπτυχθεί τα διαγράμματα ελέγχου για ιδιότητες (*control charts for attributes*), τα οποία είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε μη βιομηχανικές εφαρμογές, όπως είναι οι υπηρεσίες, η υγεία, το περιβάλλον κλπ.

Όταν το ποιοτικό χαρακτηριστικό που μελετάται δεν μπορεί να μετρηθεί σε μια συνεχή κλίμακα, κάθε προϊόν που ελέγχεται συνηθίζεται να κατηγοριοποιείται σε ελαττωματικό ή μη ελαττωματικό (*nonconforming or conforming*), εξετάζοντας αν τουλάχιστον ένα ποιοτικό χαρακτηριστικό του έχει τιμή εκτός των ορίων προδιαγραφών ή όχι. Ο αριθμός των ελαττωματικών προϊόντων μιας παραγωγικής διεργασίας όπως και ο αριθμός των ελαττωμάτων ενός προϊόντος είναι ποιοτικά χαρακτηριστικά που περιγράφονται από διακριτές τυχαίες μεταβλητές, και επομένως μπορούν να παρακολουθηθούν μέσω διαγραμμάτων ελέγχου για ιδιότητες.

Στην ενότητα αυτή θα παρουσιαστούν τρεις βασικοί τύποι διαγραμμάτων ελέγχου για ιδιότητες. Το πρώτο διάγραμμα αφορά το ποσοστό p των ελαττωματικών προϊόντων μιας παραγωγικής διεργασίας και στη βιβλιογραφία αναφέρεται ως p διάγραμμα. Το δεύτερο διάγραμμα ελέγχου παρακολουθεί το συνολικό αριθμό των ελαττωμάτων σε μια μονάδα επιθεώρησης (*inspection unit*) και καλείται c διάγραμμα. Τέλος, περιγράφεται το u διάγραμμα ελέγχου, το οποίο ελέγχει τον μέσο αριθμό των ελαττωμάτων ανά μονάδα επιθεώρησης.

2.5.1 Διάγραμμα Ελέγχου για το ποσοστό των ελαττωματικών προϊόντων (p chart)

Έστω ότι σε μια εντός ελέγχου παραγωγική διεργασία η πιθανότητα να παραχθεί ένα ελαττωματικό προϊόν είναι γνωστή και ίση με p , και έστω ακόμη ότι η παραγωγή κάθε προϊόντος είναι ανεξάρτητη από την παραγωγή των υπολοίπων. Υπό αυτές τις προϋποθέσεις κάθε παραγόμενο προϊόν είναι μια τυχαία μεταβλητή η οποία ακολουθεί κατανομή Bernoulli με παράμετρο p . Έστω ότι από την παραγωγή συλλέγεται ένα τυχαίο δείγμα μεγέθους n και

έστω ακόμη ότι D είναι ο αριθμός των ελαττωματικών προϊόντων. Τότε, η τυχαία μεταβλητή D ακολουθεί την Διωνυμική κατανομή με παραμέτρους n και p

$$P(D = x) = \binom{n}{x} p^x (1-p)^{n-x}, \quad x = 0, 1, \dots, n$$

και με μέση τιμή $\mu_D = np$ και διακύμανση $\sigma_D^2 = np(1-p)$.

Το δειγματικό ποσοστό των ελαττωματικών προϊόντων ορίζεται ως η αναλογία του αριθμού των ελαττωματικών προϊόντων στο δείγμα (D) προς το μέγεθος του δείγματος n , όπως φαίνεται παρακάτω

$$\hat{p} = \frac{D}{n}$$

και ακολουθεί προσεγγιστικά κανονική κατανομή με μέση τιμή $\mu_{\hat{p}} = p$ και διακύμανση $\sigma_{\hat{p}}^2 = p(1-p)/n$.

Υποθέτοντας ότι το ποσοστό p είναι γνωστό και στηριζόμενοι στο θεωρητικό πλαίσιο των διαγραμμάτων ελέγχου *Shewhart*, προκύπτουν τα 3σ όρια ελέγχου (Φάσης II) ενός p διαγράμματος, όπως ορίζονται παρακάτω :

$$\begin{aligned} UCL &= p + 3\sqrt{\frac{p(1-p)}{n}} \\ CL &= p \\ LCL &= p - 3\sqrt{\frac{p(1-p)}{n}} \end{aligned}$$

Στην πράξη όμως, το ποσοστό των ελαττωματικών προϊόντων στο δείγμα συνήθως δεν είναι γνωστό εκ των προτέρων και πρέπει να εκτιμηθεί από τα διαθέσιμα δεδομένα. Η πιο συνηθισμένη διαδικασία είναι να επιλεγθούν m αρχικά δείγματα (κατά κανόνα το m πρέπει να είναι περίπου 20-25 δείγματα) μεγέθους n το καθένα. Τότε, αν D_i ο αριθμός των ελαττωματικών προϊόντων στο i δείγμα, το ποσοστό των ελαττωματικών προϊόντων του δείγματος i υπολογίζεται ως $\hat{p}_i = D_i / n$, $i = 1, 2, \dots, m$ με μέση τιμή

$$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^m D_i}{nm} = \frac{\sum_{i=1}^m \hat{p}_i}{m}.$$

Χρησιμοποιώντας το \bar{p} ως εκτίμηση του ποσοστού των ελαττωματικών προϊόντων στο δείγμα, προκύπτουν τα 3σ όρια ελέγχου (Φάσης I) του διαγράμματος p , όπως φαίνεται στο επόμενο πλαίσιο :

$$\begin{aligned}
 UCL &= \bar{p} + 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}} \\
 CL &= \bar{p} \\
 LCL &= \bar{p} - 3\sqrt{\frac{\bar{p}(1-\bar{p})}{n}}
 \end{aligned}$$

Στην μέχρι τώρα ανάλυση θεωρήθηκε ότι από την παραγωγή συλλέγονται δείγματα ίσου μεγέθους (n). Αυτή όμως η υπόθεση δεν ισχύει πάντα, καθώς κάποιες φορές το μέγεθος του δείγματος που χρησιμοποιείται είναι ίσο με την παραγωγή μιας ημέρας και προφανώς είναι εξαιρετικά απίθανο το μέγεθος της παραγωγής να είναι το ίδιο κάθε ημέρα. Για τις περιπτώσεις όπου το μέγεθος του δείγματος είναι μεταβλητό, υπάρχουν τρεις διαφορετικές μέθοδοι κατασκευής ενός p διαγράμματος.

Συνοπτικά αναφέρεται ότι η πιο απλή προσέγγιση είναι να χρησιμοποιηθούν μεταβλητά όρια ελέγχου τα οποία θα υπολογίζονται σε κάθε στάδιο της παραγωγικής διεργασίας ανάλογα με το μέγεθος του δείγματος που συλλέγεται n_i . Αυτό σημαίνει ότι για το i δείγμα τα 3σ όρια ελέγχου Φάσης I υπολογίζονται από τη σχέση $\bar{p} \pm 3\sqrt{\bar{p}(1-\bar{p})/n_i}$.

Μια διαφορετική προσέγγιση είναι να χρησιμοποιηθεί η μέση τιμή του μεγέθους των αρχικών m δειγμάτων που λαμβάνονται στη Φάση I της διεργασίας και τα όρια ελέγχου να υπολογίζονται από τη σχέση $\bar{p} \pm 3\sqrt{\bar{p}(1-\bar{p})/\bar{n}}$. Χρησιμοποιώντας αυτή τη μέθοδο τα όρια ελέγχου παραμένουν σταθερά και έτσι είναι πιο εύχρηστα και κατανοητά από τους διαχειριστές σε σχέση με τα μεταβλητά όρια της προηγούμενης μεθόδου.

Τέλος, σε περιπτώσεις με μεταβλητό μέγεθος δείγματος μπορεί να χρησιμοποιηθεί ένα τυποποιημένο διάγραμμα ελέγχου, το οποίο έχει κεντρική γραμμή στο 0 και άνω και κάτω όρια ελέγχου στο $\pm 3\sigma$ αντίστοιχα. Οι ποσότητες που απεικονίζονται στο συγκεκριμένο διάγραμμα δίνονται από τη σχέση

$$Z_i = \frac{\hat{p}_i - p}{\sqrt{\frac{p(1-p)}{n_i}}}$$

Παρόλο που ούτε το συγκεκριμένο διάγραμμα είναι δύσκολο στην κατασκευή του και μάλιστα είναι το πιο ακριβές όταν υπάρχουν μεγάλες διαφορές στα μεγέθη των δειγμάτων, χρησιμοποιείται σπανιότερα γιατί χάνεται η έννοια του ποσοστού των ελαττωματικών προϊόντων καθώς απεικονίζει διαφορές σε τυπικές αποκλίσεις.

2.5.2 Διάγραμμα Ελέγχου για τον αριθμό των ελαττωματικών προϊόντων (*np chart*)

Στις περιπτώσεις που αντί για το ποσοστό των ελαττωματικών προϊόντων απαιτείται η παρακολούθηση του αριθμού των ελαττωματικών προϊόντων, χρησιμοποιείται το λεγόμενο *np* διάγραμμα ελέγχου. Η διαδικασία κατασκευής του είναι ακριβώς ίδια με αυτή που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο και γι' αυτό αναφέρονται απλώς οι τύποι υπολογισμού των ορίων ελέγχου για τη Φάση I και Φάση II, χωρίς να κρίνεται σκόπιμη η περαιτέρω ανάλυση.

Φάση I	Φάση II
$UCL = n\bar{p} + 3\sqrt{n\bar{p}(1-\bar{p})}$	$UCL = np + 3\sqrt{np(1-p)}$
$CL = n\bar{p}$	$CL = np$
$LCL = n\bar{p} - 3\sqrt{n\bar{p}(1-\bar{p})}$	$LCL = np - 3\sqrt{np(1-p)}$

Στην πράξη χρησιμοποιείται ένα από τα διαγράμματα *p* ή *np*, καθώς είναι ισοδύναμα.

2.5.3 Διάγραμμα Ελέγχου για τον αριθμό των ελαττωμάτων (*c chart*)

Ένα προϊόν χαρακτηρίζεται ως ελαττωματικό όταν τουλάχιστον ένα ποιοτικό χαρακτηριστικό του έχει τιμή εκτός των ορίων προδιαγραφών του. Σε αυτή την περίπτωση αναφέρεται ότι το προϊόν παρουσιάζει τουλάχιστον ένα ελάττωμα (*defect or nonconformity*). Στην παρούσα παράγραφο περιγράφεται ο τρόπος κατασκευής ενός διαγράμματος ελέγχου για την παρακολούθηση του συνολικού αριθμού ελαττωμάτων σε μια μονάδα επιθεώρησης, γνωστό και ως *c* διάγραμμα ελέγχου.

Θεωρώντας δεδομένο ότι το πλήθος των ελαττωμάτων θεωρητικά είναι ένας μη πεπερασμένος αριθμός και ότι η πιθανότητα εμφάνισης ενός ελαττώματος σε συγκεκριμένο σημείο της διεργασίας είναι μικρή και σταθερή, τότε ο αριθμός των ελαττωμάτων σε μια μονάδα επιθεώρησης X ακολουθεί την κατανομή Poisson με παράμετρο $c > 0$, δηλαδή

$$P(X = x) = \frac{e^{-c} c^x}{x!}, \quad x = 0, 1, 2, \dots$$

με μέση τιμή και διακύμανση $\mu_X = \sigma_X^2 = c$.

Επομένως, τα 3σ όρια ελέγχου (Φάσης II) για ένα c διάγραμμα ελέγχου υπολογίζονται σύμφωνα με τους τύπους που παρουσιάζονται στο επόμενο πλαίσιο :

$$\begin{aligned} UCL &= c + 3\sqrt{c} \\ CL &= c \\ LCL &= c - 3\sqrt{c} \end{aligned}$$

Αν από τους υπολογισμούς το κάτω όριο ελέγχου LCL προκύψει αρνητικό, τότε τίθεται ίσο με το 0.

Στις περιπτώσεις όπου η παράμετρος c είναι άγνωστη, χρησιμοποιείται ως εκτίμησή της ο μέσος αριθμός των ελαττωμάτων όπως αυτός προκύπτει από τις m προκαταρκτικές μονάδες επιθεώρησης, έστω \bar{c} . Σύμφωνα με αυτό, τα 3σ όρια ελέγχου (Φάσης I) ορίζονται από τις επόμενες σχέσεις :

$$\begin{aligned} UCL &= \bar{c} + 3\sqrt{\bar{c}} \\ CL &= \bar{c} \\ LCL &= \bar{c} - 3\sqrt{\bar{c}} \end{aligned}$$

Κλείνοντας την παράγραφο αξίζει να σημειωθεί ότι η επίδραση πολλών και διαφορετικών παραγόντων μπορεί να επηρεάσει την κατανομή του αριθμού των ελαττωμάτων και έτσι αυτή να μην μπορεί να περιγραφεί επαρκώς από την κατανομή Poisson. Τέτοιες περιπτώσεις είναι η μίξη διαφορετικών τύπων ελαττωμάτων σε ένα προϊόν ή ακόμα όταν στα δεδομένα υπάρχουν είτε πάρα πολλά είτε εμφανώς λίγα μηδενικά. Διάφορες ενδιαφέρουσες

προσεγγίσεις του θέματος αυτού μπορεί κανείς να βρει σε μελέτες όπως των Johnson and Kotz (1969), Jackson (1972), Sheaffer and Leavenworth (1976) και Gardiner (1987).

2.5.4 Διάγραμμα Ελέγχου για τον μέσο αριθμό ελαττωμάτων (*u chart*)

Το c διάγραμμα ελέγχου, που περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, κατασκευάζεται με την συλλογή δειγμάτων μεγέθους ίσου με μια μονάδα επιθεώρησης. Παρόλα αυτά, συχνά προτιμάται το κάθε δείγμα να περιλαμβάνει περισσότερες της μιας μονάδας επιθεώρησης αυξάνοντας με τον τρόπο αυτό την πιθανότητα εμφάνισης ελαττωμάτων. Σε αυτές τις περιπτώσεις χρησιμοποιείται ένα διάγραμμα ελέγχου για την παρακολούθηση του μέσου αριθμού ελαττωμάτων σε κάθε δείγμα, γνωστό και ως u διάγραμμα ελέγχου.

Έστω ότι από την παραγωγή συλλέγονται ανεξάρτητα τυχαία δείγματα μεγέθους n μονάδων επιθεώρησης το καθένα, και έστω ακόμη ότι X_i είναι ο συνολικός αριθμός ελαττωμάτων στο i -δείγμα. Όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη παράγραφο, η τυχαία μεταβλητή που απεικονίζει τον αριθμό των ελαττωμάτων σε μια μονάδα επιθεώρησης ακολουθεί την κατανομή Poisson με παράμετρο c . Σύμφωνα με αυτό, η τυχαία μεταβλητή X_i θα ακολουθεί την κατανομή Poisson με παράμετρο nc . Έστω $U_i = X_i / n$ ο μέσος αριθμός ελαττωμάτων στο i -δείγμα. Τότε για τη μεταβλητή U_i ισχύει ότι

$$\mu_{U_i} = c \text{ και } \sigma_{U_i}^2 = c/n.$$

Επομένως, ένα διάγραμμα ελέγχου για την παρακολούθηση του μέσου αριθμού ελαττωμάτων ανά μονάδα επιθεώρησης σε κάθε δείγμα μεγέθους n , θα απεικονίζει τις τιμές της τυχαίας μεταβλητής U_i . Τα 3σ όρια ελέγχου του διαγράμματος, δεδομένου ότι η παράμετρος c είναι γνωστή (Φάση II), δίνονται παρακάτω :

$$UCL = c + 3\sqrt{\frac{c}{n}}$$

$$CL = c$$

$$LCL = c - 3\sqrt{\frac{c}{n}}$$

Στην περίπτωση που η παράμετρος c είναι άγνωστη και πρέπει να εκτιμηθεί, χρησιμοποιούνται m προκαταρκτικά δείγματα μεγέθους n , και υπολογίζεται η ποσότητα \bar{U} , για την οποία μπορεί εύκολα να αποδειχθεί ότι ισχύει $E(\bar{U}) = c$. Επομένως, χρησιμοποιώντας ως εκτίμηση του c , το \bar{U} τα νέα 3σ όρια ελέγχου (Φάσης I) που προκύπτουν υπολογίζονται από τις σχέσεις του επόμενου πλαισίου.

$$\begin{aligned} UCL &= \bar{U} + \sqrt{\frac{\bar{U}}{n}} \\ CL &= \bar{U} \\ LCL &= \bar{U} - \sqrt{\frac{\bar{U}}{n}} \end{aligned}$$

Κλείνοντας την παρούσα παράγραφο, αξίζει να αναφερθεί ότι το μέγεθος των δειγμάτων πολύ συχνά δεν είναι σταθερό, όπως θεωρήθηκε δεδομένο στην μέχρι τώρα ανάλυση. Σε αυτές τις περιπτώσεις, είτε χρησιμοποιούνται τα μεταβλητά 3σ όρια ελέγχου $\bar{U} \pm 3\sqrt{\bar{U}/n_i}$, είτε απλά χρησιμοποιείται το μέσο μέγεθος δείγματος \bar{n} των m προκαταρκτικών δειγμάτων. Τότε, τα σταθερά πλέον 3σ όρια ελέγχου παίρνουν τη μορφή $\bar{U} \pm 3\sqrt{\bar{U}/\bar{n}}$. Μια ακόμη προσέγγιση η οποία θα πρέπει να προτιμάται σύμφωνα με τον Montgomery (2001), είναι η χρήση ενός τυποποιημένου διαγράμματος ελέγχου, το οποίο θα έχει κεντρική γραμμή στο 0, άνω όριο ελέγχου στο $+3\sigma$, κάτω όριο ελέγχου στο -3σ και θα απεικονίζει τις τιμές της ποσότητας

$$Z_i = \frac{U_i - \bar{U}}{\sqrt{\frac{\bar{U}}{n_i}}}$$

Αξίζει να σημειωθεί ότι το συγκεκριμένο τυποποιημένο διάγραμμα ελέγχου είναι επίσης πολύ χρήσιμο στις περιπτώσεις όπου υπάρχει χαμηλός ρυθμός παραγωγής.

2.6 Διαγράμματα Ελέγχου υπό την παρουσία Αυτοσυσχέτισης

Οι δύο βασικές υποθέσεις που γίνονται πριν την κατασκευή των κλασικών διαγραμμάτων ελέγχου *Shewhart* είναι ότι τα δεδομένα που συλλέγονται όταν η διεργασία είναι υπό έλεγχο κατανομονται κανονικά και οι παρατηρήσεις είναι μεταξύ τους ανεξάρτητες. Όταν κάποια από αυτές τις υποθέσεις παραβιάζονται, τα διαγράμματα ελέγχου δεν λειτουργούν σωστά και αναπόφευκτα οδηγούν σε λανθασμένα συμπεράσματα. Στην πράξη, και όταν τα δεδομένα προέρχονται από πραγματικές διεργασίες, το φαινόμενο αυτό είναι πολύ συχνό. Στην περίπτωση της μη κανονικότητας των δεδομένων, το πρόβλημα μπορεί να διορθωθεί με τον κατάλληλο μετασχηματισμό των δεδομένων και τα διαγράμματα ελέγχου μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά. Στην περίπτωση όμως που παρατηρηθεί αυτοσυσχέτιση στα δεδομένα, δηλαδή όταν οι μετρήσεις που λαμβάνονται από το ποιοτικό χαρακτηριστικό που παρακολουθείται δεν είναι μεταξύ τους ανεξάρτητες, ακόμα και αν αυτό είναι σε μικρό βαθμό, τα κλασικά διαγράμματα ελέγχου δεν θα λειτουργήσουν σωστά δίνοντας πολλούς λανθασμένους συναγερμούς εκτός ελέγχου διεργασίας. Πολλές μελέτες έχουν γίνει πάνω σε αυτό το θέμα, συμπεριλαμβανομένων αυτές των Berthouex, Hunter and Pallesen (1989), Alwan and Roberts (1988), Montgomery and Friedman (1989), Alwan (1992), Harris and Ross (1991), Montgomery and Mastrangelo (1991) και Maragah and Woodall (1992).

Μια προσέγγιση που έχει αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμη και αποτελεσματική στην περίπτωση των αυτοσυσχετισμένων δεδομένων είναι η μοντελοποίησή τους σε ένα κατάλληλο μοντέλο χρονοσειρών ώστε να απομακρυνθεί η αυτοσυσχέτιση. Αφού επιλεγεί το κατάλληλο μοντέλο, στη συνέχεια χρησιμοποιούνται τα κατάλοιπά του και απεικονίζονται σε ένα κλασικό διάγραμμα ελέγχου. Έστω ότι το ποιοτικό χαρακτηριστικό X_t μπορεί να μοντελοποιηθεί ως

$$X_t = \xi + \varphi X_{t-1} + \varepsilon_t ,$$

όπου ξ και φ ($-1 < \varphi < 1$) είναι άγνωστες σταθερές και $\varepsilon_t \sim N(0, \sigma^2)$. Το μοντέλο αυτής της μορφής ονομάζεται αυτοπαλίνδρομο μοντέλο πρώτης τάξης (*first order autoregressive model*) και συμβολίζεται με AR(1). Οι παρατηρήσεις X_t του μοντέλου έχουν μέση τιμή $\xi / (1 - \varphi)$, τυπική απόκλιση ίση με $\sigma / (1 - \varphi^2)^{1/2}$, και οι παρατηρήσεις X_t και X_{t-k} έχουν συντελεστή

συσχέτισης ίσο με φ^k , δηλαδή η συνάρτηση αυτοσυσχέτισης είναι εκθετικά φθίνουσα. Έστω $\hat{\varphi}$ η εκτίμηση του φ , η οποία εκτιμάται από τα διαθέσιμα δεδομένα, και \hat{X}_t η προσαρμοσμένη τιμή της X_t . Τότε τα κατάλοιπα του μοντέλου

$$\varepsilon_t = X_t - \hat{X}_t$$

είναι ανεξάρτητα και ακολουθούν προσεγγιστικά κανονική κατανομή με μέση τιμή 0 και σταθερή διακύμανση. Επομένως, τα κλασικά διαγράμματα ελέγχου μπορούν να κατασκευαστούν απεικονίζοντας τις τιμές των καταλοίπων και τα εκτός ελέγχου σημεία ή η παραβίαση κάποιου κανόνα ρών θα υποδεικνύει ότι η παράμετρος φ έχει μεταβληθεί, κάτι που αυτόματα οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η αρχική μεταβλητή X_t είναι εκτός ελέγχου.

Μια εμφανής επέκταση του μοντέλου AR(1) είναι η ακόλουθη

$$X_t = \xi + \varphi_1 X_{t-1} + \varphi_2 X_{t-2} + \varepsilon_t$$

και ονομάζεται αυτοπαλίνδρομο μοντέλο δεύτερης τάξης (*second order autoregressive model*) ή AR(2). Γενικά, ένα αυτοπαλίνδρομο μοντέλο τάξης p συμβολίζεται με AR(p) και ορίζεται ως

$$X_t = \xi + \varphi_1 X_{t-1} + \dots + \varphi_p X_{t-p} + \varepsilon_t.$$

Σύμφωνα με το μοντέλο AR(p) η αρχική μεταβλητή της χρονοσειράς, την χρονική στιγμή t εξαρτάται από τον γραμμικό συνδυασμό των p τελευταίων τιμών της χρονοσειράς $X_{t-1}, X_{t-2}, \dots, X_{t-p}$.

Ένας εναλλακτικός τρόπος μοντελοποίησης της εξάρτησης είναι μέσω των καταλοίπων ε_t . Τότε το μοντέλο παίρνει τη μορφή

$$X_t = \mu + \varepsilon_t - \theta \varepsilon_{t-1}$$

και ονομάζεται μοντέλο κινητού μέσου πρώτου βαθμού (*first order moving average model*) ή MA(1). Σε αυτό το μοντέλο η συσχέτιση μεταξύ της X_t και της X_{t-1} ισούται με $\rho_1 = -\theta / (1 + \theta^2)$ και είναι 0 για όλες τις άλλες χρονικές υστερήσεις (*lags*). Γενικά, ένα μοντέλο κινητού μέσου τάξης q συμβολίζεται με MA(q) και ορίζεται ως

$$X_t = \mu + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q}.$$

Στην πράξη, πολύ συχνά τα αυτοπαλίνδρομα μοντέλα και τα μοντέλα κινητού μέσου συνδυάζονται σχηματίζοντας μια χρήσιμη ομάδα υποδειγμάτων, γνωστά ως αυτοπαλίνδρομα μοντέλα κινητού μέσου (*autoregressive moving average or mixed models*). Τα μοντέλα αυτά συμβολίζονται $ARMA(p,q)$ και η γενική μορφή τους είναι

$$X_t = \xi + \varphi_1 X_{t-1} + \dots + \varphi_p X_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \dots - \theta_q \varepsilon_{t-q}$$

Το αυτοπαλίνδρομο μέρος του μοντέλου (AR) είναι τάξης p και το μέρος του κινούμενου μέσου (MA) είναι τάξης q . Τα υποδείγματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο για στάσιμες χρονοσειρές, δηλαδή όταν ο μέσος και η διακύμανσή της δεν μεταβάλλονται διαχρονικά και η συνδιακύμανση των τιμών της σε δύο χρονικές περιόδους εξαρτάται μόνο από τις χρονικές υστερήσεις και όχι από καθαυτό το χρονικό σημείο στο οποίο υπολογίζεται.

Στην περίπτωση των μη στάσιμων χρονοσειρών χρησιμοποιούνται d διαφορές μέχρι να προκύψει μια στάσιμη χρονοσειρά. Τα μοντέλα που προκύπτουν από αυτή την διαδικασία ονομάζονται ολοκληρωμένα αυτοπαλίνδρομα μοντέλα κινητού μέσου (*autoregressive integrated moving average models*), γνωστά και ως υποδείγματα $ARIMA(p,d,q)$. Με p συμβολίζονται οι παράμετροι του αυτοπαλίνδρομου μέρους του μοντέλου, με d συμβολίζεται ο αριθμός των διαφορών που απαιτείται για να γίνει η χρονοσειρά στάσιμη και τέλος q είναι οι παράμετροι του κινητού μέρους του μοντέλου. Εκτενής ανάλυση των μοντέλων αυτών υπάρχει στις μελέτες των Montgomery, Johnson and Gardiner (1990) και Box, Jenkins and Reinsel (1994).

Αφού καθοριστεί το κατάλληλο μοντέλο χρονοσειρών θα πρέπει να επιλεγθεί το διάγραμμα ελέγχου που θα χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση της διεργασίας. Όταν τα κατάλοιπα είναι ανεξάρτητα και κανονικά κατανομημένα, τότε αυτά μπορούν να απεικονιστούν σε ένα διάγραμμα ελέγχου $ARIMA$ για μεμονωμένες παρατηρήσεις, όπου τα όρια ελέγχου και η κεντρική γραμμή υπολογίζονται από τις επόμενες σχέσεις :

$$UCL = \bar{e} + \frac{3}{1,128} \bar{R}_{kl}$$

$$CL = \bar{e} (\cong 0)$$

$$LCL = \bar{e} - \frac{3}{1,128} \bar{R}_{kl}$$

όπου \bar{e} είναι ο μέσος των καταλοίπων του μοντέλου και \bar{R}_{kl} είναι το μέσο κινούμενο εύρος των καταλοίπων. Στην περίπτωση που απαιτείται μεγαλύτερη ευαισθησία από το διάγραμμα ελέγχου, μπορούν εναλλακτικά να χρησιμοποιηθούν τα διαγράμματα ελέγχου *EWMA* και *CUSUM*, όπου θα απεικονίζονται τα κατάλοιπα του μοντέλου.

Όλα όσα αναφέρθηκαν παραπάνω προϋποθέτουν ότι τα κατάλοιπα του μοντέλου που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή των διαγραμμάτων ελέγχου είναι ανεξάρτητα και προσεγγίζονται από την κανονική κατανομή. Στην περίπτωση που η υπόθεση αυτή δεν ικανοποιείται θα πρέπει να βρεθούν εναλλακτικά μοντέλα χρονοσειρών ή να χρησιμοποιηθούν μη παραμετρικές μέθοδοι.

2.7 Πολυμεταβλητά Διαγράμματα Ελέγχου

Στις προηγούμενες ενότητες έγινε μια εκτενής ανάλυση των διαγραμμάτων ελέγχου παρακολούθησης μιας τυχαίας μεταβλητής ή ενός ποιοτικού χαρακτηριστικού των προϊόντων μιας παραγωγικής διεργασίας. Παρόλα αυτά, στην πράξη πολύ συχνά απαιτείται η παρακολούθηση δύο ή και περισσότερων ποιοτικών χαρακτηριστικών ενός προϊόντος ώστε να μπορεί να κριθεί αν το προϊόν πληρεί ή όχι τις προδιαγραφές. Τα τελευταία χρόνια, η ραγδαία ανάπτυξη της τεχνολογίας έχει καταστήσει πολύ εύκολη την ταυτόχρονη μέτρηση διαφορετικών παραμέτρων σε κάθε προϊόν που εξέρχεται από την παραγωγική διεργασία. Αυτό οδηγεί σε τεραστίου μεγέθους βάσεις δεδομένων αποτελούμενες από ανεξάρτητες μετρήσεις, οι οποίες αν αναλυθούν με τις κλασικές μεθόδους μονομεταβλητού ελέγχου διεργασιών καταλήγουν συχνά σε παραπλανητικά αποτελέσματα.

Για παράδειγμα, έστω p στατιστικά ανεξάρτητα ποιοτικά χαρακτηριστικά ενός προϊόντος και έστω ότι κατασκευάζονται διαγράμματα ελέγχου \bar{X} με πιθανότητα σφάλματος τύπου I ίσο με α , για κάθε ένα ποιοτικό χαρακτηριστικό. Τότε, η πραγματική πιθανότητα σφάλματος τύπου I για ολόκληρη την διαδικασία ελέγχου είναι ίση με

$$\alpha' = 1 - (1 - \alpha)^p$$

και η πιθανότητα όλοι οι μέσοι των p χαρακτηριστικών να βρεθούν ταυτόχρονα εντός των ορίων ελέγχου, όταν η διεργασία είναι όντως εντός στατιστικού ελέγχου είναι ίση με

$$P = (1 - \alpha)^p.$$

Προφανώς, υπάρχει μια σοβαρή αλλοίωση στην πιθανότητα αυτή, ακόμα και για μικρές τιμές του p . Επίσης, αν τα p ποιοτικά χαρακτηριστικά δεν είναι ανεξάρτητα, κάτι το οποίο είναι πολύ πιθανό όταν προέρχονται από το ίδιο προϊόν, οι παραπάνω σχέσεις δεν ισχύουν και μάλιστα δεν υπάρχει κάποιος εύκολος τρόπος να υπολογιστούν αυτές οι πιθανότητες (Montgomery, 2001). Για τον λόγο αυτό, κρίνεται αναγκαία η χρήση μεθόδων Πολυμεταβλητού Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών (*Multivariate Statistical Process Control-MSPC*).

Την αρχή στον Πολυμεταβλητό Στατιστικό Έλεγχο Διεργασιών έκανε ο Harold Hotelling το 1947, ο οποίος εφάρμοσε τη διαδικασία σε δεδομένα που συνέλλεξε από βομβαρδισμένες περιοχές κατά τη διάρκεια του Δεύτερου Παγκοσμίου πολέμου. Στην συνέχεια ακολούθησε πληθώρα μελετών όπως αυτές των Hicks (1955), Jackson (1956,1959,1985), Montgomery and Wadsworth (1972), Alt (1985), Crosier (1988), Pignatiello and Runger (1990), Hawkins (1991,1993), Lowry et al. (1992), Tracy-Young and Mason (1992), και Lowry and Montgomery (1995).

Στην παρούσα ενότητα αναπτύσσονται οι πολυδιάστατες μορφές των μονοδιάστατων διαγραμμάτων ελέγχου τύπου *Shewhart* και *EWMA*, που περιγράφηκαν στην αρχή του κεφαλαίου.

2.7.1 *Hotelling T²* Διάγραμμα Ελέγχου

Το πιο γνωστό πολυμεταβλητό διάγραμμα ελέγχου για την παρακολούθηση του διανύσματος των μέσων τιμών διάφορων ποιοτικών χαρακτηριστικών ενός προϊόντος από μια παραγωγική διεργασία είναι το *Hotelling T²* διάγραμμα ελέγχου, αντίστοιχο του *Shewhart \bar{X}* διάγραμμα στη μονομεταβλητή περίπτωση. Παρακάτω παρουσιάζονται δύο τύποι του διαγράμματος αυτού, ένας για την περίπτωση των ομάδων (μέγεθος δείγματος $n > 1$) και ένας για την περίπτωση των μεμονωμένων παρατηρήσεων ($n = 1$).

2.7.1.1 Μέγεθος δείγματος $n > 1$

Έστω ότι ελέγχονται ταυτόχρονα p συσχετισμένα ποιοτικά χαρακτηριστικά X_1, X_2, \dots, X_p ενός προϊόντος, τα οποία κατανέμονται σύμφωνα με την p -διάστατη κανονική κατανομή με παραμέτρους μ και Σ . Έστω ακόμη ότι υπολογίζεται ο μέσος κάθε ποιοτικού

χαρακτηριστικού από δείγματα μεγέθους $n > 1$. Τότε το σύνολο των μέσων αυτών για κάθε ένα δείγμα αναπαριστάται από το $p \times 1$ διάνυσμα

$$\bar{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \bar{x}_p \end{bmatrix}$$

Η στατιστική συνάρτηση από την οποία υπολογίζεται για κάθε ένα δείγμα το σημείο που θα απεικονιστεί στο διάγραμμα ελέγχου, φαίνεται παρακάτω

$$\chi_0^2 = n(\bar{\mathbf{x}} - \boldsymbol{\mu})' \boldsymbol{\Sigma}^{-1}(\bar{\mathbf{x}} - \boldsymbol{\mu}), \quad \chi_0^2 \sim \chi_p^2$$

όπου $\boldsymbol{\mu}' = [\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_p]$ είναι το διάνυσμα των εντός ελέγχου μέσων τιμών για κάθε ποιοτικό χαρακτηριστικό και $\boldsymbol{\Sigma}$ είναι ο πίνακας διακυμάνσεων-συνδιακυμάνσεων.

Όταν τα $\boldsymbol{\mu}$ και $\boldsymbol{\Sigma}$ είναι γνωστά, το άνω όριο ελέγχου (Φάσης II) του διαγράμματος για την παρακολούθηση του διανύσματος των μέσων τιμών δίνεται στο επόμενο πλαίσιο

$$UCL = \chi_{p;a}^2$$

όπου $\chi_{p;a}^2$ είναι το άνω α -ποσοστιαίο σημείο της κατανομής χ^2 με p βαθμούς ελευθερίας. Το διάγραμμα αυτό συχνά καλείται χ^2 - διάγραμμα ελέγχου (*chi-square control chart*) και περιλαμβάνει μόνο το άνω όριο ελέγχου UCL. Επομένως, για να θεωρείται η διεργασία εντός στατιστικού ελέγχου θα πρέπει οι τιμές της στατιστικής συνάρτησης χ_0^2 να βρίσκονται κάτω από το άνω όριο ελέγχου του διαγράμματος.

Στην πράξη όμως, τις περισσότερες φορές οι παράμετροι $\boldsymbol{\mu}$ και $\boldsymbol{\Sigma}$ είναι άγνωστες και θα πρέπει να εκτιμηθούν από κάποια προκαταρκτικά δείγματα που συλλέγονται από την παραγωγή όταν η διεργασία είναι εντός στατιστικού ελέγχου. Έστω ότι λαμβάνονται m προκαταρκτικά δείγματα μεγέθους $n > 1$. Τότε, στη θέση του $\boldsymbol{\mu}$ χρησιμοποιείται το διάνυσμα

$\bar{\bar{\mathbf{x}}}$ το οποίο αποτελείται από τους ολικούς δειγματικούς μέσους $\bar{\bar{X}}_j$ των m προκαταρκτικών δειγμάτων. Ο τύπος υπολογισμού του ολικού δειγματικού μέσου για το j -ποιοτικό χαρακτηριστικό δίνεται παρακάτω

$$\bar{\bar{X}}_j = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \bar{X}_{jk}, \quad j = 1, 2, \dots, p; k = 1, 2, \dots, m$$

Αντίστοιχα, στη θέση του Σ χρησιμοποιείται ο πίνακας των δειγματικών διακυμάνσεων-συνδιακυμάνσεων \mathbf{S} , ο οποίος όταν η διεργασία είναι εντός στατιστικού ελέγχου είναι ένας αμερόληπτος εκτιμητής του Σ . Ο διαστάσεων $p \times p$ πίνακας \mathbf{S} αποτελείται από τα στοιχεία

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \bar{S}_1^2 & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{13} & \cdots & \bar{S}_{1p} \\ & \bar{S}_2^2 & \bar{S}_{23} & \cdots & \bar{S}_{2p} \\ & & \bar{S}_3^2 & \ddots & \vdots \\ & & & & \bar{S}_p^2 \end{bmatrix}$$

Επομένως, όταν τα $\boldsymbol{\mu}$ και Σ είναι άγνωστα, στο διάγραμμα ελέγχου που κατασκευάζεται απεικονίζονται οι τιμές της στατιστικής συνάρτησης

$$T^2 = n(\bar{\mathbf{x}} - \bar{\bar{\mathbf{x}}})' \mathbf{S}^{-1} (\bar{\mathbf{x}} - \bar{\bar{\mathbf{x}}})$$

Το διάγραμμα αυτό είναι γνωστό ως *Hotelling T^2 διάγραμμα ελέγχου*. Τα όρια ελέγχου Φάσης I ενός *Hotelling T^2 διαγράμματος ελέγχου* δίνονται στο επόμενο πλαίσιο.

$$UCL = \frac{p(m-1)(n-1)}{mn - m - p + 1} F_{p, mn - m - p + 1; \alpha}$$

$$LCL = 0$$

Τα παραπάνω όρια χρησιμοποιούνται μέχρι η διεργασία να είναι εντός στατιστικού ελέγχου, ώστε να μπορούν να υπολογιστούν οι τιμές των ποσοτήτων $\bar{\bar{\mathbf{x}}}$ και \mathbf{S} .

Στη συνέχεια, τα όρια ελέγχου (Φάσης II) που χρησιμοποιούνται για την μελλοντική παρακολούθηση της διεργασίας υπολογίζονται από τις σχέσεις του επόμενου πλαισίου.

$$UCL = \frac{p(m+1)(n-1)}{mn-m-p+1} F_{p, mn-m-p+1; a}$$

$$LCL = 0$$

Κλείνοντας την παράγραφο αυτή, σημειώνεται ότι στις περιπτώσεις όπου τα μ και Σ έχουν εκτιμηθεί από έναν αρκετά μεγάλο αριθμό προκαταρκτικών δειγμάτων (σύμφωνα με τους Lowry and Montgomery (1995) απαιτούνται συχνά πάνω από 50 προκαταρκτικά δείγματα), συνηθίζεται να χρησιμοποιείται ως άνω όριο ελέγχου του διαγράμματος το $UCL = \chi_{p,a}^2$ τόσο στην Φάση I όσο και στη Φάση II του στατιστικού ελέγχου.

2.7.1.2 Μέγεθος δείγματος n=1

Σε κάποιες βιομηχανικές εφαρμογές όπου το μέγεθος του δείγματος είναι εκ φύσεως ίσο με τη μονάδα ($n=1$) και απαιτείται ο έλεγχος πολλαπλών ποιοτικών χαρακτηριστικών, για να χρησιμοποιηθεί η μέθοδος που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη ενότητα θα πρέπει να τροποποιηθεί κατάλληλα.

Έστω ότι από την παραγωγή συλλέγονται m δείγματα μεγέθους $n=1$ και ελέγχονται ταυτόχρονα p ποιοτικά χαρακτηριστικά από κάθε δείγμα. Έστω ακόμα ότι \mathbf{x} και \mathbf{S} είναι το διάνυσμα των δειγματικών μέσων και ο πίνακας διακυμάνσεων-συνδιακυμάνσεων, αντίστοιχα, των παρατηρήσεων αυτών. Τότε η στατιστική συνάρτηση που απεικονίζεται στο διάγραμμα ελέγχου δίνεται από τη σχέση :

$$T^2 = (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})' \mathbf{S}^{-1} (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}})$$

Τα όρια ελέγχου Φάσης II (γνωστά \mathbf{x} και \mathbf{S}) του διαγράμματος που απεικονίζονται οι τιμές της συγκεκριμένης στατιστικής συνάρτησης δίνονται στο παρακάτω πλαίσιο :

$$UCL = \frac{p(m+1)(m-1)}{m^2 - mp} F_{p, m-p; a}$$

$$LCL = 0$$

Όταν τα m προκαταρκτικά δείγματα που έχουν συλλεχθεί για την εκτίμηση των \mathbf{x} και \mathbf{S} είναι πολλά ($m > 100$), τότε πολλοί χρησιμοποιούν εναλλακτικά τα προσεγγιστικά όρια ελέγχου :

$$UCL = \frac{p(m-1)}{m-p} F_{p,m,m-p;a}$$

ή

$$UCL = \chi_{p;a}^2$$

Οι Tracy *et al.* (1992) πρότειναν τα όρια ελέγχου Φάσης Ι στην περίπτωση που το μέγεθος του δείγματος δεν ξεπερνά την μονάδα να ορίζονται από τις σχέσεις

$$UCL = \frac{(m-1)^2}{m} B_{p/2,(m-p-1)/2;a}$$

$$LCL = 0$$

όπου $B_{p/2,(m-p-1)/2;a}$ είναι το άνω α -ποσοστιαίο σημείο της κατανομής Βήτα με παραμέτρους $p/2$ και $(m-p-1)/2$.

Ένα σημαντικό πρόβλημα που υπάρχει στην περίπτωση των μεμονωμένων παρατηρήσεων είναι η εκτίμηση του πίνακα διακυμάνσεων-συνδιακυμάνσεων. Για μια πολύ καλή ανάλυση του συγκεκριμένου προβλήματος μπορεί κανείς να ανατρέξει στην μελέτη των Sullivan and Woodall (1995).

2.7.2 Διάγραμμα Ελέγχου για την παρακολούθηση της διασποράς

Αν και η παρακολούθηση του διανύσματος των μέσων τιμών δίνει στον χρήστη μια πολύ σημαντική πληροφόρηση για την διεργασία, μόνη της δεν είναι αρκετή. Όπως και στη μονομεταβλητή περίπτωση, έτσι κι εδώ, είναι απαραίτητη η παράλληλη παρακολούθηση της διασποράς της διεργασίας για να προκύψουν ασφαλή και ορθά συμπεράσματα.

Στην πολυμεταβλητή περίπτωση η διασπορά της διεργασίας συνοψίζεται στον $p \times p$ πίνακα διακυμάνσεων-συνδιακυμάνσεων Σ (*covariance matrix*). Η διαγώνιος του πίνακα περιλαμβάνει τις διακυμάνσεις της κάθε μονοδιάστατης μεταβλητής και τα μη-διαγώνια στοιχεία του πίνακα είναι οι συνδιακυμάνσεις. Ο Alt το 1985 παρουσίασε δύο εναλλακτικές

μεθόδους για την παρακολούθηση της διασποράς όταν απαιτείται η ταυτόχρονη παρακολούθηση πολλών μεταβλητών.

Η πρώτη προσέγγιση είναι ουσιαστικά μια επέκταση του μονοδιάστατου S^2 -διαγράμματος ελέγχου. Η διαδικασία περιλαμβάνει τον συνεχή έλεγχο της υπόθεσης

$$H_0 : \Sigma = \Sigma_0 - H_1 : \Sigma \neq \Sigma_0$$

και στο διάγραμμα ελέγχου απεικονίζονται οι τιμές της στατιστικής συνάρτησης

$$W_i = -pn + pn \ln(n) - n \ln(|\mathbf{A}_i| / |\Sigma|) + tr(\Sigma^{-1} \mathbf{A}_i)$$

όπου $\mathbf{A}_i = (n-1)\mathbf{S}_i$, \mathbf{S}_i είναι ο πίνακας διακυμάνσεων-συνδιακυμάνσεων του i - δείγματος και $tr(\cdot)$ είναι το ίχνος ενός πίνακα (άθροισμα διαγώνιων στοιχείων του). Τα όρια ελέγχου Φάσης II του διαγράμματος παρουσιάζονται στο επόμενο πλαίσιο.

$$UCL = \chi_{p(p+1)/2; \alpha}^2$$

$$LCL = 0$$

Όσο οι τιμές της W_i παραμένουν κάτω από το άνω όριο ελέγχου UCL , η διεργασία θεωρείται εντός στατιστικού ελέγχου.

Η δεύτερη προσέγγιση βασίζεται στη γενικευμένη δειγματική διακύμανση, $|\mathbf{S}|$ (*sample generalized variance*). Τα όρια ελέγχου (Φάσης I) και η κεντρική γραμμή του διαγράμματος αυτού παρουσιάζονται στο επόμενο πλαίσιο :

$$UCL = |\Sigma| (b_1 + 3b_2^{1/2})$$

$$CL = b_1 |\Sigma|$$

$$LCL = |\Sigma| (b_1 - 3b_2^{1/2})$$

Αν $LCL < 0$, το κάτω όριο ελέγχου τίθεται ίσο με το μηδέν.

Συχνά στην πράξη το Σ είναι άγνωστο και πρέπει να εκτιμηθεί από τη συλλογή προκαταρκτικών δειγμάτων. Σε αυτή την περίπτωση αρκεί να αντικατασταθεί στα όρια του παραπάνω πλαισίου, το $|\Sigma|$ με τον αμερόληπτο εκτιμητή του $|\mathbf{S}| / b_1$.

2.7.3 Διάγραμμα Ελέγχου MEWMA

Τα διαγράμματα ελέγχου χ^2 και *Hotelling T²* που αναπτύχθηκαν σε προηγούμενες παραγράφους είναι διαγράμματα τύπου *Shewhart*, το οποίο σημαίνει ότι αδυνατούν να ανιχνεύσουν μικρές μετατοπίσεις του διανύσματος των μέσων τιμών. Για τον λόγο αυτό, αναπτύχθηκαν μέθοδοι επέκτασης των διαγραμμάτων *EWMA* ώστε να καλύπτουν την πολυμεταβλητή περίπτωση.

Οι Lowry *et al.* το 1992 πρότειναν το πολυμεταβλητό διάγραμμα *EWMA*, γνωστό και ως *MEWMA*, το οποίο απεικονίζει τις τιμές της στατιστικής συνάρτησης

$$\mathbf{T}_i^2 = \mathbf{Z}_i' \boldsymbol{\Sigma}_{\mathbf{Z}_i}^{-1} \mathbf{Z}_i$$

όπου $\mathbf{Z}_i = \lambda \mathbf{x}_i + (1-\lambda)\mathbf{Z}_{i-1}$, $0 < \lambda \leq 1$, $\mathbf{Z}_0 = \mathbf{0}$ και $\boldsymbol{\Sigma}_{\mathbf{Z}_i}$ ο πίνακας διακυμάνσεων-συνδιακυμάνσεων

$$\boldsymbol{\Sigma}_{\mathbf{Z}_i} = \frac{\lambda}{2-\lambda} [1 - (1-\lambda)^{2i}] \boldsymbol{\Sigma}$$

Για το άνω όριο ελέγχου του διαγράμματος οι Prabhu and Runger (1997) παρουσίασαν ειδικούς πίνακες σύμφωνα με τους οποίους επιλέγεται η τιμή του. Για διαφορετικές τιμές της παραμέτρου λ , ανάλογα με το πόσα χαρακτηριστικά p παρακολουθούνται από τη διεργασία (2, 4, 6, 10 ή 15) και σύμφωνα με το μέγεθος της μετατόπισης που απαιτείται να ανιχνευτεί [$\delta = (\boldsymbol{\mu}' \boldsymbol{\Sigma}^{-1} \boldsymbol{\mu})^{1/2}$] αντιστοιχούν συγκεκριμένες τιμές για το άνω όριο ελέγχου του διαγράμματος (Bersimis, Psarakis and Panaretos, 2007).

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Ανασκόπηση Μη Βιομηχανικών Εφαρμογών

3.1 Εισαγωγή

Στο δεύτερο κεφάλαιο έγινε αναφορά στις βασικές αρχές του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών και εκτενής παρουσίαση του θεωρητικού υπόβαθρου των πιο γνωστών και κοινώς αναγνωρισμένων διαγραμμάτων ελέγχου. Για να θεωρηθεί όμως πλήρης η διερεύνηση αυτών των πολύ χρήσιμων τεχνικών, κρίνεται σκόπιμο, εκτός από τη θεωρία, να παρουσιαστούν επίσης οι τρόποι και οι τομείς που μέχρι σήμερα έχουν εφαρμοστεί.

Από το 1924 που ο *Shewhart* πρώτος εισήγαγε τα διαγράμματα ελέγχου, χρησιμοποιήθηκαν για τον έλεγχο και κατ' επέκταση την βελτίωση διεργασιών αποκλειστικά στη βιομηχανία. Τις τελευταίες όμως δεκαετίες παρατηρούνται όλο και περισσότερες εφαρμογές σε τομείς εκτός της τυπικής παραγωγικής διαδικασίας, όπως είναι η υγεία, η παροχή υπηρεσιών κ.α. Εξαιτίας της ραγδαίας οικονομικής ανάπτυξης σε παγκόσμιο επίπεδο, ο ανταγωνισμός μεταξύ των επιχειρήσεων έχει στρέψει το ενδιαφέρον όλων στην παρακολούθηση και την συνεχή αξιολόγηση των υπηρεσιών που προσφέρουν, με σκοπό την βελτίωση της απόδοσής τους και κατ' επέκταση την αύξηση των κερδών τους.

Στο κεφάλαιο αυτό θα γίνει μια σύντομη ανασκόπηση των μη-βιομηχανικών εφαρμογών των διαγραμμάτων ελέγχου που περιλαμβάνονται σε δημοσιεύσεις από το 1989 έως και τα μέσα του 2014. Το 2001, οι MacCathy and Wasusri δημοσίευσαν μια παρόμοια ανασκόπηση για τα έτη 1989 έως και 2000 και στην εργασία αυτή ουσιαστικά επεκτείνεται η δουλειά τους για τα έτη 2001 έως σήμερα. Από την έρευνα που έγινε και σε συνδυασμό με την εργασία των MacCathy and Wasusri προέκυψαν συνολικά 119 άρθρα που αφορούν σε μη βιομηχανικές εφαρμογές. Από αυτά, τα 104 περιγράφουν συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης ενώ τα υπόλοιπα 15 πραγματεύονται γενικά και θεωρητικού περιεχομένου θέματα. Η ανάλυση που ακολουθεί περιλαμβάνει μόνο τα 104 άρθρα που περιγράφουν ειδικές περιπτώσεις μη βιομηχανικών εφαρμογών, ενώ τα 15 άρθρα που αφορούν σε θεωρητικά ζητήματα δεν αναλύονται.

Σκοπός του κεφαλαίου είναι να αναδείξει τις δυνατότητες των διαγραμμάτων ελέγχου στους ποικίλους τομείς εκτός της βιομηχανίας, και να παρουσιάσει τις μεθόδους αξιοποίησής τους πρακτικά. Ο καλύτερος τρόπος για να επιτευχθεί κάτι τέτοιο είναι παραθέτοντας εφαρμογές που έχουν κατά καιρούς δημοσιευθεί και στατιστικά στοιχεία που προκύπτουν από τις μελέτες που συγκεντρώθηκαν.

3.2 Τομείς Εφαρμογής

Από τα άρθρα που συγκεντρώθηκαν και μελετήθηκαν προέκυψαν οι επόμενες πέντε γενικές κατηγορίες, σύμφωνα με το βασικό αντικείμενο της κάθε εφαρμογής :

- Υγεία
- Μηχανική – Περιβάλλον
- Γενικές Υπηρεσίες
- Πληροφορική
- Προβλέψεις

Μελετώντας όλες τις δημοσιεύσεις διαπιστώθηκε μια μεγάλη ποικιλία στους κλάδους, τους τομείς, τα αντικείμενα και τους σκοπούς των εφαρμογών. Εάν λοιπόν, η κατηγοριοποίηση των άρθρων γινόταν με αυστηρό και απόλυτο τρόπο, οι κατηγορίες που θα προέκυπταν θα ήταν πολύ περισσότερες από πέντε και η καθεμία θα περιελάμβανε μικρό αριθμό εφαρμογών. Για παράδειγμα, η κατηγορία της Υγείας θα έπρεπε να διαχωριστεί σε κλάδους όπως η ιατρική, η φαρμακευτική, η νοσηλευτική κ.α.. Θεωρήθηκε ωστόσο πως μια τόσο λεπτομερής κατηγοριοποίηση δεν εξυπηρετεί το σκοπό αυτής της ανασκόπησης, καθώς ο όγκος των πληροφοριών θα περιέπλεκε τον αναγνώστη χωρίς το ζητούμενο αποτέλεσμα. Ορίστηκαν, επομένως, οι παραπάνω πέντε γενικές κατηγορίες και τα άρθρα που εντάχθηκαν στην καθεμία μελετούν αντικείμενα από διαφορετικούς αλλά ωστόσο παρεμφερείς τομείς οι οποίοι γενικότερα εντάσσονται στα πλαίσια αυτών των κατηγοριών.

Στον Πίνακα 3.1 τοποθετούνται τα άρθρα που μελετήθηκαν σε μία από τις πέντε κατηγορίες. Στην πρώτη στήλη αναφέρεται το πεδίο εφαρμογής (κατηγορία) και το ποσοστό των άρθρων που συγκαταλέγονται στην κάθε κατηγορία, ενώ στη δεύτερη στήλη αναφέρεται το θέμα του άρθρου, ο συγγραφέας και η χρονολογία.

Κατηγορία	Εφαρμογή
Υγεία (52%)	<p>Detection of variations in outcome of pneumonia patients (Hand <i>et al.</i>, 1994)</p> <p>Monitoring the performance of an HIV test (Gentleman <i>et al.</i>, 1994)</p> <p>Monitoring the long-term performance of a clinical chemistry laboratory (Chesher & Burnett, 1996)</p> <p>Comparing patient satisfaction with the visit to an academic otolaryngology office before and after quality improvement efforts (Piccirillo, 1996)</p> <p>Monitoring customer satisfaction in a major hospital (Wardell & Candia, 1996)</p> <p>Detecting problems in chronic diseases (Kahn <i>et al.</i>, 1996)</p> <p>Monitoring peak expiratory flow rate in asthma patients (Boggs <i>et al.</i>, 1998)</p> <p>Monitoring trends in trauma mortality (Clark <i>et al.</i>, 1998)</p> <p>Monitoring the effect of performance improvement in an anesthesia department (Vitez & Macrio, 1998)</p> <p>Determining the effects of introduction of a new monitoring system for fluid absorption (Konrad <i>et al.</i>, 1998)</p> <p>Monitoring the process of out patient service delivery (Green, 1999)</p> <p>Detection and monitoring of hospital-acquired infections (Morton <i>et al.</i>, 2001)</p> <p>SPC for large scale microarray experiments (Model <i>et al.</i>, 2002)</p> <p>Controlling methicillin-resistant staphylococcus aureus (Curran <i>et al.</i>, 2002)</p> <p>Monitoring pharmacy expert system performance (Doherty <i>et al.</i>, 2003)</p> <p>Applying SPC techniques to emergency medicine (Callahan & Griffen, 2003)</p> <p>SPC as a tool for research and healthcare improvement (Benneyan <i>et al.</i>, 2003)</p> <p>Improving of anesthesia care (Fasting & Gisvold, 2003)</p> <p>Association of admission date with cancer patient survival at a regional hospice (Mertens <i>et al.</i>, 2004)</p> <p>Monitoring endophthalmitis (Anuradha & Feyi-Waboso, 2005)</p> <p>Evaluating the serologic responses of pigs infected with three Salmonella serovars (Baum <i>et al.</i>, 2005)</p> <p>Producing Listeria monocytogenes-free chicken leg quarters processed in steam followed by impingement cooking (Murphy <i>et al.</i>, 2005)</p> <p>Monitoring nonoperative time (Seim <i>et al.</i>, 2006)</p> <p>Monitoring multiple data streams for Biosurveillance (Shmueli & Fienberg, 2006)</p> <p>The use of control charts in health-care and public-health surveillance (Woodall, 2006)</p> <p>Directionally sensitive Multivariate SPC procedures with application to syndromic surveillance (Fricker, 2006)</p> <p>Monitoring errors in patient specimen collection (Dzik <i>et al.</i>, 2008)</p> <p>Monitoring postcataract surgery endophthalmitis (Chiam and Feyi-Waboso, 2008)</p> <p>Monitoring institutional performance in trauma care (Kirkham & Bouamra, 2008)</p> <p>Monitoring of dangerous hospital acquired infections (Maheswaran, 2009)</p> <p>Monitoring cancelled operations at the paediatric surgery department of a university hospital in Alexandria (Wahab & El-Enein, 2009)</p> <p>Monitoring in thyroid surgery (Duclos <i>et al.</i>, 2009):</p> <p>Controlling operating room performance (Chen <i>et al.</i>, 2009)</p>

(συνεχίζεται)

Κατηγορία	Εφαρμογή
	Semiparametric surveillance of monotonic changes (Frisén & Andersson, 2009)
	SPC control charts for ophthalmology (Cordero-Coma <i>et al.</i> , 2010)
	Early outbreak detection in Biosurveillance (Shmueli & Burkom, 2010)
	Monitoring the outcomes of out-of-hospital cardiac arrest patients rescued by the EMS system (Chen <i>et al.</i> , 2010)
	SPC for health care quality improvement using SAS/QC software (Rodriguez & Ransdell, 2010)
	Identifying early growth failure among infants with Hypoplastic Left Heart Syndrome (Iyer <i>et al.</i> , 2011)
	Validating a classification tree model for predicting mortality (Minne <i>et al.</i> , 2011)
	The use of control charts in healthcare (Woodall <i>et al.</i> 2011)
	Monitoring emergency department patient satisfaction scores (Griffen <i>et al.</i> , 2012)
	SPC in nursing research (Polit & Chaboyer, 2012)
	Quality improvement for pediatric inflammatory Bowel Disease (Crandall <i>et al.</i> , 2012)
	Healthcare regulation : rating, screening and surveillance (Spiegelhalter, 2012)
	Detection of temporal changes in psychophysiological data (Cannon <i>et al.</i> , 2012)
	Monitoring standardized mortality ratios of a classification tree model (Minne <i>et al.</i> , 2012)
	Monitoring and improving carcasses quality in a poultry slaughterhouse implementing a HACCP system (Mataragas <i>et al.</i> , 2012)
	Multivariate outbreak detection (Schioler and Frisé, 2012)
	Monitoring patient-specific IMRT and VMAT QA (Sanghangthum <i>et al.</i> , 2012)
	Monitoring liver transplant process indicators (Varona <i>et al.</i> , 2012)
	Measuring and improving the quality of postoperative epidural analgesia for major abdominal surgery (Duncan & Haigh, 2012)
	Monitoring and improving outcomes in cardiac surgery (Smith <i>et al.</i> , 2013)
	Improving coverage of postnatal care in rural Ethiopia (Tesfaye <i>et al.</i> , 2014)
Μηχανική και Περιβάλλον (22%)	Monitoring chemical measuring systems (Paul and Barnett, 1995)
	Monitoring early detection of feed water heater leaks (Hansen <i>et al.</i> , 1996)
	Monitoring the maintenance process in a flow calibration laboratory (Kegel, 1996)
	Monitoring a gas metal arc welding process (Maul <i>et al.</i> , 1996)
	Monitoring the quality of water (Zimmerman <i>et al.</i> , 1996)
	Monitoring machine tool performance parameters (Jennings and Drake, 1997)
	Monitoring welding processes (Cook <i>et al.</i> , 1997)
	Monitoring hygiene performance measurement in food manufacture (Hayes <i>et al.</i> , 1997)
	Setting up a predictive maintenance plan (Katter <i>et al.</i> , 1998)
	Monitoring environmental variables (Maurer <i>et al.</i> , 1998)
	Monitoring concentrations in mineral processing (Ipek <i>et al.</i> , 1999)
	Monitoring automatic detection of tool breakage in NC milling processes (Jun & Suh, 1999)
	Monitoring a chromatographic process (Nijhuis <i>et al.</i> , 1999)
	Setting up a preventive maintenance plan (Ben-Daya & Rahim, 2000)
	Setting up a preventive maintenance plan (Cassady <i>et al.</i> , 2000)

(συνεχίζεται)

Κατηγορία	Εφαρμογή
	<p>Monitoring of networked early warning fire detection (EWFD) systems (Jiji <i>et al.</i>, 2003)</p> <p>Ecological and environmental monitoring (Anderson and Thompson, 2004)</p> <p>In-situ detection of plasma processing equipment (Baik <i>et al.</i>, 2009)</p> <p>A preliminary assessment of an aero engines' maintenance process and prioritization of aero engines' faults (Vassilakis & Besseris, 2010)</p> <p>Space time monitoring of air quality (Bersimis and Triantafyllopoulos, 2012)</p> <p>Multi-objective economic statistical design of X-bar control chart considering Taguchi loss function (Safaei <i>et al.</i>, 2012)</p> <p>Monitoring and controlling functions of the Air Force (Sihlimiri, 2012)</p> <p>A statistical fault detection and diagnosis method for centrifugal chillers (Zhao <i>et al.</i>, 2013)</p>
Γενικές Υπηρεσίες (18%)	<p>Selecting an appropriate staff schedule for a front-counter at a bank (Gardiner & Mitra, 1994)</p> <p>Monitoring effectiveness of quality improvement program in a restaurant (Sulek <i>et al.</i>, 1995)</p> <p>Proposing SPC to monitor performance measurement in non-manufacturing processes such as invoicing process (Cartwright & Hogg, 1996)</p> <p>Monitoring crime rates over time (Anderson & Dian, 1996)</p> <p>Improving the quality of a computing service (Jensen & Markland, 1996)</p> <p>Analyzing data from student evaluations of teaching (Marks & O'Connell, 2003)</p> <p>Monitoring financial reporting of public companies (Dull & Tegarden, 2004)</p> <p>Improving traditional earned value management (Leu <i>et al.</i>, 2006)</p> <p>Monitoring business activity (Jiang <i>et al.</i>, 2007)</p> <p>Surveillance of the mean behavior of multivariate time series (Bodnar and Schmid, 2007)</p> <p>Optimal sequential surveillance for finance, public health, and other areas (Frisén, 2009)</p> <p>Monitoring and Improving management of education department Resources (Lee Ann, 2009)</p> <p>Evaluating the quality of internal communication of a company (Anastasiou and Katirtzis, 2010)</p> <p>An application of SPC in finance (Golosnoy <i>et al.</i>, 2011)</p> <p>A density-based statistical process control scheme for high-dimensional and mixed-type observations (Ning and Tsung, 2012)</p> <p>The U.S. house market bubble through the lense of SPC (Berlemann, 2012)</p> <p>Using SPC to enhance student progression (Hanna <i>et al.</i>, 2012)</p> <p>Economic-statistical design of acceptance control chart (Mohammadian and Amiri, 2013)</p> <p>An integrated self-evaluated framework for embedding Web 2.0 technologies in the educational process (Karvounidis <i>et al.</i>, 2014)</p>
Πληροφορική (5%)	<p>Monitoring software defect detection process (Hong <i>et al.</i>, 1999)</p> <p>Detecting intrusions into information systems (Ye and Chen, 2001)</p> <p>Monitoring the software test process (Cangussu <i>et al.</i>, 2003)</p> <p>SPC for software-fill the gap (Baldassarre <i>et al.</i>, 2010)</p> <p>Monitoring of network traffic forecasts (Matias <i>et al.</i>, 2010)</p>

(συνεχίζεται)

Κατηγορία	Εφαρμογή
Προβλέψεις (3%)	Monitoring of forecasts (Hill, 1996) Identifying and monitoring an appropriate forecasting model (Atienza <i>et al.</i> , 1997) Identifying an appropriate forecasting model (Koksalan <i>et al.</i> , 1999)

Πίνακας 3.1 : Κατηγοριοποίηση άρθρων βάσει του τομέα εφαρμογής

Οι περισσότερες από τις παραπάνω εφαρμογές πραγματοποιήθηκαν με χρήση κλασσικών διαγραμμάτων ελέγχου τύπου *Shewhart*, ενώ λιγότεροι μελετητές επέλεξαν πιο εξελιγμένες και πολύπλοκες τεχνικές, εξαιτίας είτε της ιδιαίτερης φύσης των δεδομένων είτε του σκοπού της μελέτης. Σε καθεμία από τις επόμενες ενότητες αναφέρονται τα βασικά στατιστικά στοιχεία της κάθε κατηγορίας, και αφού τα άρθρα διαχωριστούν ως προς την τεχνική που χρησιμοποιήθηκε στην εφαρμογή, παρουσιάζεται μια σύντομη περίληψη των κυριότερων σημείων τους.

3.2.1 Υγεία

Στην κατηγορία της Υγείας κατατάχθηκαν 54 από τα συνολικά 104 άρθρα και με ποσοστό 52% ο τομέας αυτός περιλαμβάνει την πλειονηφία των μη βιομηχανικών εφαρμογών. Στις περισσότερες εφαρμογές το αντικείμενο της μελέτης είναι καθαρά ιατρικό και παρακολουθούνται συγκεκριμένες ασθένειες ή συμπτώματα, αποτελέσματα εγχειρήσεων ή ακόμα και δείκτες θνησιμότητας των ασθενών. Ένα άλλο κομμάτι στον τομέα της υγείας που φαίνεται να έχει μελετηθεί αρκετά με τη χρήση διαγραμμάτων ελέγχου είναι αυτό της παροχής ιατρικών υπηρεσιών, της νοσοκομειακής περίθαλψης και γενικότερα της ικανοποίησης των ασθενών. Σκοπός των εν λόγω εφαρμογών είναι η παρακολούθηση και εν συνεχεία η βελτίωση των υπηρεσιών υγείας. Τέλος, συναντώνται κάποιες μελέτες οι οποίες αποσκοπούν στην παρακολούθηση της απόδοσης συγκεκριμένων μονάδων περίθαλψης, όπως για παράδειγμα το τμήμα επειγόντων περιστατικών ή της αναισθησιολογίας.

3.2.1.1 Εφαρμογές με χρήση διαγραμμάτων ελέγχου *Shewhart*

Το 61% των μελετών στον τομέα της υγείας (33 άρθρα) έγιναν με χρήση διαγραμμάτων ελέγχου *Shewhart*. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα βασικότερα σημεία κάποιων άρθρων που

επιλέχθηκαν ως χαρακτηριστικά παραδείγματα μη βιομηχανικών εφαρμογών με κύριο αντικείμενο προερχόμενο από το πεδίο της υγείας.

Η πρώτη χρονολογικά δημοσιευμένη εφαρμογή είναι αυτή των Hand *et al.* το 1994, οι οποίοι χρησιμοποίησαν πραγματικά δεδομένα 2 χρόνων (Νοέμ.1988-Οκτ.1991) από 20 νοσοκομεία του Illinois των Η.Π.Α., για να εξετάσουν την ύπαρξη ειδικών αιτιών μεταβλητότητας στην εξέλιξη των ασθενών που πάσχουν από πνευμονία. Οι ερευνητές κατασκεύασαν ξεχωριστά διαγράμματα ελέγχου για κάθε νοσοκομείο και παρακολούθησαν πέντε μεταβλητές: τη μέση τιμή και το εύρος της διάρκειας νοσηλείας, το ποσοστό θνησιμότητας, το ποσοστό των επανεισαγωγών στο νοσοκομείο και τον αριθμό των επιπλοκών ανά ασθενή. Για να ελέγξουν την διάρκεια νοσηλείας χρησιμοποίησαν διαγράμματα ελέγχου $\bar{X}-R$, για τα ποσοστά θνησιμότητας και επανεισαγωγής στο νοσοκομείο κατασκεύασαν διαγράμματα πιθανότητας (*p chart*), ενώ παρακολούθησαν τον αριθμό των επιπλοκών ανά ασθενή με διαγράμματα ελέγχου *c*. Οι ερευνητές αποφάνθηκαν για την σταθερότητα των διεργασιών στηριζόμενοι σε 3 κανόνες και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι στα 19 από τα 20 νοσοκομεία υπάρχουν συστηματικές αιτίες μεταβλητότητας τουλάχιστον σε μια από τις πέντε μεταβλητές που ελέγχθηκαν. Επιπλέον, απέδειξαν ότι τα αποτελέσματα αυτά δεν επηρεάζονται από το μέγεθος, την πληρότητα και την τοποθεσία του νοσοκομείου, ούτε και από την οικονομική κατάσταση των ασθενών. Σκοπός των συγγραφέων ήταν να δείξουν ότι τα απλά διαγράμματα ελέγχου *Shewhart*, που μέχρι τότε χρησιμοποιούνταν αποκλειστικά στην βιομηχανία, μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά για την βελτίωση της ποιότητας των παροχών υγείας χρησιμοποιώντας απλές και οικονομικές τεχνικές. Από την ανάλυση που έγινε στο εν λόγω άρθρο φαίνεται ότι το συγκεκριμένο ερευνητικό πεδίο βρισκόταν ακόμα σε εμβρυικό στάδιο. Παρ' όλα αυτά οι συγγραφείς σημείωσαν τη σημαντικότητα ανάπτυξης τέτοιου είδους τεχνικών ελέγχου και αποσκοπούσαν κυρίως στην ανάδειξη των δυνατοτήτων τους. Διαγράμματα ελέγχου *Shewhart* για μεταβλητές χρησιμοποίησαν επίσης οι Konrad *et al.* (1998), Benneyan *et al.* (2003), Mertens *et al.* (2004), Baum *et al.* (2005), Murphy *et al.* (2005), Seim *et al.* (2006), Chen *et al.* (2009) και οι Cordero-Coma *et al.* (2010).

Λίγα χρόνια αργότερα, το 2003, οι Callahan and Griffen πρότειναν τη χρήση διαγραμμάτων ελέγχου για τη βελτίωση των υπηρεσιών που παρέχονται στο τμήμα επειγόντων περιστατικών κάποιου νοσοκομείου. Συγκεκριμένα, με ένα διάγραμμα τύπου *Shewhart* για μεμονωμένες παρατηρήσεις (*I-MR*) παρακολούθησαν τον χρόνο (σε λεπτά) που

μεσολαβεί από την στιγμή που κάποιος ασθενής με οξύ έμφραγμα του μυοκαρδίου εισάγεται στο τμήμα επειγόντων περιστατικών μέχρι την επαναιμάτωση της καρδιάς του. Σκοπός τους ήταν να μειώσουν τον χρόνο αυτό εντοπίζοντας τις αιτίες της ειδικής μεταβλητότητας, κάτι το οποίο δείχνουν ότι πέτυχαν αφού κατάφεραν να μετατοπίσουν προς τα κάτω την διεργασία. Διαγράμματα ελέγχου για μεμονωμένες παρατηρήσεις χρησιμοποίησε επίσης ο Green (1999), οι Chen *et al.* (2009), και οι Rodriguez and Ransdell (2010).

Από τα άρθρα που μελετήθηκαν διαπιστώθηκε ότι πολλοί ερευνητές χρησιμοποιούν διαγράμματα ελέγχου τύπου *Shewhart* για ιδιότητες, κάτι που φαίνεται λογικό για τον συγκεκριμένο τομέα καθώς η φύση των δεδομένων πολύ συχνά το απαιτεί. Το 2003, οι Fasting and Gisvold χρησιμοποίησαν διαγράμματα ελέγχου *p* για να βελτιώσουν την ποιότητα των υπηρεσιών στο τμήμα αναισθησιολογίας του πανεπιστημιακού νοσοκομείου του Trondheim στη Νορβηγία. Συγκεκριμένα, παρακολούθησαν τέσσερις πιθανές επιπλοκές (ανεπαρκής αναλγησία, ανάνηψη από γενική αναισθησία, προβλήματα διασωλήνωσης και λανθασμένη φαρμακευτική αγωγή), που θεώρησαν πως αντικατοπτρίζουν την ποιότητα και την ασφάλεια της διαδικασίας της αναισθησίας. Τα σημεία στο κάθε διάγραμμα αναπαριστούν ποσοστά εμφάνισης ανά δίμηνο μιας από αυτές τις τέσσερις επιπλοκές ως προς τον συνολικό αριθμό αναισθησιών που πραγματοποιήθηκαν το ίδιο χρονικό διάστημα. Οι συγγραφείς δεν παρέλειψαν να σχολιάσουν τα αποτελέσματα που προέκυψαν από τα διαγράμματα και μάλιστα σημείωσαν ότι ενώ μια διεργασία μπορεί να είναι σταθερή και εντός ορίων ελέγχου συνεχίζει να χρήζει βελτιωτικών ενεργειών για να θεωρηθεί ποιοτικά αποδεκτή. Διαγράμματα ελέγχου πιθανότητας (*p charts*) χρησιμοποίησαν για τις εφαρμογές τους επίσης οι Cheshier and Burnett (1996), Piccirillo (1996), Vitez and Macrion (1998), Doherty *et al.* (2003), Benneyan *et al.* (2003), Anuradha and Feyi-Waboso (2005), Dzik *et al.* (2008), Wahab and El-Enein (2009), Duclos *et al.* (2009), Rodriguez and Ransdell (2010), Iyer *et al.* (2011) και Polit and Chaboyer (2012).

Τέλος, διαγράμματα ελέγχου *c* χρησιμοποίησαν οι Clark *et al.* (1998) για να παρακολουθήσουν τη θνησιμότητα των ασθενών που εισέρχονται στο νοσοκομείο Maine Medical Center του Πόρτλαντ των Η.Π.Α. με σοβαρούς τραυματισμούς, καθώς και οι Curran *et al.* (2002) για να παρακολουθήσουν τα περιστατικά εμφάνισης της ασθένειας Mericillin-Resistant Staphylococcus Aureus σε νοσοκομείο της Μεγάλης Βρετανίας ώστε να προλαμβάνεται η διάδοση της ασθένειας.

3.2.1.2 Εφαρμογές με χρήση εξελιγμένων διαγραμμάτων ελέγχου

Πιο εξελιγμένες τεχνικές ανάπτυξης διαγραμμάτων ελέγχου συναντήθηκαν σε 21 από τα 54 άρθρα που περιλαμβάνει ο τομέας της υγείας (39%) και η πλειοψηφία αυτών δημοσιεύθηκε την τελευταία δεκαετία.

Οι Gentleman *et al.* το 1994 πρότειναν την χρήση του T διαγράμματος ελέγχου, το οποίο στηρίζεται στην κατανομή t , για να παρακολουθήσουν την απόδοση ενός τεστ για τον ιό HIV τύπου I (ELISA test). Οι συγγραφείς στην αρχή της μελέτης περιέγραψαν τον τρόπο υλοποίησης αυτών των δοκιμών και εξήγησαν τους λόγους που καθιστούν απαραίτητο τον συνεχή έλεγχο της απόδοσής τους. Στη συνέχεια, αναφέρθηκαν στα διαγράμματα ελέγχου *Shewhart* και στα προβλήματα που ανακύπτουν από την εφαρμογή αυτών των τεχνικών όταν χρησιμοποιούνται για να παρακολουθήσουν την απόδοση των τεστ HIV-I ELISA. Συγκεκριμένα, εφάρμοσαν τα δεδομένα τους σε διαγράμματα ελέγχου *Shewhart* $\bar{X} - R$ και απέδειξαν ότι δεν είναι ικανά να ανιχνεύσουν πότε η διεργασία είναι εκτός στατιστικού ελέγχου εξαιτίας κάποιων ιδιοτεροτήτων που έχουν τα συγκεκριμένα τεστ. Τέλος, περιέγραψαν τη στατιστική θεωρία και τον τρόπο κατασκευής των T διαγραμμάτων ελέγχου και πρότειναν να χρησιμοποιούνται σε συνδυασμό με τα διαγράμματα ελέγχου *Shewhart* για την παρακολούθηση του εύρους (*R charts*). Για να αποδείξουν τη θεωρία τους παρουσίασαν μια εφαρμογή με δεδομένα που συνέλλεξαν από το Εργαστήριο Ιολογίας του Υπουργείου Υγείας του Οντάριο του Καναδά, το 1988, και ενθάρρυναν τόσο το εργαστηριακό προσωπικό που χρησιμοποιεί αυτά τα τεστ, όσο και τους κατασκευαστές τους, να υιοθετήσουν τέτοιου είδους εργαλεία για την βελτίωση της ποιότητας των δοκιμών.

Οι Wardell and Candia (1996), εφάρμοσαν το χ^2 διάγραμμα ελέγχου και μια επέκταση του διαγράμματος ελέγχου p σε δεδομένα που συλλέχθηκαν από ερωτηματολόγια, για να εξετάσουν την ικανοποίηση των ασθενών ενός μεγάλου νοσοκομείου. Οι συγγραφείς έδειξαν ότι τα κλασικά διαγράμματα *Shewhart* όταν χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους δεδομένα οδηγούν σε εσφαλμένα συμπεράσματα και αυτό συμβαίνει γιατί κατά κύριο λόγο τα δεδομένα που προέρχονται από ερωτηματολόγια είναι διατάξιμα (*ordinal*) ή κατηγορικά και η κατανομή τους ενδέχεται να είναι ασύμμετρη. Επίσης, συνέκριναν τα δύο διαγράμματα εφαρμόζοντας τα δεδομένα που είχαν και συμπέραναν ότι το χ^2 διάγραμμα ελέγχου ανταποκρίνεται γρηγορότερα στις μετατοπίσεις της διεργασίας σε σχέση με το τροποποιημένο p διάγραμμα. Το άρθρο αυτό αποτελεί μια αρχική μελέτη για τον τρόπο διαχείρισης δεδομένων που προέρχονται από έρευνες ή ερωτηματολόγια και πολλά ζητήματα

τίθενται για περαιτέρω ανάλυση, όπως για παράδειγμα η συσχέτιση μεταξύ των ερωτήσεων της έρευνας ή η ερμηνεία των ειδικών αιτιών μεταβλητότητας που μπορεί να ανιχνεύονται.

Οι Morton *et al.* το 2001, πρότειναν τη χρήση διαγραμμάτων ελέγχου *CUSUM* σε συνδυασμό με τα κλασσικά διαγράμματα ελέγχου *Shewhart* για την παρακολούθηση ανεξάρτητων μεταξύ τους λοιμώξεων, όπως είναι οι χειρουργικές και οι αιματολογικές και διαγράμματα ελέγχου *EWMA* και *Shewhart*, με όρια ελέγχου που υπολογίζονται από την αρνητική διωνυμική κατανομή, για την παρακολούθηση λοιμώξεων που προκαλούνται από ανθεκτικούς οργανισμούς και δεν θεωρούνται ανεξάρτητα γεγονότα. Οι συγγραφείς συνέστησαν να χρησιμοποιούνται συνδυαστικά τα διαγράμματα *CUSUM* και *EWMA* με τα διαγράμματα *Shewhart*, καθώς τα δύο πρώτα ανιχνεύουν μικρές αλλά σταθερές αυξήσεις στους δείκτες νοσοκομειακών λοιμώξεων, ενώ τα δεύτερα είναι ικανά να εντοπίζουν απότομες και μεγάλες αυξήσεις. Το 2009, οι Maheswaran *et al.*, δημοσίευσαν μια παρόμοια μελέτη για την χρησιμότητα των διαγραμμάτων *CUSUM*, *EWMA* και *Shewhart* στην παρακολούθηση ενδονοσοκομειακών μολύνσεων στο αίμα, ενώ το 2011 οι Minne *et al.*, χρησιμοποίησαν διαγράμματα ελέγχου *EWMA* για να βελτιώσουν την απόδοση ενός μοντέλου πρόβλεψης της θνησιμότητας ασθενών άνω των 80 ετών που νοσηλεύονται στην μονάδα εντατικής θεραπείας (TM80+).

Οι Model *et al.*, το 2002, παρουσίασαν τις τεχνικές του στατιστικού ελέγχου ποιότητας ως εναλλακτικό τρόπο παρακολούθησης των πειραμάτων που γίνονται σε DNA μικροσυστοιχίες, με σκοπό να ελαχιστοποιούνται τα επαναλαμβανόμενα πειράματα και να μειώνεται το κόστος. Η φύση των πειραμάτων απαιτούσε την εφαρμογή πολυμεταβλητών μεθόδων στατιστικού ελέγχου διεργασιών και προτάθηκε συγκεκριμένα η χρήση του *Hotteling T²* διαγράμματος ελέγχου. Οι συγγραφείς εξήγησαν ότι οι παράγοντες που επηρεάζουν την ποιότητα των πειραμάτων είναι αδύνατον να μετριοούνται συστηματικά ώστε να γίνεται ένας συνεχής έλεγχος της διεργασίας, και πρότειναν αντ' αυτού να παρακολουθούνται οι τιμές μέτρησης των ίδιων των μικροσυστοιχιών. Ωστόσο, οι μετρήσεις αυτές περιείχαν ακραίες τιμές και υπερβολικά πολλές διαστάσεις, κάτι που καθιστούσε αδύνατη την εφαρμογή των τεχνικών πολυμεταβλητού ελέγχου διεργασιών. Για να διορθωθεί το πρόβλημα αυτό, πρότειναν τη χρήση μιας ανθεκτικής εκδοχής της μεθόδου Ανάλυσης Κύριων Συνιστωσών (*robust Principal Component Analysis-PCA*) πριν από την εφαρμογή των πολυμεταβλητών μεθόδων, ώστε να μειωθεί η διάσταση των δεδομένων και να απομακρυνθούν οι ακραίες τιμές.

Ο Fricker, το 2006, στην προσπάθειά του να βελτιώσει τις υπάρχουσες μεθόδους συνδρομικής επιτήρησης, πρότεινε μια νέα πολυμεταβλητή μέθοδο στατιστικού ελέγχου διεργασιών. Συγκεκριμένα, ανέφερε ότι τα σύγχρονα συστήματα συνδρομικής επιτήρησης χρησιμοποιούν πολλές ταυτόχρονες μονοδιάστατες διεργασίες που η καθεμία επικεντρώνεται στην ανίχνευση μιας επιδημίας από μια συγκεκριμένη ροή δεδομένων, μια μέθοδος που ενώ είναι εύκολη στην υλοποίηση και την ερμηνεία, είναι λιγότερο ευαίσθητη σε συγκεκριμένους τύπους αλλαγών. Από την άλλη, οι πολυμεταβλητές μέθοδοι, που έχουν κατά καιρούς προταθεί, ενώ μπορούν να ανιχνεύουν συγκεκριμένους τύπους αλλαγών, είναι αμετάβλητες ως προς την κατεύθυνση αυτών των αλλαγών (αύξηση ή μείωση). Ο συγγραφέας εξήγησε πως στην συνδρομική επιτήρηση οι πολυμεταβλητές διεργασίες θα πρέπει να επικεντρώνονται στην ανίχνευση μόνο των αυξήσεων στους δείκτες, ώστε να καθίσταται δυνατός ο εντοπισμός έξαρσης των ασθενειών ή τυχόν περιστατικών βιοτρομοκρατίας. Αυτοί οι λόγοι, οδήγησαν τον Fricker να προτείνει δύο παραλλαγές των *Hotteling T²* και *Crosier's MCUSUM* διαγραμμάτων ελέγχου, ώστε οι διεργασίες να είναι ευαίσθητες ως προς μια κατεύθυνση. Ο συγγραφέας εφάρμοσε πραγματικά και προσομοιωμένα δεδομένα στα νέα διαγράμματα που πρότεινε και συνέκρινε τα αποτελέσματα τόσο με τα υπάρχοντα πολυμεταβλητά διαγράμματα όσο και με τα πολλαπλά μονοδιάστατα διαγράμματα.

Οι Kirkham and Bouamra, το 2008, πρότειναν την χρήση των διαγραμμάτων *funnel plots* ως εναλλακτική μέθοδο αξιολόγησης των μονάδων τραύματος σε διάφορες περιοχές της Μεγάλης Βρετανίας. Οι συγγραφείς σχολίασαν το σύστημα αξιολόγησης που χρησιμοποιούνταν την περίοδο που πραγματοποιήθηκε η μελέτη (EDF) και το έκριναν ως μη ικανοποιητικό, καθώς ο αριθμός των ασθενών του κάθε νοσοκομείου μπορεί να επηρεάσει την κατάταξή του στους βαθμολογικούς πίνακες, οι οποίοι αποτελούν μέρος του εν λόγω συστήματος αξιολόγησης. Στη συνέχεια, ανέπτυξαν την μεθοδολογία των *funnel plots* και την εφάρμοσαν χρησιμοποιώντας ως μεταβλητές τη θνησιμότητα και τη διάρκεια νοσηλείας ασθενών που εισήχθησαν με τραυματισμούς σε 116 νοσοκομεία της Μεγάλης Βρετανίας. Η τεχνική των *funnel plots* συναντήθηκε επίσης στην μελέτη των Griffen *et al.* (2012), οι οποίοι πρότειναν το εργαλείο αυτό ως μέσο μέτρησης της ικανοποίησης των ασθενών που εισήχθησαν στο τμήμα επειγόντων περιστατικών κάποιου νοσοκομείου.

Οι Chen *et al.*, το 2010, παρακολούθησαν τη θνησιμότητα των ασθενών που είχαν υποστεί ανακοπή καρδιάς ενώ βρίσκονταν εκτός κάποιας νοσοκομειακής μονάδας (OHCA) και εισέρχονταν στο τμήμα επειγόντων περιστατικών, χρησιμοποιώντας τρία διαγράμματα

ελέγχου βασισμένα σε ένα προσαρμοσμένο μοντέλο κινδύνου που υπολόγισαν με τη μέθοδο της λογιστικής παλινδρόμησης. Οι συγγραφείς εξήγησαν ότι η θνησιμότητα των ασθενών δεν εξαρτάται μόνο από την ποιότητα των υπηρεσιών, αλλά και από κάποιους παράγοντες που αυξάνουν τον κίνδυνο, όπως είναι η ηλικία, το φύλο κ.α.. Τα κλασσικά διαγράμματα ελέγχου δεν μπορούν να προσαρμοστούν ως προς τα διαφορετικά επίπεδα ρίσκου του κάθε ασθενή με αποτέλεσμα να οδηγούν σε εσφαλμένα συμπεράσματα και να χρίζουν ειδικών μετατροπών. Για να αντιμετωπίσουν αυτό το πρόβλημα, οι συγγραφείς πρότειναν να χρησιμοποιούνται συνδυαστικά τρία προσαρμοσμένα βάσει κινδύνου διαγράμματα ελέγχου, το *RA-CUSUM*, το *RA-RSPRT* και το *CRAM* με όρια πρόβλεψης, και για να δείξουν την λειτουργία αυτών των διαγραμμάτων παρουσίασαν μια εφαρμογή με πραγματικά δεδομένα από 2.356 περιστατικά που έλαβαν χώρα από τον Ιούνιο του 2006 μέχρι τον Νοέμβριο του 2007 στο Ταϊπέι, της Ταϊβάν.

3.2.2 Μηχανική και Περιβάλλον

Στην κατηγορία των μηχανικών και περιβαλλοντικών εφαρμογών συμπεριλήφθηκαν 23 μελέτες που αποτελούν το 22% των συνολικών άρθρων που περιλαμβάνονται στην παρούσα εργασία. Οι μελέτες αυτές αφορούν εφαρμογές για την παρακολούθηση της απόδοσης ενός σημαντικού μέρους κάποιου μηχανισμού ή και ολόκληρου του μηχανήματος, εφαρμογές που επικεντρώνονται στην χρήση στατιστικών εργαλείων με σκοπό τον βέλτιστο προγραμματισμό συντηρήσεων στη βιομηχανία, αλλά και περιβαλλοντικές εφαρμογές όπως η συγκέντρωση ρύπων ή η ποιότητα του νερού.

3.2.2.1 Εφαρμογές με χρήση διαγραμμάτων ελέγχου Shewhart

Από τα 23 άρθρα που κατατάχθηκαν στον τομέα «Μηχανική και Περιβάλλον», τα 13 περιλαμβάνουν εφαρμογές που αναπτύχθηκαν με τα κλασσικά διαγράμματα ελέγχου τύπου *Shewhart* (57%). Στη συνέχεια, ακολουθεί σύντομη παρουσίαση των εν λόγω μελετών με αναφορές στις τεχνικές που χρησιμοποιούνται και το αντικείμενο που ερευνάται.

Οι Paul and Barnett, το 1995, εξέτασαν την χρήση των διαγραμμάτων ελέγχου ως εργαλείο βελτίωσης της ποιότητας των εργαστηριακών μετρήσεων και του εξοπλισμού των εργαστηρίων χημείας. Οι συγγραφείς αναγνώρισαν τα προβλήματα που προκύπτουν από την

εφαρμογή αυτών των τεχνικών όταν τα δεδομένα που παρακολουθούνται είναι συσχετισμένα, και τόνισαν πως αυτό θα πρέπει να διορθώνεται πριν τα δεδομένα χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή των διαγραμμάτων ελέγχου. Σε διαφορετική περίπτωση, τα αποτελέσματα είναι παραπλανητικά και οδηγούν σε αποδοχή διεργασιών που στην πραγματικότητα είναι εκτός στατιστικού ελέγχου ή σε άσκοπη σπατάλη χρόνου και πόρων για την ανίχνευση ειδικών αιτιών μεταβλητότητας ενώ δεν υπάρχουν. Στην μελέτη αυτή παρουσιάστηκε ένας τρόπος υπολογισμού ορίων ελέγχου, ο οποίος λαμβάνει υπόψη του τη συσχέτιση των δεδομένων, και δόθηκε ένα ενδεικτικό παράδειγμα με χρήση διαγραμμάτων ελέγχου *Shewhart* για μεμονωμένες παρατηρήσεις (*I-MR chart*).

Το 1996, ο Kegel και οι Hansen *et al.*, στις μελέτες τους εφάρμοσαν τα κλασικά διαγράμματα ελέγχου *Shewhart*, ο πρώτος για την παρακολούθηση διεργασιών διακρίβωσης (προσδιορισμού της ακρίβειας μέτρησης ενός οργάνου), και οι δεύτεροι για την έγκαιρη ανίχνευση διαρροών σε συστήματα θέρμανσης νερού.

Οι Maul *et al.* (1996) και οι Cook *et al.* (1997), χρησιμοποίησαν διαγράμματα ελέγχου *Shewhart* για την παρακολούθηση διεργασιών συγκόλλησης. Στην μελέτη των πρώτων εμφανίστηκαν πολλοί λανθασμένοι συναγερμοί για εκτός ελέγχου διεργασία, και οι συγγραφείς για να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα αυτό αναθεώρησαν τον ρυθμό δειγματοληψίας, αλλά δεν έγινε καμία αναφορά στα χαρακτηριστικά των δεδομένων ούτε και στις υποθέσεις των διαγραμμάτων ελέγχου. Από την άλλη, οι Cook *et al.*, για την κατασκευή των διαγραμμάτων ελέγχου χρησιμοποίησαν ως μεταβλητή το ρεύμα συγκόλλησης και αποφάνθηκαν για την σταθερότητα της διεργασίας βάσει της διακύμανσης των παραμέτρων και των ορίων ελέγχου, χωρίς περαιτέρω ερμηνεία των διαγραμμάτων.

Οι Zimmerman *et al.* (1996) και οι Maurer *et al.* (1998), παρουσίασαν την χρήση των διαγραμμάτων ελέγχου στην παρακολούθηση περιβαλλοντικών μεταβλητών. Οι πρώτοι, χρησιμοποίησαν διαγράμματα ελέγχου *Shewhart* για μεμονωμένες παρατηρήσεις (*I-MR charts*) για να παρακολουθήσουν την ποιότητα του νερού στον όρμο Mobile Bay που βρίσκεται στον κόλπο του Μεξικού, καταγράφοντας τις τιμές συγκεκριμένων μεταβλητών, όπως το οξυγόνο, την θερμοκρασία, την αλμυρότητα και την διαφάνεια του νερού. Οι συγγραφείς τόνισαν την αναγκαιότητα έγκαιρης ανίχνευσης των αλλαγών στις παραμέτρους που επηρεάζουν την ποιότητα του νερού, ώστε να καθίσταται δυνατός ο εντοπισμός των ειδικών αιτιών μεταβλητότητας. Η μελέτη των Maurer *et al.* περιλαμβάνει μια παρόμοια

εφαρμογή, με χρήση διαγραμμάτων ελέγχου $\bar{X}-R$ για την παρακολούθηση της συγκέντρωσης ιζημάτων καδμίου στην εκβολή San Pedro Shelf στη νότια Καλιφόρνια.

Οι Katter *et al.*, το 1998, πρότειναν τη χρήση διαγραμμάτων ελέγχου *Shewhart* για την παρακολούθηση της κατάστασης ενός συγκεκριμένου τύπου λέιζερ, με απώτερο σκοπό την δημιουργία ενός προγράμματος προληπτικής συντήρησης της καθόδου του λέιζερ. Η μεταβλητή που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των διαγραμμάτων ελέγχου είναι η διαφορά θερμοκρασίας μεταξύ της εισόδου και της εξόδου της καθόδου και οι συγγραφείς πρότειναν την χρήση αυτών των διαγραμμάτων για την δημιουργία του προγράμματος προληπτικής συντήρησης. Παρόλο που στην συγκεκριμένη μελέτη ως καθοριστικός παράγοντας της κατάστασης του λέιζερ θεωρήθηκε η διαφορά θερμοκρασίας της καθόδου, σημειώνεται ότι η ίδια μεθοδολογία μπορεί να εφαρμοστεί και σε άλλα χαρακτηριστικά του.

Οι Ipek *et al.*, το 1999, σε μια εφαρμογή σχετική με την λειτουργία των ορυχείων, χρησιμοποίησαν διαγράμματα ελέγχου *Shewhart* $\bar{X}-R$ για την παρακολούθηση της συγκέντρωσης του στοιχείου B_2O_3 σε συμπυκνώματα κολεμανίτη και ουλεξίτη. Οι βασικές υποθέσεις για τα διαγράμματα ελέγχου δεν παραβιάστηκαν και οι συγγραφείς στο τέλος της μελέτης τους παρουσίασαν τις πιθανές αιτίες ειδικής μεταβλητότητας που ανιχνεύτηκαν από τα διαγράμματα.

Οι Ben-Daya and Rahim και οι Cassidy *et al.*, το 2000, πρότειναν μια παραλλαγή του κλασσικού διαγράμματος ελέγχου *Shewhart* \bar{X} βασισμένο σε οικονομικά μοντέλα, ώστε όταν συνδυάζεται με στρατηγικές προληπτικής συντήρησης, να βελτιώνει την απόδοση των βιομηχανικών διεργασιών με το μικρότερο δυνατό κόστος. Και στα δύο άρθρα αναφέρθηκε και αποδείχθηκε με παραδείγματα ότι η συνδυαστική χρήση αυτών των δύο τεχνικών επιφέρει σημαντική μείωση στο κόστος για τον έλεγχο της ποιότητας των διεργασιών, κάτι που δεν μπορεί να γίνει χρησιμοποιώντας αποκλειστικά διαγράμματα ελέγχου ή μεθόδους προληπτικής συντήρησης. Οι εργασίες αυτές παρουσίασαν μια πρωτότυπη χρήση των κλασσικών διαγραμμάτων ελέγχου και υπέδειξαν ένα εναλλακτικό πεδίο εφαρμογής τους, δίνοντας με αυτόν τον τρόπο το έναυσμα για περαιτέρω μελέτη.

Οι Vassilakis and Besseris, το 2010, εφάρμοσαν τα εργαλεία του στατιστικού ελέγχου διεργασιών για να παρακολουθήσουν και να βελτιώσουν τις διαδικασίες συντήρησης αεροκινητήρων. Σκοπός των συγγραφέων ήταν να αναδείξουν την αναγκαιότητα εφαρμογής ενός συστήματος συνεχούς παρακολούθησης και αξιολόγησης της διαδικασίας συντήρησης, ώστε να βελτιωθούν οι υπηρεσίες που προσφέρονται στους πελάτες ως προς την ποιότητα,

τον χρόνο που απαιτείται για να επισκευαστεί ένας αεροκινητήρας και το κόστος που θα έχει ο πελάτης. Χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα από 830 αεροκινητήρες οι οποίοι σε διάστημα τεσσάρων χρόνων παραδόθηκαν σε κάποια μονάδα συντήρησης είτε για να επισκευαστεί κάποιο μέρος τους είτε για γενική επιθεώρηση, και πέρασαν από τον θάλαμο δοκιμών για τον τελικό έλεγχο πριν παραδοθούν στον πελάτη. Η μέθοδος που ακολουθήθηκε συνδυάζει ένα σύστημα κοστολόγησης (ABC analysis) με διαγράμματα *Pareto* για τον εντοπισμό των κύριων βλαβών που ευθύνονταν για την αποτυχία ολοκλήρωσης του ελέγχου. Στην συνέχεια, και αφού κατέληξαν στην βασική αιτία απόρριψης των επισκευασμένων αεροκινητήρων, ανέπτυξαν ένα διάγραμμα αιτίου-αποτελέσματος (*cause and effect diagram*) με το οποίο εντόπισαν τους παράγοντες στους οποίους οφείλεται η συγκεκριμένη βλάβη και ακολούθησαν οι απαραίτητες διορθωτικές ενέργειες ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα συγκεκριμένα λάθη. Έξι μήνες μετά, χρησιμοποίησαν διαγράμματα ελέγχου *p* για την παρακολούθηση του ποσοστού των αεροκινητήρων που απορρίφθηκαν από τον θάλαμο δοκιμών, και από τα αποτελέσματα συμπέραναν ότι η διεργασία είναι εντός στατιστικού ελέγχου, και άρα οι τεχνικές του στατιστικού ελέγχου διεργασιών που εφάρμοσαν είχαν θετικά αποτελέσματα.

3.2.2.2 Εφαρμογές με χρήση εξελιγμένων διαγραμμάτων ελέγχου

Από τα 23 άρθρα που περιλαμβάνει ο τομέας «Μηχανική και Περιβάλλον», στα 10 χρησιμοποιούνται πιο εξελιγμένες τεχνικές ανάπτυξης διαγραμμάτων ελέγχου (43%). Παρακάτω παρουσιάζονται συνοπτικά τα βασικά στοιχεία των συγκεκριμένων μελετών.

Οι Jennings and Drake στη μελέτη τους, το 1997, ασχολήθηκαν με την χρήση των διαγραμμάτων ελέγχου ως μέσο παρακολούθησης της απόδοσης κάποιων μηχανημάτων. Αναγνώρισαν την αναγκαιότητα της έγκαιρης ανίχνευσης τυχόν σφαλμάτων στα μηχανήματα, αλλά τόνισαν επίσης ότι ο λανθασμένος υπολογισμός των παραμέτρων των διαγραμμάτων οδηγεί σε εσφαλμένα συμπεράσματα και κατ' επέκταση σε σπατάλη πόρων και χρόνου. Οι συγγραφείς εξήγησαν πως η φύση των δεδομένων που προέρχονται από τέτοιου είδους μετρήσεις δεν επιτρέπει τη χρήση των κλασικών τεχνικών στατιστικού ελέγχου διεργασιών χωρίς να προηγούνται οι κατάλληλοι μετασχηματισμοί. Για τον λόγο αυτό, πρότειναν μεθόδους εξομάλυνσης των δεδομένων και απεικόνισης των καταλοίπων στα

κλασικά διαγράμματα ελέγχου, και παρουσίασαν τη θεωρία τους μέσα από τρία παραδείγματα για τις περιπτώσεις που παρακολουθούνται μία, δύο και τρεις μεταβλητές.

Οι Hayes *et al.*, το 1997, εφάρμοσαν τις τεχνικές του στατιστικού ελέγχου διεργασιών στην βιομηχανία τροφίμων, και συγκεκριμένα κατέγραψαν και έλεγξαν δεδομένα υγιεινής προερχόμενα από το σύστημα ανάλυσης κινδύνων και κρίσιμων σημείων ελέγχου (HACCP) το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως στον τομέα αυτόν. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν αποτελούνταν από μεμονωμένες παρατηρήσεις οι οποίες προσεγγίζονταν από την κατανομή *Poisson* και μετασχηματίστηκαν (τετραγωνικές ρίζες αρχικών τιμών), ώστε να χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή των διαγραμμάτων ελέγχου. Στη συνέχεια, με τα μετασχηματισμένα δεδομένα, αναπτύχθηκαν διαγράμματα ελέγχου *Shewhart* για μεμονωμένες παρατηρήσεις (*I-chart*) και διαγράμματα *CUSUM* και τα αποτελέσματα συγκρίθηκαν με τα αντίστοιχα διαγράμματα που κατέγραψαν τις αρχικές τιμές (πριν τον μετασχηματισμό). Τα διαγράμματα ελέγχου με τα μετασχηματισμένα δεδομένα έδειξαν μια ξεκάθαρη εικόνα της πραγματικής κατάστασης της διεργασίας, και οι συγγραφείς τόνισαν την αναγκαιότητα της παράλληλης χρήσης τους με τα ήδη υπάρχοντα συστήματα ελέγχου υγιεινής (HACCP), ώστε να επιτυγχάνεται η έγκαιρη ανίχνευση προβλημάτων και να καθίσταται δυνατός ο εντοπισμός των αιτιών.

Οι Jun and Suh, το 1999, πρότειναν την χρήση διαγραμμάτων ελέγχου για την συνεχή παρακολούθηση της διαδικασίας φρεζαρίσματος NC και την αυτόματη ανίχνευση τυχόν βλαβών στο μηχάνημα κοπής. Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν τα διαθέσιμα δεδομένα και κατασκεύασαν διαγράμματα ελέγχου *Shewhart* \bar{X} , *EWMA* και *adapted EWMA (AEWMA)*. Στη συνέχεια, σύγκριναν τα αποτελέσματα που πήραν από το κάθε διάγραμμα βάσει των σφαλμάτων τύπου I και τύπου II και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι το διάγραμμα *AEWMA* ήταν το πλέον κατάλληλο για την παρακολούθηση τέτοιου είδους διεργασιών.

Οι Nijhuis *et al.*, το 1999, εφάρμοσαν δεδομένα προσομοίωσης σε μονοδιάστατα και πολυμεταβλητά διαγράμματα ελέγχου με σκοπό τη σύγκριση των αποτελεσμάτων. Οι μετρήσεις που καταγράφηκαν αφορούσαν την περιεκτικότητα των λιπαρών οξέων σε συγκεκριμένα φυτικά έλαια και προέρχονταν από ανάλυση με τριχοειδή αέρια χρωματογραφία. Οι συγγραφείς για την ανάλυση των δεδομένων εισήγαγαν ένα νέο πολυμεταβλητό διάγραμμα ελέγχου, το οποίο ονόμασαν $(TC)^2$, και ουσιαστικά είναι μια επέκταση του γνωστού διαγράμματος ελέγχου *Hotteling T²*. Τα αποτελέσματα απέδειξαν ότι τα κλασικά μονοδιάστατα διαγράμματα ελέγχου έδιναν πολλές λανθασμένες ενδείξεις εκτός

ελέγχου διεργασίας και πολλά σημεία εκτός των ορίων ελέγχου, και οι συγγραφείς τόνισαν ότι δεν θα πρέπει να χρησιμοποιούνται σε τέτοιου είδους διεργασίες. Αντίθετα, συμβούλεψαν να προτιμούνται τα πολυμεταβλητά διαγράμματα $(TC)^2$ και \sqrt{SPE} , παρά τη πολυπλοκότητα τους, και μόνο όταν υπάρξει ένδειξη εκτός ελέγχου διεργασίας πρότειναν να εφαρμόζεται κάποιο μονοδιάστατο διάγραμμα ελέγχου για τον εντοπισμό της μεταβλητής ή των μεταβλητών που την προκάλεσαν.

Οι Jiji *et al.*, το 2003, χρησιμοποίησαν πολυμεταβλητά διαγράμματα ελέγχου για την συνεχή παρακολούθηση της απόδοσης ενός συστήματος έγκαιρης ανίχνευσης πυρκαγιών (*early warning fire detection system-EWFD*). Συγκεκριμένα, ανέπτυξαν δύο πολυμεταβλητά διαγράμματα, το *Hotteling T²*, που στο συγκεκριμένο άρθρο αναφέρεται ως *D-statistic*, και το *Q-statistic* διάγραμμα. Το πρώτο διάγραμμα απεικονίζει την απόσταση Mahalanobis των καινούριων παρατηρήσεων από τα ιστορικά δεδομένα που έχουν συλλεχθεί υπό συνθήκες κανονικότητας, ενώ το δεύτερο διάγραμμα απεικονίζει τις διαφορές των πραγματικών παρατηρήσεων από τις εκτιμώμενες και ουσιαστικά υποδεικνύει πόσο καλά οι παρατηρήσεις αυτές προσαρμόζονται στο μοντέλο. Οι συγγραφείς κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η χρήση των πολυμεταβλητών διαγραμμάτων ελέγχου ως εποπτικό μέσο του υπάρχοντος συστήματος ανίχνευσης πυρκαγιών επέφερε θετικά αποτελέσματα, καθώς αποδείχθηκε ότι μείωσε τον χρόνο ανίχνευσης των μικρών εστιών φωτιάς και ταυτόχρονα διατήρησε την γρήγορη ανίχνευση πυρκαγιών.

Οι Baik *et al.*, το 2009, χρησιμοποίησαν εξελιγμένα διαγράμματα ελέγχου για την παρακολούθηση του ειδικού εξοπλισμού επεξεργασίας πλάσματος. Δεδομένης της ακρίβειας που απαιτείται σε αυτές τις διαδικασίες, η στενή παρακολούθηση της απόδοσης και η άμεση ανίχνευση τυχόν διακυμάνσεων στους αισθητήρες των μηχανημάτων κρίνεται αναγκαία. Οι συγγραφείς ανέφεραν ότι το συμβατικό διάγραμμα *CUSUM* ενώ θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για την παρακολούθηση τέτοιου είδους διεργασιών, μειονεκτεί γιατί ανιχνεύει τα σφάλματα μόνο όταν συγκεντρωθούν οι μετρήσεις από τους αισθητήρες και αυτό σημαίνει ότι η διεργασία έχει προχωρήσει πολύ και έχει χαθεί πολύτιμος χρόνος. Για τον λόγο αυτό, πρότειναν τη χρήση του διαγράμματος *V-Mask* σε συνδυασμό με μια συνάρτηση «πίστης» (*belief function*), η οποία παράγει τιμές που υποδεικνύουν τον βαθμό μετατόπισης της διεργασίας, με σκοπό την παρακολούθηση της απόδοσης των αισθητήρων σε πραγματικό χρόνο και την επί τόπου ανίχνευση πιθανών διακυμάνσεων.

Οι Bersimis and Triantafyllopoulos, το 2012, χρησιμοποίησαν μεθόδους πρόβλεψης και πολυμεταβλητού ελέγχου ποιότητας (*MSPC-Multivariate Statistical Process Control*) με σκοπό να εγκαταστήσουν ένα σύστημα επιτήρησης της ποιότητας του αέρα που θα εντοπίζει σε πραγματικό χρόνο πιθανές ανωμαλίες στα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης στην ευρύτερη περιοχή της Αθήνας. Τα επίπεδα της ατμοσφαιρικής ρύπανσης εξαρτώνται από πλήθος διαφορετικών μεταβλητών που ακολουθούν διαφορετικές και όχι κανονικές κατανομές και επίσης υπάρχει έντονη συσχέτιση μεταξύ τους. Επομένως, ο αρχικός στόχος ήταν να βρεθεί ένα κατάλληλο μοντέλο πρόβλεψης που να συνδυάζει αυτές τις μεταβλητές και στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν τα κατάλοιπά του για την κατασκευή των πολυμεταβλητών διαγραμμάτων ελέγχου. Αν το μοντέλο περιγράφει ικανοποιητικά τα δεδομένα, τότε οποιαδήποτε απόκλιση των καταλοίπων από την εντός ελέγχου κατάσταση θα σημαίνει αυτόματα ότι υπάρχουν μη κανονικές τιμές στα αρχικά δεδομένα. Δεύτερος στόχος των συγγραφέων ήταν να βρουν τα κατάλληλα πολυμεταβλητά διαγράμματα ελέγχου ώστε να μπορούν να παρακολουθούν ταυτόχρονα όλες τις μεταβλητές που επηρεάζουν τα επίπεδα της ρύπανσης σε ολόκληρη την Αθήνα και χρησιμοποιώντας διαφορετικά διαγράμματα να μπορούν να παρακολουθούν τα επίπεδα της ρύπανσης σε κάθε διαφορετική περιοχή της. Το πρόβλημα που έπρεπε να αντιμετωπίσουν οι συγγραφείς ήταν ότι στην συγκεκριμένη περίπτωση δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα κλασσικά διαγράμματα ελέγχου καθώς η κατανομή των αρχικών μεταβλητών ήταν άγνωστη και άρα δεν μπορούσε να υποτεθεί ότι τα κατάλοιπα του μοντέλου κατανέμονται κανονικά.

3.2.3 Γενικές Υπηρεσίες

Η κατηγορία των Γενικών Υπηρεσιών περιλαμβάνει 19 εφαρμογές και ο τομέας αυτός αποτελεί το 18% των συνολικών δημοσιεύσεων που μελετούνται στην παρούσα εργασία. Ο κλάδος από όπου προέρχονται τα δεδομένα για τις συγκεκριμένες εφαρμογές ποικίλει, αλλά ο στόχος όλων είναι κοινός, η βελτίωση της ποιότητας των υπηρεσιών που προσφέρουν οι οργανισμοί που μελετούνται. Κάποιοι επιλέγουν να αξιολογήσουν τις υπηρεσίες τους βάσει των απόψεων των πελατών τους ή των πωλήσεων, ενώ κάποιοι άλλοι προτιμούν να ελέγξουν εσωτερικά τον οργανισμό τους με σκοπό την καλύτερη λειτουργία του.

3.2.3.1 Εφαρμογές με χρήση διαγραμμάτων ελέγχου Shewhart

Από τις 19 εφαρμογές που περιλαμβάνει ο τομέας των Γενικών Υπηρεσιών, οι 9 μελετήθηκαν με τη χρήση κλασικών διαγραμμάτων ελέγχου τύπου *Shewhart* (47%).

Οι Gardiner and Mitra, το 1994, χρησιμοποίησαν τα κλασικά διαγράμματα ελέγχου *Shewhart* $\bar{X}-S$ και το διάγραμμα *c*, για να καθορίσουν ένα πρόγραμμα το οποίο θα κατανέμει με τον καλύτερο δυνατό τρόπο στα ταμεία μιας μεγάλης Αμερικανικής τράπεζας το προσωπικό της. Η διοίκηση της εν λόγω τράπεζας θεώρησε ότι η βασική παράμετρος που αντικατοπτρίζει την ικανοποίηση των πελατών είναι ο χρόνος αναμονής μέχρι να εξυπηρετηθούν, και έθεσαν ως κύριο στόχο ο χρόνος αυτός να μην ξεπερνά τα τρία λεπτά. Οι συγγραφείς, για τον σκοπό αυτό, χρησιμοποίησαν ιστορικά δεδομένα της τράπεζας και με προσομοίωση πήραν τις τιμές τεσσάρων μεταβλητών τις οποίες κατέγραψαν στα διαγράμματα ελέγχου. Συγκεκριμένα, με χρήση διαγραμμάτων ελέγχου *Shewhart* $\bar{X}-S$ παρακολούθησαν τον χρόνο αναμονής σε κάθε συγκεκριμένο δεκαπεντάλεπτο λειτουργίας της τράπεζας, και με διαγράμματα *c* τον αριθμό αφίξεων των πελατών και τον αριθμό των πελατών που περίμεναν πάνω από τρία λεπτά για να εξυπηρετηθούν επίσης σε διαστήματα δεκαπέντε λεπτών. Αρχικά, η διεργασία ελέγχθηκε με το υπάρχον πρόγραμμα κατανομής του προσωπικού στα ταμεία και παρατηρήθηκαν πολλά σημεία εκτός των ορίων ελέγχου. Ακολούθησαν διορθωτικές ενέργειες και εναλλαγές στο πλήθος των ατόμων που εξυπηρετούν στα ταμεία κάθε στιγμή λειτουργίας της τράπεζας και εφαρμόστηκαν ξανά διαγράμματα ελέγχου για να δουν αν η διεργασία σταθεροποιήθηκε. Τελικά, επιλέχθηκε ένα βελτιωμένο πρόγραμμα κατανομής του προσωπικού παρόλο που τα διαγράμματα $\bar{X}-S$ έδειξαν κάποια σημεία εκτός των ορίων ελέγχου για αδιευκρίνιστους λόγους.

Οι Sulek *et al.*, το 1995, χρησιμοποίησαν διαγράμματα ελέγχου *Shewhart* για μεμονωμένες παρατηρήσεις (*X-chart*) με σκοπό να ελέγξουν την απόδοση ενός προγράμματος βελτίωσης της ποιότητας των υπηρεσιών και των πωλήσεων σε μια αλυσίδα λιανικής πώλησης τροφίμων. Συγκεκριμένα, έγινε ειδική εκπαίδευση στο προσωπικό των 47 καταστημάτων της αλυσίδας τροφίμων, βάσει κάποιων νέων προτύπων που αφορούσαν κυρίως στην αποτελεσματικότητα και την ευγένεια των εργαζομένων στα ταμεία, ενώ ταυτόχρονα δεν υπήρξε καμία αλλαγή στις δαπάνες για διαφήμιση, προώθηση προϊόντων, συντήρηση κτλ., ούτε και στις τεχνικές και τον τρόπο που εργάζονταν οι ταμίες. Οι μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των διαγραμμάτων ήταν ο λόγος των συνολικών πωλήσεων προς τη συνολική μισθοδοσία (σε δολάρια) και οι συνολικοί πελάτες προς το

σύνολο των ωρών που οι εργαζόμενοι τους εξυπηρέτησαν. Για τον υπολογισμό της κεντρικής γραμμής και των ορίων ελέγχου των διαγραμμάτων X χρησιμοποιήθηκαν δεδομένα 20 εβδομάδων πριν την εφαρμογή του προγράμματος βελτίωσης της ποιότητας των υπηρεσιών, ενώ τα σημεία που απεικονίζονται στα διαγράμματα αφορούν μετρήσεις που συλλέχθηκαν ένα χρόνο μετά την εφαρμογή του προγράμματος. Η ανάλυση απέδειξε ότι υπήρξε σημαντική βελτίωση των διεργασιών και η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε συγκρίθηκε με τη μέθοδο ανάλυσης διακύμανσης ANOVA, η οποία δεν κατάφερε να δείξει την διαφορά που υπήρξε μεταξύ των δεδομένων που συλλέχθηκαν πριν την εφαρμογή του προγράμματος βελτίωσης με αυτά που συλλέχθηκαν μετά.

Οι Cartwright and Hogg, το 1996, παρουσίασαν τις τεχνικές του στατιστικού ελέγχου ποιότητας ως εργαλείο παρακολούθησης και βελτίωσης της απόδοσης ενός ολόκληρου οργανισμού. Στο άρθρο τους ανέλυσαν τον πρωτότυπο τρόπο που η εταιρία εμφιάλωσης Σκοτσέζικου ουίσκι, CBC, χρησιμοποιεί τις τεχνικές αυτές με σκοπό τη συνεχή βελτίωση των υπηρεσιών της και την αύξηση της κερδοφορίας της. Η συγκεκριμένη εταιρία μετράει την συνολική αποδοτικότητά της με ένα ποσοστό που υπολογίζεται βάσει κάποιων παγκόσμιας κλίμακας προτύπων άριστης ποιότητας. Στη συνέχεια, με χρήση διαγραμμάτων *Pareto* και αιτίου-αποτελέσματος εντοπίζονται οι βασικοί παράμετροι που επηρεάζουν την συνολική αποδοτικότητα και παρακολουθούνται με χρήση απλών διαγραμμάτων ελέγχου τύπου *Shewhart* ανάλογα με τη φύση των δεδομένων. Τα εργαλεία αυτά χρησιμοποιούνται από το διοικητικό προσωπικό όλων των τμημάτων της εταιρίας, και σκοπός τους είναι να θέτουν στόχους και να παρακολουθούν συνεχώς τις διεργασίες ώστε να εντοπίζονται και να επιλύονται άμεσα τυχόν προβλήματα.

Οι Marks and O'Connell, το 2003, χρησιμοποίησαν διαγράμματα ελέγχου *Shewhart* για μεμονωμένες παρατηρήσεις προκειμένου να αξιολογήσουν δεδομένα που προέρχονται από αξιολογήσεις φοιτητών ενός τμήματος του Πανεπιστημίου του Μαϊάμι για τους καθηγητές τους. Οι συγγραφείς σκεπτόμενοι ότι ο τρόπος που αξιολογούν οι φοιτητές πιθανώς επηρεάζεται από παράγοντες εκτός της ποιότητας διδασκαλίας, συνέλλεξαν και ανέλυσαν επιπλέον στοιχεία για τον κάθε φοιτητή και συμπέραναν ότι ο βαθμός που αναμένει να πάρει στο μάθημα επηρεάζει σημαντικά τον τρόπο που αξιολογεί τον διδάσκοντα. Για τον λόγο αυτό, ανέπτυξαν ένα μοντέλο παλινδρόμησης μεταξύ του αναμενόμενου βαθμού του φοιτητή και της μέσης αξιολόγησης του διδάσκοντος, και χρησιμοποίησαν τα κατάλοιπα του μοντέλου για να κατασκευάσουν ένα διάγραμμα ελέγχου για μεμονωμένες παρατηρήσεις το

οποίο θα παρακολουθείται παράλληλα με το διάγραμμα ελέγχου για τις μέσες αξιολογήσεις. Όταν ένα σημείο στο διάγραμμα των αξιολογήσεων βρεθεί εκτός του κάτω ορίου ελέγχου και το αντίστοιχο σημείο στο διάγραμμα των καταλοίπων έχει την ίδια συμπεριφορά, τότε η απόδοση του καθηγητή δεν είναι ικανοποιητική και θα πρέπει να ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα. Με την μελέτη αυτή, οι συγγραφείς επιθυμούσαν να δείξουν ότι η απόδοση ενός διδάσκοντος δε θα πρέπει να βασίζεται απόλυτα στις αξιολογήσεις των φοιτητών, καθώς όπως απέδειξαν είναι πιθανό να σχετίζονται με παράγοντες που δεν αντικατοπτρίζουν την ποιότητα διδασκαλίας.

Οι Dull and Tegarden, το 2004, χρησιμοποίησαν τις τεχνικές του στατιστικού ελέγχου ποιότητας για την συνεχή παρακολούθηση και τον έλεγχο των οικονομικών εκθέσεων ενός οργανισμού. Τα τελευταία χρόνια, εξαιτίας της χρήσης αυτοματοποιημένων συστημάτων καταγραφής χρηματοοικονομικών πληροφοριών, οι οργανισμοί αναφέρουν σε συνεχή βάση τα οικονομικά στοιχεία που προκύπτουν από την λειτουργία τους και απαιτούν από τους ελεγκτές να ανιχνεύουν έγκαιρα τυχόν προβλήματα ή παρατυπίες καθώς και να ελέγχεται άμεσα η αξιοπιστία των πληροφοριών που καταγράφονται. Εξαιτίας όλων αυτών, οι συγγραφείς πρότειναν τα απλά διαγράμματα ελέγχου, ως εργαλείο των ελεγκτών για να παρακολουθούν σε πραγματικό χρόνο τις οικονομικές καταστάσεις των οργανισμών. Στη μελέτη αυτή, παρουσιάστηκε ένα παράδειγμα με ιστορικά στοιχεία 10 ετών από διάφορες επιχειρήσεις τριών μεγάλων οργανισμών, κάποιες από τις οποίες είχαν γνωστά λάθη στα οικονομικά αποτελέσματα και κάποιες όχι. Οι συγγραφείς με την εφαρμογή τους κατάφεραν να αποδείξουν ότι τα διαγράμματα ελέγχου εντόπισαν τις εταιρίες που είχαν γνωστά οικονομικά προβλήματα, ενώ ταυτόχρονα για τις εταιρίες χωρίς οικονομικά λάθη και παρατυπίες έδειξαν τη σταθερότητα της διεργασίας. Στο τέλος του άρθρου υπάρχει μια εκτενής συζήτηση σχετικά με τις δυνατότητες των εργαλείων αυτών στο συγκεκριμένο αντικείμενο, τις πιθανές τροποποιήσεις που ίσως χρειάζονται, την ανάγκη για εφαρμογή επιπλέον κανόνων για τον έλεγχο της σταθερότητας μιας διεργασίας και τον διαφορετικό χειρισμό ανάλογα με τα χαρακτηριστικά της κάθε εταιρίας.

Οι Leu *et al.*, το 2006, πρότειναν τα διαγράμματα ελέγχου *Shewhart* για μεμονωμένες παρατηρήσεις (*I-MR chart*) ως εργαλείο παρακολούθησης και βελτίωσης της μεθόδου “*earned value management*” (EVM) η οποία χρησιμοποιείται εκτενώς από τις επιχειρήσεις για να διαχειρίζονται τα πεδία εφαρμογής, τους προϋπολογισμούς και τα χρονοδιαγράμματα των έργων που πραγματοποιούν. Οι συγγραφείς εξήγησαν ότι η συγκεκριμένη μέθοδος

αγνοεί την διακύμανση που μπορεί να υπάρχει σε συγκεκριμένες παραμέτρους και αυτό οδηγεί τους διαχειριστές των έργων σε εσφαλμένα συμπεράσματα και αποφάσεις. Για τον λόγο αυτό πρότειναν την ταυτόχρονη χρήση διαγραμμάτων ελέγχου και ανάλυσης αιτίου-αποτελέσματος, ώστε να γίνονται άμεσα αντιληπτές πιθανές μη τυχαίες αιτίες μεταβλητότητας και η διοίκηση του έργου να έχει τη δυνατότητα να παρέμβει γρήγορα ώστε να γίνουν οι κατάλληλες διορθωτικές ενέργειες. Οι συγγραφείς με σκοπό να αποδείξουν τη θεωρία τους, παρουσίασαν μια εφαρμογή με πραγματικά δεδομένα από μια τεχνική εταιρία συμβούλων, όπου με χρήση διαγραμμάτων ελέγχου *I-MR* κατέγραψαν τις τιμές δύο παραμέτρων της μεθόδου EVM, τον δείκτη απόδοσης κόστους και τον δείκτη απόδοσης χρονοδιαγράμματος.

Η Lee, το 2009, παρουσίασε τα διαγράμματα ελέγχου ως πολύτιμο εργαλείο για τη διαχείριση των διαθέσιμων πόρων στα τμήματα εκπαίδευσης προσωπικού των οργανισμών. Συγκεκριμένα, επικεντρώθηκε σε ένα ειδικό σεμινάριο (BLS HCP) που το ιατρικό προσωπικό των νοσοκομείων θα έπρεπε να παρακολουθεί κάθε δύο χρόνια ώστε να ανανεώνεται το πιστοποιητικό του. Το πλήθος του νοσηλευτικού προσωπικού είναι πολύ μεγάλο, οι εκπαιδευτές που έχουν καταρτιστεί ώστε να παραδίδουν αυτά τα σεμινάρια είναι λίγοι και όλο αυτό είχε ως αποτέλεσμα η ζήτηση και η προσφορά να μην καλύπτονται και οι διαθέσιμοι πόροι να σπαταλούνται χωρίς ικανοποιητικά αποτελέσματα. Η συγγραφέας χρησιμοποίησε το διάγραμμα *Shewhart* για μεμονωμένες παρατηρήσεις για να παρακολουθήσει τις περιπτώσεις που ενώ τα σεμινάρια πραγματοποιήθηκαν, υπήρχαν κενές θέσεις λόγω απουσίας των καταρτιζόμενων ή επειδή δεν ενημέρωσαν έγκαιρα ότι θα λείψουν ώστε να καλυφθεί η θέση τους. Με τον τρόπο αυτό κατάφερε να εντοπίσει συστηματικές αιτίες μεταβλητότητας στην διεργασία, εντόπισε τους λόγους και προέβη στις κατάλληλες διορθωτικές ενέργειες ώστε να μην υπάρχουν κενές θέσεις στα σεμινάρια που πραγματοποιούνται με αποτέλεσμα να μειωθεί σημαντικά η άσκοπη σπατάλη των διαθέσιμων πόρων.

3.2.3.2 Εφαρμογές με χρήση εξελιγμένων διαγραμμάτων ελέγχου

Στον τομέα των Γενικών Υπηρεσιών συναντήθηκαν 10 εφαρμογές που μελετήθηκαν με πιο εξελιγμένες τεχνικές ανάπτυξης διαγραμμάτων ελέγχου (53%).

Οι Anderson and Dian, το 1996, χρησιμοποίησαν διαγράμματα ελέγχου και μοντέλα χρονοσειρών *ARIMA* με σκοπό να εξετάσουν αν υπήρξε στατιστικά σημαντική βελτίωση στους δείκτες συγκεκριμένων εγκλημάτων και στη συνολική εγκληματικότητα στο Χιούστον του Τέξας, μετά την υλοποίηση ενός προγράμματος υπερωριών που υλοποίησε το αστυνομικό τμήμα της περιοχής (*655 Program*). Τα δεδομένα προς ανάλυση είχαν υψηλή συσχέτιση και οι συγγραφείς για να μπορέσουν να εφαρμόσουν τα διαγράμματα ελέγχου χρησιμοποίησαν μοντέλα *ARIMA* και κατάλληλους μετασχηματισμούς ώστε τα κατάλοιπα να προσεγγίζονται από την κανονική κατανομή. Με τον τρόπο αυτό κατασκεύασαν απλά διαγράμματα ελέγχου για κάθε τύπο εγκλήματος ξεχωριστά, στα οποία απεικονίζονταν τα κατάλοιπα και τα αποτελέσματα έδειξαν ότι υπήρξε στατιστικά σημαντική μείωση στη συνολική εγκληματικότητα της περιοχής. Οι συγγραφείς παρόλο που εφαρμόσαν την μεθοδολογία αυτή σε χρονοσειρές που σχετίζονται με εγκληματικές ενέργειες, σημείωσαν ότι με τον ίδιο τρόπο μπορούν να ανιχνεύονται αλλαγές που συμβαίνουν με την πάροδο του χρόνου και σε άλλους τομείς, όπως για παράδειγμα στις πωλήσεις, όπου τα δεδομένα δεν επιτρέπουν τη χρήση απλούστερων τεχνικών.

Οι Jensen and Markland, το 1996, μελέτησαν τη χρήση των διαγραμμάτων ελέγχου ως μέσο αξιολόγησης της ποιότητας των υπηρεσιών βασιζόμενοι στον βαθμό ικανοποίησης των πελατών. Οι συγγραφείς παρουσίασαν μια εφαρμογή με δεδομένα προερχόμενα από το τμήμα Διοίκησης Υπηρεσιών Πληροφορικής (MIS) ενός μεγάλου διεθνούς πανεπιστημίου, που αφορούσαν αξιολογήσεις που έκαναν οι φοιτητές στις διάφορες υπηρεσίες πληροφορικής που τους παρέχονταν. Αρχικά, οι φοιτητές κλήθηκαν να βαθμολογήσουν 22 στοιχεία σχετικά με τις υπηρεσίες που τους προσφέρθηκαν και αυτές που θεωρούσαν ιδανικές, χρησιμοποιώντας μια επτά-βάθμια κλίμακα Likert. Τα 22 στοιχεία αυτά προέρχονταν από ένα γνωστό εργαλείο μέτρησης της ποιότητας των υπηρεσιών, το SERVQUAL, το οποίο εισήγαγαν οι Parasuraman *et al.* (1988), και χρησιμοποιείται ευρέως από τα στελέχη των εταιριών για την αξιολόγηση των υπηρεσιών τους, παρόλο που έχει κατά καιρούς δεχθεί πολλές κριτικές για την αξιοπιστία του. Στη συνέχεια, με χρήση της μεθόδου ανάλυσης παραγόντων (*factor analysis*) τα 22 αυτά στοιχεία εντάχθηκαν σε πέντε «διαστάσεις» της ποιότητας (υλικά στοιχεία, αξιοπιστία, υπευθυνότητα, διασφάλιση, ενσυναίσθηση). Από την παραγοντική ανάλυση προέκυψε υψηλή συσχέτιση μεταξύ της υπευθυνότητας και της διασφάλισης και επομένως οι δύο αυτές διαστάσεις ενώθηκαν σε μια με αποτέλεσμα το μοντέλο προς ανάλυση να απλουστευθεί. Οι συγγραφείς, χρησιμοποιώντας τις τέσσερις διαστάσεις του μοντέλου ως μεταβλητές,

κατασκεύασαν τέσσερα μονοδιάστατα διαγράμματα ελέγχου *Shewhart* για μεμονωμένες παρατηρήσεις και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η μέθοδος αυτή είχε πολλά μειονεκτήματα καθώς τα δεδομένα για να μπορέσουν να ερμηνευτούν θα έπρεπε να αναλυθούν με μεθόδους πολυμεταβλητής ανάλυσης. Τελικά, χρησιμοποιώντας ξανά παραγοντική ανάλυση τα δεδομένα μετασχηματίστηκαν, ώστε να μην υπάρχει συσχέτιση μεταξύ τους, και κατασκευάστηκε ένα πολυμεταβλητό διάγραμμα ελέγχου T^2 , το οποίο συγκρίθηκε με τα μονοδιάστατα διαγράμματα για να αποδειχθεί τελικά ότι υπερτερεί έναντι των πρώτων.

Οι Jiang et al., το 2007, ανέπτυξαν μια μέθοδο βασισμένη στις αρχές του στατιστικού ελέγχου διεργασιών, με σκοπό να παρακολουθούνται οι αλλαγές στις συμπεριφορές των πελατών και με τον τρόπο αυτό να ανιχνεύονται ασυνήθιστα γεγονότα στις δραστηριότητες μιας επιχείρησης, να προετοιμάζονται κατάλληλες διαφημιστικές καμπάνιες και να γίνονται προβλέψεις και σχεδιασμοί στρατηγικών. Σε αντίθεση με τις παραγωγικές διεργασίες, στις επιχειρήσεις παροχής υπηρεσιών οι συμπεριφορές των πελατών μπορεί να αλλάζουν απότομα λόγω εποχικότητας, γενικής οικονομικής κατάστασης ή ειδικών προωθητικών ενεργειών, και να υπάρχουν πολλές ακραίες τιμές που επηρεάζουν το μοντέλο. Για τον λόγο αυτό οι κλασικές μέθοδοι που χρησιμοποιούνται στη Φάση I της κατασκευής διαγραμμάτων ελέγχου είναι αδύνατο να οδηγήσουν σε ένα σταθερό και ισχυρό μοντέλο βάσει του οποίου να μπορεί στη συνέχεια να παρακολουθηθεί η διεργασία σε πραγματικό χρόνο. Επομένως, οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν ιστορικά δεδομένα και ειδικές μεθόδους εκθετικής εξομάλυνσης, γραμμικής παλινδρόμησης και κινητού μέσου όρου, ώστε να μοντελοποιήσουν τα διαφορετικά προφίλ των πελατών. Κατασκεύασαν τέσσερις διαφορετικούς αλγόριθμους και στη συνέχεια μέσω μιας εφαρμογής από τον χώρο των τηλεπικοινωνιών με δεδομένα προσομοίωσης αλλά και με πραγματικά δεδομένα, οι αλγόριθμοι αυτοί συγκρίθηκαν ως προς την ευαισθησία, την ταχύτητα ανίχνευσης αλλαγών στη διεργασία και τους λανθασμένους συναγερμούς. Οι συγγραφείς κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι οι τεχνικές που εφάρμοσαν είναι πολύ αποτελεσματικές και ως προς την εκτίμηση των διαφορετικών προφίλ των πελατών, αλλά και ως προς την ανίχνευση των αλλαγών στις δραστηριότητες των επιχειρήσεων, και πρότειναν τη χρήση τους και σε τομείς εκτός των τηλεπικοινωνιών, όπου μπορεί να λαμβάνεται προς ανάλυση μεγάλος όγκος πληροφοριών σε συνεχή πραγματικό χρόνο.

3.2.4 Πληροφορική

Η τέταρτη κατηγορία περιλαμβάνει μόλις πέντε εφαρμογές από τον χώρο της Πληροφορικής οι οποίες αφορούν κυρίως στην παρακολούθηση και την ανίχνευση σφαλμάτων σε λογισμικά συστήματα. Οι συγκεκριμένες εφαρμογές παρόλο που αποτελούν μόνο το 5% των συνολικών άρθρων που περιλαμβάνει η συγκεκριμένη ανασκόπηση, κρίθηκε σκόπιμο να διαχωριστούν από τις υπόλοιπες εφαρμογές καθώς μελετούν έναν τομέα που παρουσιάζει ραγδαία εξέλιξη τα τελευταία χρόνια. Οι τρεις από τις πέντε εφαρμογές πραγματοποιήθηκαν με χρήση απλών διαγραμμάτων ελέγχου τύπου *Shewhart* (60%), ενώ στις δύο χρησιμοποιήθηκαν πιο εξελιγμένες τεχνικές (40%).

Οι Hong *et al.*, το 1999 σε μια σύντομη δημοσίευση, χρησιμοποίησαν τα κλασσικά εργαλεία του στατιστικού ελέγχου διεργασιών για να ανιχνεύσουν πιθανά σφάλματα σε λογισμικά συστήματα, με απώτερο σκοπό την πρόληψή τους. Στο άρθρο παρουσιάστηκε μια εφαρμογή με χρήση του διαγράμματος *u chart*, για την παρακολούθηση του μέσου αριθμού ελαττωμάτων ανά δείγμα, στο οποίο απεικονίστηκαν οι τιμές της πυκνότητας των σφαλμάτων (σφάλματα / γραμμές του κώδικα) από συνολικά 32 κώδικες. Κάθε σημείο του διαγράμματος αντιπροσώπευε έναν από τους 32 κώδικες λογισμικού που ο καθένας έχει διαφορετικό μέγεθος (διαφορετικό αριθμό γραμμών), επομένως τα όρια ελέγχου του διαγράμματος ήταν μεταβλητά. Στη συνέχεια, με ανάλυση *Pareto* εντοπίστηκαν οι βασικές κατηγορίες σφαλμάτων και με ένα διάγραμμα αιτίου-αποτελέσματος αναγνωρίστηκαν οι κύριες αιτίες που προκαλούσαν αυτού του είδους τα σφάλματα. Με τον τρόπο αυτό αποτράπηκε η επανάληψη των ίδιων λαθών και βελτιώθηκε η απόδοση των λογισμικών. Οι συγγραφείς ανέφεραν ότι η συγκεκριμένη τεχνική εφαρμοζόταν εκείνη την περίοδο πιλοτικά στο Κέντρο Λογισμικού της Motorola, στην Σιγκαπούρη.

Οι Cangussu *et al.*, το 2003, χρησιμοποίησαν τις τεχνικές του στατιστικού ελέγχου διεργασιών για να παρακολουθήσουν και να ελέγξουν τη σταθερότητα της διαδικασίας δοκιμής λογισμικών (*Software Test Process – STP*). Οι συγγραφείς θεώρησαν ότι ο αριθμός των σφαλμάτων ανά μονάδα χρόνου που παρουσιάζει κάποιο λογισμικό σύστημα είναι ένας από τους παράγοντες που αντικατοπτρίζει την ποιότητα της συγκεκριμένης διαδικασίας. Η μεταβλητή αυτή όμως ακολουθεί την εκθετική κατανομή και τα κλασσικά διαγράμματα ελέγχου δεν μπορούν να χρησιμοποιηθούν, καθώς παραβιάζεται η βασική υπόθεση της κανονικότητας των δεδομένων. Για τον λόγο αυτό, πρότειναν έναν λογαριθμικό μετασχηματισμό των δεδομένων και στη συνέχεια οι μετασχηματισμένες τιμές

απεικονίστηκαν σε ένα απλό διάγραμμα *Shewhart* \bar{X} . Η προσέγγιση αυτή ονομάστηκε από τους συγγραφείς *SPC_{log}* και εφαρμόστηκε σε δεδομένα προσομοίωσης και πραγματικά με σκοπό να αξιολογηθεί. Όπως αναφέρεται, τα αποτελέσματα της αξιολόγησης απέδειξαν την αποτελεσματικότητα της μεθόδου και στις δύο περιπτώσεις, παρόλο που στο συγκεκριμένο άρθρο παρουσιάστηκαν μόνο οι εφαρμογές με τα δεδομένα προσομοίωσης.

Οι *Matias et al.*, το 2010, πρότειναν τα διαγράμματα ελέγχου για την συνεχή παρακολούθηση και τον έλεγχο της σταθερότητας των *on-line* προβλέψεων της δικτυακής συμφόρησης. Η ραγδαία εξέλιξη των δικτύων επικοινωνίας οδήγησε στην ανάγκη ανάπτυξης ειδικών συστημάτων που προβλέπουν την κίνηση των χρηστών και βοηθούν τους διαχειριστές τους να αποτρέπουν πιθανά προβλήματα συμφόρησης και δυσλειτουργίας. Γενικά, υπάρχουν πολλές μελέτες πάνω στο συγκεκριμένο αντικείμενο, αλλά καμία πιο πριν δεν είχε ασχοληθεί με τον έλεγχο σε πραγματικό χρόνο της ποιότητας των προβλέψεων αυτών. Οι συγγραφείς χρησιμοποίησαν έναν συνδυασμό διαγραμμάτων *CUSUM* και *Shewhart* ώστε να εντοπίζονται άμεσα τα λάθη στις προβλέψεις, που οφείλονται σε μη τυχαία μεταβλητότητα, και με τον τρόπο αυτό να αποτρέπονται οι λανθασμένοι προγραμματισμοί και οι περιττές επεμβάσεις στα δίκτυα που προκαλούν μεγάλο κόστος. Η προσέγγιση αυτή εφαρμόστηκε σε πραγματικά δεδομένα από τρεις διαφορετικούς τύπους δικτύων (LAN, MAN, WAN), και τα μοντέλα πρόβλεψης που παρακολουθήθηκαν υπολογίστηκαν από λογαριθμικά μετασχηματισμένα δεδομένα καθώς αυτά αποδείχθηκαν πιο ακριβή στις προβλέψεις τους.

Οι *Baldassare et al.*, το 2010, δημοσίευσαν μια θεωρητικού περιεχομένου μελέτη στην οποία ανέλυσαν την ιδιαίτερη μεταχείριση που απαιτεί η εφαρμογή των τεχνικών του στατιστικού ελέγχου διεργασιών σε διεργασίες ελέγχου ποιότητας των λογισμικών συστημάτων. Συγκεκριμένα, βασιζόμενοι σε προηγούμενες μελέτες που οι ίδιοι είχαν κάνει, θεώρησαν ότι για την κατάλληλη χρήση των διαγραμμάτων ελέγχου θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη ότι οι λογισμικές διεργασίες ελέγχου ποιότητας διαφέρουν από τις βιομηχανικές ως προς τον υπολογισμό των ορίων ελέγχου, την ερμηνεία των αποτελεσμάτων και τους κανόνες εντοπισμού εκτός ελέγχου διεργασιών. Οι συγγραφείς παρουσίασαν όλα τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά των λογισμικών διεργασιών και πρότειναν κατάλληλους κανόνες χρήσης των διαγραμμάτων ελέγχου όπως αυτοί προέκυψαν από εφαρμογές με πραγματικά δεδομένα που οι ίδιοι είχαν πραγματοποιήσει στο παρελθόν. Το συγκεκριμένο άρθρο αποτελεί περισσότερο ένα «εγχειρίδιο ορθής χρήσης» των εργαλείων του στατιστικού ελέγχου διεργασιών και

απευθύνεται σε όσους τα χρησιμοποιούν για τη βελτίωση της απόδοσης των λογισμικών συστημάτων.

3.2.5 Προβλέψεις

Η τελευταία κατηγορία περιλαμβάνει τρεις δημοσιεύσεις (3%) με κύριο αντικείμενο τη χρήση των διαγραμμάτων ελέγχου στην επιλογή ενός κατάλληλου μοντέλου πρόβλεψης και παρακολούθησης της σταθερότητάς του στο πέρασμα του χρόνου. Οι δύο από τις τρεις εφαρμογές πραγματοποιήθηκαν με χρήση εξελιγμένων διαγραμμάτων ελέγχου (67%), ενώ μόνο στη μία χρησιμοποιήθηκαν κλασσικά διαγράμματα ελέγχου τύπου *Shewhart* (33%).

Οι Hill *et al.*, το 1996, πρότειναν τα διαγράμματα ελέγχου *CUSUM* για να παρακολουθείται η απόδοση των μοντέλων πρόβλεψης που χρησιμοποιούνται από τα τμήματα προμηθειών των επιχειρήσεων. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιώντας δεδομένα από μια σειρά μελετών που πραγματοποίησε το Πανεπιστήμιο του Warwick, εξέτασαν ως προς την απόδοσή τους δύο διαφορετικά μοντέλα πρόβλεψης της ζήτησης σε σχέση με την πραγματική ζήτηση. Αρχικά, με δύο απλά ραβδογράμματα φάνηκε ότι και στα δύο μοντέλα υπήρχαν αποκλίσεις της προβλεπόμενης ζήτησης από την πραγματική, αλλά ιδιαίτερα στο δεύτερο μοντέλο οι αποκλίσεις αυτές ήταν μεγαλύτερες. Στη συνέχεια, χρησιμοποιώντας τα ίδια δεδομένα, απεικονίστηκαν οι αποκλίσεις των πραγματικών τιμών της ζήτησης από αυτές που είχαν προβλεφθεί, σε αθροιστικά διαγράμματα ελέγχου *CUSUM* με τη μέθοδο *V-Mask* και την αλγοριθμική μέθοδο (*tabular*). Τα αποτελέσματα και των δύο μεθόδων υπέδειξαν μια σταθερή διεργασία για το πρώτο μοντέλο πρόβλεψης, ενώ για το δεύτερο μοντέλο εντοπίστηκαν ενδείξεις εκτός ελέγχου διεργασίας. Παρόλα αυτά, δεν περιγράφηκε λεπτομερώς ο τρόπος κατασκευής των εν λόγω διαγραμμάτων ελέγχου και δεν έγινε καμία αναφορά στο αν τηρήθηκαν οι βασικές υποθέσεις ή όχι.

Οι Atienza *et al.*, το 1997, συνέκριναν τις τεχνικές του στατιστικού ελέγχου διεργασιών με τις μεθόδους υπολογισμού μοντέλων πρόβλεψης, με σκοπό την ανάπτυξη ενός γενικού πλαισίου που θα συνδυάζει τα δύο αυτά αντικείμενα και θα στοχεύει στην βελτίωση της ακρίβειας των προβλέψεων. Αρχικά, επιλέχθηκε το κατάλληλο μοντέλο πρόβλεψης και στη συνέχεια με την εφαρμογή των διαγραμμάτων ελέγχου παρακολουθήθηκε η απόδοσή του στο πέρασμα του χρόνου. Αν τα διαγράμματα ελέγχου υποδείκνυαν ότι η διεργασία είναι εκτός στατιστικού ελέγχου, τότε θα έπρεπε να επανεκτιμηθούν οι παράμετροι του μοντέλου

πρόβλεψης ή να αναδιαμορφωθεί το ίδιο το μοντέλο. Αν τα διαγράμματα ελέγχου υποδείκνυαν ότι η διεργασία είναι σταθερή, τότε το μοντέλο κρίνεται ικανοποιητικό ως προς τις προβλέψεις που παράγει. Οι μέθοδοι πρόβλεψης και στατιστικού ελέγχου διεργασιών έχουν πολλά κοινά στοιχεία και η συνδυαστική χρήση τους μπορεί να προσδιορίσει κατάλληλα μοντέλα πρόβλεψης που παραμένουν λειτουργικά και αποτελεσματικά στο πέρασμα του χρόνου εντός συγκεκριμένων ορίων ανοχής.

Οι Koksalan *et al.*, το 1999, χρησιμοποίησαν τις βασικές αρχές του στατιστικού ελέγχου διεργασιών για να εντοπίσουν τους παράγοντες που επηρεάζουν τη ζήτηση της μύρας στην Τουρκία και να κατασκευάσουν τα κατάλληλα μοντέλα για την πρόβλεψή της. Η εργασία αυτή πραγματοποιήθηκε για μια ιδιωτική εταιρία πώλησης μύρας στην Τουρκία σε συνεργασία με το τμήμα πωλήσεών της, και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν ήταν πραγματικά. Αναπτύχθηκαν δύο μοντέλα γραμμικής παλινδρόμησης, ένα μεσοπρόθεσμο μοντέλο για να εξηγήσει την ετήσια κατανάλωση μύρας ανά κάτοικο, και ένα βραχυπρόθεσμο μοντέλο για να εντοπιστούν οι παράγοντες που επηρεάζουν την μηνιαία ζήτηση μύρας. Αρχικά, το προσωπικό από τα τμήματα πωλήσεων όλων των τοπικών παραρτημάτων της εταιρίας κλήθηκε να βαθμολογήσει από το 1 έως το 10 την επιρροή που θεωρούσε ότι έχουν στην ζήτηση της μύρας 20 συνολικά παράγοντες. Από τους παράγοντες αυτούς εξαιρέθηκαν μόνο όσοι θεωρήθηκαν ασήμαντοι από όλα τα τοπικά τμήματα πωλήσεων, καθώς και τέσσερις ακόμη παράγοντες (ποιότητα μύρας, προωθητικές ενέργειες, σημεία πώλησης, διαφήμιση) τους οποίους οι ερευνητές έκριναν ως ακατάλληλους για ένταξη στα μοντέλα καθώς την περίοδο που διεξήχθη η μελέτη δεν μεταβλήθηκαν. Για το μεσοπρόθεσμο μοντέλο, το διάγραμμα διασποράς (*scatterplot*) των τυποποιημένων καταλοίπων έναντι των προβλεπόμενων πωλήσεων μύρας υπέδειξε μη σταθερή διακύμανση, κάτι που οδήγησε τους ερευνητές στο συμπέρασμα ότι ίσως υπάρχουν κάποιοι επιπλέον παράγοντες που επηρεάζουν την ετήσια κατανάλωση της μύρας και δεν έχουν συμπεριληφθεί στο μοντέλο. Για τον λόγο αυτό, χρησιμοποίησαν ένα διάγραμμα ελέγχου παλινδρόμησης (*regression control chart*), στο οποίο κατέγραψαν τις τιμές των τυποποιημένων καταλοίπων του μοντέλου και κατάφεραν με τον τρόπο αυτό να βρουν ότι υπήρχαν κάποιες μεταβλητές που επηρεάζουν το μοντέλο και που δεν είχαν συμπεριληφθεί σε αυτό. Ο ακριβής προσδιορισμός των μεταβλητών που έλειπαν έγινε με τη βοήθεια του προσωπικού από το τμήμα πωλήσεων, οι οποίοι εξαιτίας της εμπειρίας τους κατάφεραν να αναγνωρίσουν ποιες είναι αυτές οι μεταβλητές και τελικά να συμπεριληφθούν στο μοντέλο

ώστε να εξηγηθεί το μεγαλύτερο μέρος της διακύμανσης στην ετήσια κατανάλωση μύρας. Με παρόμοιο τρόπο ανέπτυξαν και βελτίωσαν επίσης το βραχυπρόθεσμο μοντέλο για την μηνιαία ζήτηση της μύρας στην Τουρκία. Οι συγγραφείς τόνισαν ότι η στενή συνεργασία που είχαν με το προσωπικό της εταιρίας συνέλαβε σημαντικά στην επίτευξη του στόχου τους, και οι τεχνικές που αναπτύχθηκαν συνέχισαν να χρησιμοποιούνται με επιτυχία από την εν λόγω εταιρία, καθώς το προσωπικό, λόγω της εμπλοκής του στην έρευνα, απέκτησε την κατάλληλη εμπειρία.

3.3 Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα

Στην ανασκόπηση που προηγήθηκε, 104 μη βιομηχανικές εφαρμογές που δημοσιεύθηκαν από το 1989 έως και τα μέσα 2014, εντάχθηκαν σε πέντε κατηγορίες βάσει του κύριου αντικειμένου που μελετούν. Είναι πλέον φανερό ότι η χρήση του βασικού εργαλείου του στατιστικού ελέγχου διεργασιών, δηλαδή των διαγραμμάτων ελέγχου, έχει επεκταθεί σε ένα ευρύ φάσμα πεδίων εφαρμογής πέραν της συμβατικής παραγωγικής διαδικασίας, όπως για παράδειγμα στην ιατρική, τη νοσηλευτική, την εκπαίδευση, την οικονομία, το περιβάλλον, την πληροφορική κ.α.. Παρόλο που τα διαγράμματα ελέγχου αποδεδειγμένα πλέον χρησιμοποιούνται σε πολλούς τομείς εκτός της βιομηχανίας, ο κύριος σκοπός εφαρμογής τους παραμένει ο ίδιος και είναι ο διαχωρισμός της ειδικής από την κοινή μεταβλητότητα μιας διεργασίας.

Ο τομέας της Υγείας περιλαμβάνει το 52% των συνολικών μη βιομηχανικών εφαρμογών που συγκεντρώθηκαν στα πλαίσια της παρούσας ανασκόπησης, κάτι που αποδεικνύει τη μεγάλη απήχηση που έχουν οι τεχνικές του στατιστικού ελέγχου διεργασιών στον χώρο αυτό. Ο κλάδος της ιατρικής, της νοσοκομειακής περίθαλψης και της φαρμακευτικής αποτελούν διαχρονικά ένα πεδίο συνεχούς έρευνας και ανάπτυξης αφού σχετίζονται άμεσα με την ανθρώπινη ζωή. Η υψηλή ποιότητα στις παροχές υγείας δεν απασχολεί μόνο τους ασθενείς και τους εργαζόμενους στον κλάδο, αλλά ολόκληρη την κοινωνία, καθώς αποτελεί δείγμα ανάπτυξης και οικονομικής ευημερίας για κάθε κράτος. Επομένως το έδαφος είναι πρόσφορο για την εισαγωγή και την ανάπτυξη τεχνικών ελέγχου και βελτίωσης της ποιότητας.

Από την άλλη, οι εφαρμογές που προέρχονται από το χώρο της μηχανικής, της συντήρησης και του περιβάλλοντος όλο και λιγοστεύουν. Αξιοσημείωτο είναι, ότι ενώ αυτή η

κατηγορία βρίσκεται στη δεύτερη θέση και περιλαμβάνει το 22% των συνολικών μη βιομηχανικών εφαρμογών, μόνο οκτώ από αυτές τις μελέτες έχουν δημοσιευθεί από το 2000 και μετά.

Η κατηγορία των Γενικών Υπηρεσιών περιλαμβάνει το 18% των συνολικών μη βιομηχανικών εφαρμογών και παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ποικιλομορφία. Οι μελέτες που παρουσιάστηκαν αφορούσαν μια τράπεζα, ένα κατάστημα αλυσίδας τροφίμων, ένα τοπικό αστυνομικό τμήμα και την εγκληματικότητα της περιοχής, ένα πανεπιστήμιο, ένα εκπαιδευτικό κέντρο κ.α.. Παρά την διαφορετικότητα των κλάδων που μελετήθηκαν, ο σκοπός της χρήσης των διαγραμμάτων ελέγχου ήταν κοινός και στόχευε στην καλύτερη εξυπηρέτηση των πελατών, στην αξιολόγηση των προσφερόμενων υπηρεσιών και στην αύξηση της κερδοφορίας.

Ο τομέας της πληροφορικής αποτελεί μόλις το 5% των συνολικών μη βιομηχανικών εφαρμογών και η χρήση του στατιστικού ελέγχου ποιότητας εμφανίστηκε στον χώρο αυτό τα τελευταία χρόνια. Οι ραγδαίες εξελίξεις στον κλάδο των επικοινωνιών και της πληροφορικής αύξησε τον ανταγωνισμό μεταξύ των επιχειρήσεων και δημιούργησε την ανάγκη για έλεγχο και βελτίωση της ποιότητας των προσφερόμενων προϊόντων και υπηρεσιών. Τα δεδομένα προέρχονται από αυτοματοποιημένα συστήματα, επομένως μεγάλος όγκος δεδομένων είναι διαθέσιμος εύκολα ανά πάσα στιγμή. Οι πέντε δημοσιεύσεις που συλλέχθηκαν από τον τομέα της πληροφορικής αφορούν τον εντοπισμό σφαλμάτων διάφορων λογισμικών, ενώ καμία εφαρμογή δεν έχει γίνει για αξιολόγηση υπηρεσιών ή προϊόντων από πελάτες. Ο τομέας της πληροφορικής προσφέρεται για εφαρμογή των τεχνικών του στατιστικού ελέγχου διεργασιών και ίσως μελλοντικά πραγματοποιηθούν περαιτέρω μελέτες στο εν λόγω αντικείμενο.

Τέλος, τρία άρθρα διαχωρίστηκαν από τα υπόλοιπα και δημιούργησαν την κατηγορία «Προβλέψεις», καθώς το κύριο αντικείμενο που μελετούν είναι τα μοντέλα πρόβλεψης. Παρόλο που οι χώροι από όπου προέρχονται τα δεδομένα διαφέρουν σημαντικά, οι μελέτες αυτές έχουν κοινό στόχο την επιλογή ενός κατάλληλου μοντέλου πρόβλεψης και την συνεχή αξιολόγησή του. Οι τρεις μη βιομηχανικές εφαρμογές θεωρήθηκε σκόπιμο να απομονωθούν από τις υπόλοιπες για να δοθεί έμφαση στον εναλλακτικό τρόπο που τα διαγράμματα ελέγχου χρησιμοποιήθηκαν σε αυτές και να παρουσιαστεί ένας εν δυνάμει νέος τομέας εφαρμογής τους με πολλές δυνατότητες περαιτέρω μελέτης και εξέλιξης.

Σχετικά με τις τεχνικές των διαγραμμάτων ελέγχου που χρησιμοποιήθηκαν στις μελέτες, είναι εμφανής η προτίμηση στα κλασσικά διαγράμματα ελέγχου τύπου *Shewhart*, τα οποία

χρησιμοποιήθηκαν στο 57% των συνολικών εφαρμογών. Δεδομένου ότι είναι απλά στην εφαρμογή και την ερμηνεία τους, και έχει διαχρονικά αποδειχθεί η αποτελεσματικότητα και η εγκυρότητά τους, οι ερευνητές τα χρησιμοποιούν ευρέως στις μελέτες τους χωρίς να αναζητούν εναλλακτικές μεθόδους. Επιπλέον, ένα μεγάλο μέρος των μη βιομηχανικών εφαρμογών διεξάγεται από ερευνητές με επιστημονικό υπόβαθρο διαφορετικό της στατιστικής (π.χ. ιατρική), με αποτέλεσμα να επιλέγουν πιο προσιτές και κατανοητές σε αυτούς μεθόδους. Η γενική εικόνα από την ανασκόπηση που προηγήθηκε δείχνει πως οι συγγραφείς κατά κύριο λόγο αποσκοπούν στην ανάδειξη των διαγραμμάτων ελέγχου σε ποικίλους κλάδους εκτός της βιομηχανίας, ενώ λίγοι είναι αυτοί που πειραματίζονται για την ανεύρεση νέων τρόπων ανάπτυξης και διαχείρισής τους.

Κλείνοντας το κεφάλαιο αυτό, θα πρέπει να σημειωθεί ότι από την εξάπλωση και την ευρεία χρήση των διαγραμμάτων ελέγχου πέραν της βιομηχανίας προκύπτουν κάποια θεμελιώδη ζητήματα τα οποία θα πρέπει να λαμβάνονται σοβαρά υπόψη. Σε ορισμένες εφαρμογές παρατηρήθηκε ότι οι βασικές παραδοχές στις οποίες στηρίζονται τα διαγράμματα ελέγχου *Shewhart* είτε παραβιάζονται είτε αγνοούνται, κάτι που αναμφισβήτητα οδηγεί σε αναξιόπιστα συμπεράσματα. Στις μη βιομηχανικές εφαρμογές η φύση και πολύ συχνά η πολυπλοκότητα των δεδομένων απαιτούν ιδιαίτερη μεταχείριση. Τα δεδομένα θα πρέπει να επιλέγονται, να ελέγχονται και να αναλύονται με ιδιαίτερη προσοχή και οι μεταβλητές που παρακολουθούνται θα πρέπει να εξετάζεται κατά πόσο αντικατοπτρίζουν την ποιότητα μιας διεργασίας. Ένα επίσης πολύ σημαντικό θέμα είναι η ερμηνεία των διαγραμμάτων, καθώς όπως είναι γνωστό ένα σημείο εκτός των ορίων ελέγχου μπορεί στην πραγματικότητα να αποδειχθεί «αθώο», ενώ μια διεργασία εντός των ορίων ελέγχου μπορεί να κρύβει σημαντικές ενδείξεις αστάθειας. Επομένως, για να μπορούν τα διαγράμματα ελέγχου να χρησιμοποιούνται αποτελεσματικά σε οποιαδήποτε μη βιομηχανική εφαρμογή, θα πρέπει να συνοδεύονται από την κατάλληλη στατιστική ανάλυση και τυχόν τεχνικά ή στατιστικά θέματα που προκύπτουν δεν θα πρέπει να παραβλέπονται.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

Μελέτη Περίπτωσης Συντήρηση Αιολικών Πάρκων

4.1 Εισαγωγή

Ο τομέας της ενέργειας αποτελούσε ανέκαθεν έναν από τους βασικούς πυλώνες της ελληνικής οικονομίας, καθώς ακολούθησε αλλά και διαμόρφωσε ολόκληρη την αναπτυξιακή πορεία του τόπου. Τα τελευταία χρόνια, μετά τις διαδοχικές ενεργειακές κρίσεις και σε συνδυασμό με τα μεγάλα περιβαλλοντικά προβλήματα, ο άνθρωπος έδειξε ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την αξιοποίηση της αιολικής ενέργειας, καθώς προσφέρει φθηνή ηλεκτρική ενέργεια, δημιουργεί ανάπτυξη και απασχόληση στην περιφέρεια, ενισχύει τους τοπικούς αναπτυξιακούς πόρους, βελτιώνει το ισοζύγιο εξωτερικών πληρωμών και έχει σημαντική εθνική προστιθέμενη αξία. Στην Ελλάδα της εντεινόμενης οικονομικής και κοινωνικής κρίσης, η αιολική ενέργεια αποτελεί έναν από τους ελάχιστους τομείς που διατηρεί επενδυτική δραστηριότητα και συνεχίζει να αναπτύσσεται με αυξανόμενους ρυθμούς.

Το 1998 κατασκευάστηκε το πρώτο ιδιωτικό αιολικό πάρκο στην Σητεία, Κρήτης με ισχύ 10.2 MW, ενώ σήμερα η συνολική εγκατεστημένη ισχύς σε ολόκληρη την Ελλάδα ανέρχεται στα 1.865 MW. Η κατασκευή πληθώρας αιολικών πάρκων την τελευταία δεκαπενταετία δημιούργησε έναν νέο τομέα απασχόλησης που δραστηριοποιείται στην λειτουργία και την συντήρηση των ανεμογεννητριών (*Operation and Maintenance Services*). Συγκεκριμένα, σύμφωνα με την Ελληνική Επιστημονική Ένωση Αιολικής Ενέργειας και στα πλαίσια στατιστικής έρευνας που πραγματοποιήθηκε τον Ιούνιο του 2009, δημιουργούνται 0.32 θέσεις πλήρους απασχόλησης ανά MW στη συντήρηση και την λειτουργία των αιολικών πάρκων. Επομένως, αν ληφθεί υπόψη ότι αυτή τη στιγμή στην Ελλάδα είναι εγκατεστημένα 1.865 MW, σύμφωνα με την παραπάνω παραδοχή απασχολούνται περίπου 600 άτομα σε μόνιμες θέσεις εργασίας στον τομέα αυτό. Τα νούμερα αυτά αναμένεται να αυξηθούν κατά πολύ μέχρι το 2020, καθώς στα πλαίσια της Ευρωπαϊκής Ενεργειακής Πολιτικής σύμφωνα με την οποία το 20% της ακαθάριστης τελικής κατανάλωσης ενέργειας κάθε κράτους-μέλους της

ΕΕ θα πρέπει να προέρχεται από Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας, η Ελλάδα έχει θέσει ως εθνικό στόχο τα αιολικά πάρκα να φθάσουν τα 7.500 MW.

Στις αρχές του 21^{ου} αιώνα και όταν ακόμα τα αιολικά πάρκα στην Ελλάδα ήταν ελάχιστα, την λειτουργία και την συντήρησή τους αναλάμβαναν οι ίδιοι οι κατασκευαστές τους. Τα επόμενα χρόνια, όταν οι ανάγκες για συνεχή παρακολούθηση και αντιμετώπιση τυχόν βλαβών των ανεμογεννητριών αυξήθηκε ραγδαία, πολλές εξειδικευμένες εταιρίες παροχής υπηρεσιών άρχισαν να αναλαμβάνουν την συντήρηση των αιολικών πάρκων. Οι εταιρίες αυτές είναι υπεύθυνες για την ομαλή λειτουργία των αιολικών πάρκων και για την προληπτική και έγκαιρη συντήρηση των ανεμογεννητριών. Δεδομένου ότι πολλές τέτοιου είδους εταιρίες εμφανίστηκαν στην Ελλάδα την τελευταία δεκαετία, υπάρχει έντονος ανταγωνισμός στον κλάδο αυτό, καθώς κάθε εταιρία καταβάλλει τεράστιες προσπάθειες ώστε να κερδίσει όλο και μεγαλύτερο μερίδιο της αγοράς. Οι ιδιοκτήτες και διαχειριστές των αιολικών πάρκων αναθέτουν την επίβλεψή του σε μια από τις εταιρίες αυτές σύμφωνα με την ποιότητα των υπηρεσιών που παρέχουν, καθώς γι' αυτούς κάθε λεπτό που μια ανεμογεννήτρια μπορεί να σταματήσει να λειτουργεί μεταφράζεται σε τεράστια οικονομική ζημιά. Σύμφωνα με όλα όσα προαναφέρθηκαν, είναι φανερό η ανάγκη για συνεχή έλεγχο και βελτίωση των παρεχόμενων υπηρεσιών που προσφέρονται από τις εταιρίες συντήρησης των αιολικών πάρκων.

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάζεται μια εφαρμογή των μεθόδων Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών στις υπηρεσίες συντήρησης των αιολικών πάρκων, χρησιμοποιώντας πραγματικά δεδομένα από μια εταιρία που δραστηριοποιείται στον κλάδο αυτό. Από έρευνα που έγινε διαπιστώθηκε ότι μέχρι και σήμερα καμία εταιρία δεν φαίνεται να έχει υιοθετήσει τέτοιου είδους μεθόδους ελέγχου και βελτίωσης των υπηρεσιών της, κάτι που αν είχε γίνει εκτιμάται ότι θα διαφοροποιούσε θετικά την υπάρχουσα κατάσταση.

4.2 Συντήρηση Αιολικών Πάρκων

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζονται και αναλύονται οι σημαντικότερες διαδικασίες συντήρησης ενός αιολικού πάρκου προκειμένου να αποφευχθούν τεχνικά προβλήματα, αστοχίες και ατυχήματα κατά τη λειτουργία του.

Οι ανεμογεννήτριες είναι αρκετά πολύπλοκες μηχανές και η σωστή λειτουργία τους επηρεάζεται από πλήθος παραγόντων όπως είναι οι καιρικές συνθήκες, η ταχύτητα του

ανέμου, οι δονήσεις των πτερυγίων κ.α. Επομένως είναι πολύ σημαντική η ορθή και τακτή συντήρησή τους προκειμένου να προληφθούν καταστάσεις που μπορεί να οδηγήσουν σε ανεπανόρθωτες ζημιές.

Οι δονήσεις που δέχονται, κυρίως τα πτερύγια αλλά και άλλα μέρη μιας ανεμογεννήτριας από τον άνεμο, είναι ο παράγοντας που καθορίζει κατά το μέγιστο την πιθανότητα λειτουργικής αστοχίας ή ατυχήματος. Οι δονήσεις μπορούν να προκαλέσουν τη μετατόπιση υλικών, την αποκόλληση κάποιων συνδέσμων ακόμα και το μερικό ή ολικό σπάσιμο των πτερυγίων.

Ένας άλλος παράγοντας που μπορεί να οδηγήσει σε μία πιθανή βλάβη στην ανεμογεννήτρια είναι η σκόνη. Η σκόνη (με τη μορφή γύρης, χνουδιών, σπόρων, εντόμων, κλπ.) παρεμποδίζει τη ροή του αέρα και μειώνει την ψύξη και κατά συνέπεια αυξάνεται η θερμοκρασία των διαφόρων μηχανικών και ηλεκτρικών εξαρτημάτων, όπως είναι η γεννήτρια παραγωγής ηλεκτρικού ρεύματος, το κιβώτιο ταχυτήτων, κλπ. Για την εξάλειψη αυτών των προβλημάτων και την ελαχιστοποίηση της πιθανότητας λειτουργικής αστοχίας ή ατυχήματος είναι απαραίτητη η εκτέλεση της κατάλληλης προληπτικής συντήρησης (*predictive maintenance*). Κάθε κατασκευαστής ανεμογεννητριών παρέχει το δικό του εγχειρίδιο και πρόγραμμα προληπτικής συντήρησης. Η ετήσια προληπτική συντήρηση περιλαμβάνει διάφορες εργασίες, ελέγχους, και δραστηριότητες στα διαφορετικά μέρη των ανεμογεννητριών. Η προληπτική συντήρηση είναι σημαντική εκτός των άλλων και για τη βελτίωση της λειτουργίας των ανεμογεννητριών. Για παράδειγμα, η λίπανση των κινούμενων μερών που περιλαμβάνεται στην προληπτική συντήρηση εάν δεν εκτελεστεί, μπορεί να προκαλέσει σοβαρές συνέπειες ακόμα και σε βραχυπρόθεσμες λειτουργίες.

Εκτός της προληπτικής συντήρησης, υπάρχει και η «έγκαιρη» συντήρηση. Οι στόχοι της είναι οι ίδιοι – να βελτιωθεί η αξιοπιστία εξαλείφοντας πιθανές βλάβες. Ωστόσο, έχει ορισμένες ιδιαιτερότητες. Αυτού του τύπου η συντήρηση βασίζεται στην ανάλυση συγκεκριμένων στοιχείων για μία έγκαιρη ανίχνευση των μεταβολών στις συνθήκες λειτουργίας. Η συντήρηση αυτή επίσης εκτελείται τακτικά, αναλύοντας ορισμένα δεδομένα, τα οποία οι τεχνικοί καταχωρούν και προσφέρουν τη δυνατότητα ανάλυσης και σύγκρισής τους. Έτσι προκύπτουν σημαντικά συμπεράσματα σχετικά με την εξέλιξη κάποιων μεταβλητών. Η εκτίμηση αυτή επιτρέπει τον προγραμματισμό διορθωτικών εργασιών με την ελάχιστη δυνατή επίδραση στην παραγωγικότητα της κάθε ανεμογεννήτριας.

Ένα άλλο είδος συντήρησης, για τις ανεμογεννήτριες, είναι η προαιρετική (*proactive*) συντήρηση. Η προαιρετική συντήρηση ασχολείται κυρίως με την ανάλυση των υπάρχοντων βλαβών και την προέλευσή τους. Εστιάζει στην αναγνώριση και διόρθωση των αιτιών των βλαβών τόσο στα εξαρτήματα της κάθε ανεμογεννήτριας όσο και στην διαδικασία εγκατάστασής της. Υπάρχουν πολλοί τρόποι για την πρόληψη αυτού του είδους των σφαλμάτων. Τροποποιήσεις στο σχεδιασμό, βελτίωση των διαδικασιών συντήρησης, και βελτιώσεις στην εκπαίδευση και την εμπλοκή του προσωπικού συντήρησης, είναι κάποιοι από αυτούς.

Σε οποιαδήποτε φάση συντήρησης η πρώτη εργασία που εκτελείται αμέσως με την άφιξη στο αιολικό πάρκο είναι ο έλεγχος της κατάστασης κάθε ανεμογεννήτριας. Εάν μία ανεμογεννήτρια δεν λειτουργεί εξαιτίας βλάβης, τότε απαιτείται διορθωτική ενέργεια (διορθωτική συντήρηση). Η διορθωτική συντήρηση σε μία ανεμογεννήτρια είναι η εκτέλεση των απαιτούμενων εργασιών συντήρησης με στόχο την διόρθωση πιθανών σφαλμάτων, την αντικατάσταση εξαρτημάτων ή τη διόρθωση οποιασδήποτε ανωμαλίας ανιχνεύθηκε κατά τη διάρκεια οποιουδήποτε είδους συντήρησης προηγήθηκε. Η διορθωτική συντήρηση μπορεί να είναι αρκετά πολύπλοκη και χρονοβόρα ανάλογα με το είδος της βλάβης που εντοπίζεται.

Ένα πλήρες και λεπτομερές πρόγραμμα συντήρησης απαιτείται για τη βελτίωση της απόδοσης ενός αιολικού πάρκου. Η καθυστέρηση πραγματοποίησης μιας συντήρησης μπορεί να προκαλέσει προβλήματα λειτουργίας αλλά δεν είναι πάντα εύκολο να αποφευχθεί καθώς η συντήρηση εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες, το μέγεθος των παρατηρούμενων βλαβών κλπ.

4.3 Το Περιβάλλον Εφαρμογής

Προτού παρουσιαστεί η εφαρμογή των εργαλείων του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών στις υπηρεσίες συντήρησης των αιολικών πάρκων, κρίνεται σκόπιμο να γίνει μια μικρή περιγραφή του περιβάλλοντος εφαρμογής. Ακολουθούν κάποια βασικά χαρακτηριστικά της εταιρίας που μελετάται, η περιγραφή των διαδικασιών συντήρησης που ακολουθεί και του τρόπου που συλλέγονται και αποθηκεύονται οι πληροφορίες για την κατάσταση των ανεμογεννητριών.

4.3.1 Η εταιρία

Η εταιρία Α ιδρύθηκε το 2007 στην Ελλάδα και αποτελεί παράρτημα αλλοδαπής πολυεθνικής εταιρίας. Ο εν λόγω όμιλος θεωρείται παγκόσμιος ηγέτης στην κατασκευή, ανέγερση και συντήρηση αιολικών πάρκων, με γραφεία σε 20 χώρες και προσωπικό που ξεπερνά τους 4.000 υπαλλήλους. Αυτή τη στιγμή προσφέρει υπηρεσίες συντήρησης αιολικών πάρκων συνολικής ισχύος 12.500 MW από τα οποία τα 182 MW βρίσκονται στον Ελλαδικό χώρο.

Το ελληνικό παράρτημα απασχολεί 24 άτομα που ασχολούνται αποκλειστικά με την λειτουργία και την συντήρηση 7 αιολικών πάρκων συνολικής ισχύος 182 MW. Από αυτούς οι 20 είναι τεχνικοί συντήρησης και είναι εγκατεστημένοι στην περιφέρεια κοντά στα πάρκα, ενώ οι υπόλοιποι 4 βρίσκονται στα κεντρικά γραφεία της εταιρίας στην Αθήνα, από όπου επιλέγουν και εκπαιδεύουν τους τεχνικούς, παρακολουθούν και συντονίζουν τις διαδικασίες συντήρησης και παρεμβαίνουν όποτε κρίνεται αναγκαίο. Επίσης, στα κεντρικά γραφεία του ομίλου στο εξωτερικό εργάζονται 2 ανώτερα στελέχη που εποπτεύουν τις εργασίες στην Ελλάδα και επιπλέον λειτουργεί ένα ολόκληρο τμήμα τεχνικών οι οποίοι παρακολουθούν απομακρυσμένα μέσω υπολογιστών την κατάσταση των ανεμογεννητριών 24 ώρες το 24ωρο σε καθημερινή βάση. Για το συγκεκριμένο τεχνικό τμήμα θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στη συνέχεια, όπου θα περιγραφούν λεπτομερώς οι διαδικασίες συντήρησης των ανεμογεννητριών που εκτελεί η εταιρία Α.

4.3.2 Διαδικασίες συντήρησης

Οι τεχνικοί συντήρησης είναι υπεύθυνοι για την λειτουργία και την συντήρηση των αιολικών πάρκων. Σε κάθε πάρκο που η εταιρία Α παρέχει τις υπηρεσίες της, ανάλογα με τον αριθμό των ανεμογεννητριών και το μέγεθός του, απασχολούνται καθημερινά με πλήρες ωράριο 2 ή 4 τεχνικοί συντήρησης. Οι τεχνικοί αυτοί διαμένουν μόνιμα ή έχουν εγκατασταθεί κοντά στα πάρκα, ώστε να έχουν εύκολη και γρήγορη πρόσβαση στον τόπο εργασίας τους. Επίσης, πολύ συχνά απαιτείται η μετακίνησή τους σε διαφορετικά πάρκα, είτε για να καλύψουν την θέση κάποιου εργαζόμενου που απουσιάζει, είτε για υποστηρικτικούς λόγους. Οι τεχνικοί συντήρησης υποχρεούνται να βρίσκονται στο πάρκο ακόμη και σε ακραίες καιρικές συνθήκες και σχεδόν καθημερινά ανεβαίνουν στις ανεμογεννήτριες που μπορεί να φτάνουν και τα 100 μέτρα σε ύψος.

Τα καθήκοντά τους περιλαμβάνουν τις προγραμματισμένες ή προληπτικές συντηρήσεις, οι οποίες πραγματοποιούνται σε ετήσια, εξάμηνη και τρίμηνη βάση, με σκοπό τον έλεγχο και την αντικατάσταση συγκεκριμένων υλικών στα ηλεκτρικά και μηχανολογικά μέρη των ανεμογεννητριών. Αυτού του είδους οι συντηρήσεις πραγματοποιούνται σε συγκεκριμένες ημερομηνίες κάθε έτους σύμφωνα με χρονοδιαγράμματα που ορίζονται από τα ανώτερα στελέχη της εταιρίας και τους κατασκευαστές των ανεμογεννητριών. Την περίοδο της προληπτικής συντήρησης οι τεχνικοί δεν επιτρέπεται να απουσιάζουν από τα πάρκα και εργάζονται πολλές ώρες την ημέρα, για να ανταπεξέλθουν χρονικά στο καθορισμένο πρόγραμμα.

Πέραν όμως των προληπτικών συντηρήσεων, οι τεχνικοί είναι υπεύθυνοι και για την επιδιόρθωση τυχόν βλαβών των ανεμογεννητριών. Οι ανεμογεννήτριες, όπως ήδη αναφέρθηκε, είναι πολύπλοκες μηχανές που επηρεάζονται από πολλούς παράγοντες, οι οποίοι συχνά οδηγούν σε αστοχίες στην λειτουργία τους. Για τον λόγο αυτό, οι τεχνικοί συντήρησης βρίσκονται σε επιφυλακή 365 μέρες τον χρόνο και σε περίπτωση σοβαρής βλάβης καλούνται να προσέλθουν στο πάρκο και να την επιδιορθώσουν σε σύντομο χρονικό διάστημα. Σημαντικό ρόλο σε αυτή τη διαδικασία διαδραματίζει το τεχνικό τμήμα που βρίσκεται στα κεντρικά γραφεία της εταιρίας στο εξωτερικό. Εκεί υπάρχουν ειδικά εκπαιδευμένοι τεχνικοί, οι οποίοι μέσω υπολογιστών παρακολουθούν την κατάσταση των ανεμογεννητριών σε όλα τα πάρκα 24 ώρες το 24ωρο καθημερινά. Σε περίπτωση που εντοπιστεί κάποια βλάβη η οποία απαιτεί άμεση παρέμβαση, καλούν τους κατά τόπους τεχνικούς συντήρησης και τους ζητούν να προσέλθουν στο πάρκο εντός 2 ωρών, ώστε να ελέγξουν την κατάσταση και να προβούν στις κατάλληλες διορθωτικές ενέργειες. Δεν απαιτούν όμως όλες οι βλάβες την «επί τόπου» επέμβαση των τεχνικών συντήρησης. Τις περισσότερες φορές οι βλάβες που εμφανίζονται προέρχονται από σφάλματα του συστήματος και επιδιορθώνονται απομακρυσμένα από το αρμόδιο τμήμα στο εξωτερικό με το πάτημα ενός κουμπιού στον υπολογιστή. Άλλες φορές όμως, το τεχνικό πρόβλημα που εμφανίζεται δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί απομακρυσμένα και οι τεχνικοί υποχρεούνται να βρεθούν στο πάρκο είτε για να διορθώσουν την βλάβη από τον υποσταθμό με μια απλή επαναφορά του συστήματος, είτε για να ανέβουν στην ανεμογεννήτρια και να ξεκινήσουν τις εργασίες επαναλειτουργίας της. Σε αυτό το σημείο πρέπει να σημειωθεί πως για λόγους ασφαλείας, στις ανεμογεννήτριες πρέπει πάντοτε, και χωρίς καμία εξαίρεση, να ανεβαίνουν 2 τεχνικοί συντήρησης ή και περισσότεροι, αλλά ποτέ ένας μόνος του.

Σε κάθε περίπτωση που μια ανεμογεννήτρια σταματάει να λειτουργεί, οι τεχνικοί όταν βρίσκονται ή όταν καλούνται να πάνε στο πάρκο θα πρέπει να ελέγχουν την κατάσταση, να εντοπίζουν την αιτία του προβλήματος και να επαναφέρουν την ανεμογεννήτρια σε λειτουργία σε σύντομο χρονικό διάστημα. Σε διαφορετική περίπτωση, οι ζημιές τόσο για τον ιδιοκτήτη του πάρκου όσο και για την εταιρία συντήρησης είναι μεγάλες.

4.3.3 Διαδικασία συλλογής και αποθήκευσης δεδομένων

Η καθημερινή λειτουργία ενός αιολικού πάρκου παρακολουθείται και ελέγχεται με τη χρήση ενός συστήματος εποπτικού ελέγχου και συλλογής δεδομένων (SCADA). Το σύστημα αυτό διασυνδέει όλα τα συστατικά μέρη (δηλ. ανεμογεννήτριες, μετεωρολογικούς σταθμούς και υποσταθμούς) του αιολικού πάρκου σε έναν κεντρικό υπολογιστή, που παρέχει τη δυνατότητα στο χειριστή να παρακολουθεί και να ελέγχει τη λειτουργία του αιολικού πάρκου. Το σύστημα παρέχει και αποθηκεύει πληροφορίες σχετικές με τη λειτουργία του αιολικού πάρκου, και έτσι μπορούν να εντοπιστούν αστοχίες ή προβλήματα λειτουργίας συγκεκριμένων ανεμογεννητριών. Αναλυτικότερα, το SCADA καταγράφει πληροφορίες για την κατεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου, την παραγόμενη ηλεκτρική ενέργεια, τον αριθμό των ωρών λειτουργίας μιας ανεμογεννήτριας, την παραγωγική της ικανότητα, τον χρόνο μεταξύ των παρατηρούμενων βλαβών και τον χρόνο επιδιόρθωσής τους. Οι υπολογιστές που συλλέγουν και αποθηκεύουν τα δεδομένα βρίσκονται στον υποσταθμό κάθε αιολικού πάρκου και τα αρχεία είναι διαθέσιμα ανά πάσα στιγμή για τους υπεύθυνους του πάρκου.

4.4 Περιγραφή του Προβλήματος και των Δεδομένων

Η εταιρία Α, εξαιτίας του έντονου ανταγωνισμού που υπάρχει στον κλάδο που δραστηριοποιείται, επιθυμεί να αξιολογήσει τις υπηρεσίες που προσφέρει στους πελάτες της με σκοπό να βελτιώσει όσο το δυνατόν περισσότερο την ποιότητά τους. Η συνεχής παρακολούθηση της ποιότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών με την εισαγωγή μεθόδων Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών, εκτιμάται ότι θα εντοπίσει πιθανά προβλήματα λειτουργίας και θα βελτιώσει σημαντικά την υπάρχουσα κατάσταση της εταιρίας.

Για να καταστεί κάτι τέτοιο δυνατό, προηγήθηκαν πολλές συζητήσεις με τα αρμόδια στελέχη της επιχείρησης, ώστε να γίνουν κατανοητά τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της διαδικασίας συντήρησης και να αποφασιστούν από κοινού οι πιθανοί τρόποι ελέγχου και βελτίωσης της ποιότητας στις υπηρεσίες συντήρησης που προσφέρει. Όπως προαναφέρθηκε, η συντήρηση ενός αιολικού πάρκου είναι πολύπλοκη και έχει πολλές ιδιομορφίες, επομένως η παρακολούθηση των κατάλληλων παραμέτρων που αντανακλούν την ποιότητα των προσφερόμενων υπηρεσιών, αποτελεί πρωτεύον ζήτημα.

4.4.1 Επιλογή της κατάλληλης μεταβλητής

Η προληπτική συντήρηση, πραγματοποιείται σύμφωνα με συγκεκριμένα χρονοδιαγράμματα και περιλαμβάνει συγκεκριμένες εργασίες ρουτίνας. Επίσης, αυτού του είδους οι συντηρήσεις ελέγχονται ήδη από εξειδικευμένους επόπτες με απλό τρόπο, μέσω ειδικά διαμορφωμένων τεστ ποιότητας (*Quality Tests*). Επομένως, θα ήταν μάλλον άσκοπο να ελεγχθούν και μέσω διαγραμμάτων ελέγχου, πρώτον γιατί ο απαραίτητος έλεγχος γίνεται ήδη και δεύτερον γιατί από αυτή τη διαδικασία είναι δύσκολο να ποσοτικοποιηθούν κάποιες παράμετροι που αντανακλούν την ποιότητα των υπηρεσιών.

Από την άλλη, οι επιδιορθώσεις βλαβών στις ανεμογεννήτριες θα μπορούσαν να αποτελέσουν σαφή ένδειξη για το κατά πόσο η εταιρία Α μπορεί να ανταποκριθεί ικανοποιητικά στις υψηλές απαιτήσεις των πελατών της. Άλλωστε, όλες οι επιχειρήσεις αυτού του κλάδου διαφημίζουν την διαθεσιμότητά τους 24 ώρες το 24ωρο, 365 μέρες το χρόνο και την άμεση ανταπόκρισή τους σε πιθανές κλήσεις για επισκευή τεχνικών προβλημάτων. Επομένως, η παρακολούθηση και η βελτίωση του χρόνου απόκρισης (*response time*) των τεχνικών συντήρησης σε κάποιο πιθανό κάλεσμα για επισκευή βλαβών θα μπορούσε να αποτελέσει σημαντική διαφοροποίηση της εταιρίας Α από τις υπόλοιπες του κλάδου. Όμως, όπως περιγράφηκε στην προηγούμενη ενότητα, οι τεχνικοί συντήρησης που εργάζονται στην εν λόγω εταιρία όταν καλούνται να προσέλθουν στο πάρκο για να επαναφέρουν σε λειτουργία κάποια ανεμογεννήτρια που έχει σταματήσει να λειτουργεί, θα πρέπει να καταφθάνουν στον τόπο που τους ορίζεται εντός 2 ωρών. Αυτό, όπως οι ίδιοι οι υπεύθυνοι του τμήματος συντήρησης της εταιρίας υπέδειξαν, ακολουθείται σχεδόν πάντα με πολύ σπάνιες εξαιρέσεις οι οποίες επιδρούν αρνητικά στον ίδιο τον τεχνικό συντήρησης που καθυστέρησε να παρουσιαστεί. Σύμφωνα με όσα προαναφέρθηκαν, αποφασίστηκε από

κοινού ότι η μεταβλητή «χρόνος απόκρισης» δεν εξυπηρετεί τους σκοπούς της παρούσας μελέτης.

Δεδομένου ότι ο χρόνος απόκρισης κρίθηκε ως ακατάλληλη μεταβλητή για να χρησιμοποιηθεί στην κατασκευή των διαγραμμάτων ελέγχου, η επόμενη σκέψη ήταν να ελεγχθεί ο χρόνος που χρειάζεται για να επιδιορθωθεί μια βλάβη σε μια ανεμογεννήτρια. Ο χρόνος που χρειάζεται για να επιδιορθωθεί ένα τεχνικό πρόβλημα σε μια ανεμογεννήτρια που έχει σταματήσει να λειτουργεί εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, όπως για παράδειγμα το είδος και η σοβαρότητα της βλάβης, η εμπειρία και η ικανότητα του τεχνικού που καλείται να την επισκευάσει, η χρονική στιγμή που παρουσιάζεται η βλάβη, οι καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή κ.α. Οι πληροφορίες για τον ακριβή χρόνο που μια ανεμογεννήτρια σταματά να λειτουργεί, τον ακριβή χρόνο που επανέρχεται σε λειτουργία, τον κωδικό της βλάβης που παρουσιάστηκε και τον αριθμό της ανεμογεννήτριας που εμφάνισε το πρόβλημα, συλλέγονται και αποθηκεύονται από το σύστημα SCADA που υπάρχει στον υποσταθμό κάθε αιολικού πάρκου και είναι διαθέσιμες ανά πάσα στιγμή για όποιον θελήσει να τις επεξεργαστεί. Επίσης, κανένας έλεγχος και καμία ανάλυση αυτών των δεδομένων δεν γίνεται μέχρι σήμερα από την εταιρία Α. Επομένως, κοινή απόφαση όλων ήταν ότι η μεταβλητή που περιγράφει τον χρόνο επιδιόρθωσης μιας βλάβης πληρεί όλες τις απαραίτητες προϋποθέσεις, ώστε να μπορεί να ελεγχθεί και ταυτόχρονα να αποτυπώσει τις πραγματικές διαστάσεις της ποιότητας των προσφερόμενων υπηρεσιών.

4.4.2 Επιλογή των δεδομένων

Αφού επιλέχθηκε η μεταβλητή που θα παρακολουθηθεί, το επόμενο βήμα είναι η επιλογή των δεδομένων και ο κατάλληλος διαχωρισμός τους, ώστε να μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή των διαγραμμάτων ελέγχου.

Κάθε αιολικό πάρκο, που συντηρεί η εταιρία Α, έχει διαφορετικά χαρακτηριστικά ως προς τις συνθήκες της περιοχής όπου είναι εγκατεστημένο (υψόμετρο, ταχύτητες ανέμου, ευκολία πρόσβασης κτλ) και ως προς το προσωπικό που εργάζεται μόνιμα στο πάρκο (αριθμός εργαζομένων, εμπειρία, ικανότητα κ.α.). Επομένως, η ταυτόχρονη παρακολούθηση του χρόνου επισκευής βλαβών σε όλα τα αιολικά πάρκα της εταιρίας θα οδηγούσε σε λανθασμένα συμπεράσματα. Από την άλλη, η ανάλυση των δεδομένων για καθένα από τα 7 πάρκα που συντηρεί η εταιρία Α θα ξέφευγε από την έκταση και τον σκοπό της παρούσας εργασίας. Για

όλους αυτούς τους λόγους, αποφασίστηκε και επιλέχθηκε να μελετηθεί ένα από τα πρώτα αιολικά πάρκα που η εταιρία A ανέλαβε την λειτουργία και συντήρησή του στην Ελλάδα.

Το αιολικό πάρκο που θα μελετηθεί στην συνέχεια, είναι εγκατεστημένο στην ηπειρωτική Ελλάδα και βρίσκεται σε υψόμετρο 1.800 μέτρων. Τους περισσότερους μήνες του χρόνου επικρατούν ακραία καιρικά φαινόμενα όπως έντονες χιονοπτώσεις και ισχυροί άνεμοι, και αρκετά συχνά η πρόσβαση είναι αδύνατη. Στο συγκεκριμένο αιολικό πάρκο λειτουργούν 16 ανεμογεννήτριες συνολικής ισχύος 13.5 MW και για την λειτουργία και συντήρησή του εργάζονται καθημερινά με πλήρες ωράριο 2 τεχνικοί συντήρησης. Τα Σαββατοκύριακα που οι εργαζόμενοι δεν βρίσκονται στο πάρκο, είναι σε επιφυλακή, ώστε σε περίπτωση τεχνικού προβλήματος και αφού ειδοποιηθούν, να είναι σε θέση να προσέλθουν στον πάρκο εντός των προβλεπόμενων 2 ωρών.

Μια επίσης σημαντική απόφαση που έπρεπε να συζητηθεί ήταν η επιλογή των βλαβών που θα μελετηθούν. Οι ανεμογεννήτριες, εξαιτίας της πολυπλοκότητάς τους και του πλήθους παραγόντων που επιδρούν στην λειτουργία τους, μπορεί να παρουσιάσουν έναν μεγάλο αριθμό διαφορετικού είδους βλαβών. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τα στοιχεία που συγκεντρώθηκαν από το εν λόγω πάρκο και το σύστημα SCADA, οι ανεμογεννήτριες το χρονικό διάστημα που μελετάται παρουσίασαν περίπου 300 διαφορετικά σφάλματα. Το κάθε σφάλμα επιδρά διαφορετικά στην λειτουργία της μηχανικής, επιφέρει διαφορετικές συνέπειες και απαιτεί διαφορετικό χρόνο για να επισκευαστεί. Στο σημείο αυτό, η συνεισφορά και η βοήθεια των υπεύθυνων της εταιρίας A ήταν καθοριστική για την τελική επιλογή των κατάλληλων βλαβών που θα μελετηθούν. Αποφασίστηκε να ελεγχθούν και να παρακολουθηθούν 3 βλάβες διαφορετικής σοβαρότητας η καθεμία. Συγκεκριμένα, επιλέχθηκε μια βλάβη που είναι απλή στην επισκευή της, και παρόλο που χρειάζεται η παρέμβαση των τεχνικών, συνήθως δεν απαιτεί πολύ χρόνο για να επιδιορθωθεί. Επίσης, επιλέχθηκε να μελετηθεί μια ακόμη βλάβη μέτριας σημασίας, που επίσης απαιτεί την άμεση παρέμβαση των τεχνικών συντήρησης και χρειάζεται περισσότερο χρόνο να επιδιορθωθεί. Τέλος, κρίθηκε σκόπιμο να μελετηθεί μια πολύ σοβαρή βλάβη που μπορεί να παρουσιάσουν οι ανεμογεννήτριες, η οποία είναι πολύπλοκη και ιδιαίτερα χρονοβόρα στην επισκευή της. Με τον τρόπο αυτό, θεωρήθηκε ότι η μελέτη θα είναι περισσότερο πλήρης και τα τελικά αποτελέσματα θα αντικατοπτρίζουν ουσιαστικότερα την πραγματική κατάσταση της εταιρίας.

4.4.3 Παρουσίαση των δεδομένων

Η εταιρία Α ανέλαβε την λειτουργία και την συντήρηση του αιολικού πάρκου που μελετάται τον Ιανουάριο του 2011 και μέχρι σήμερα συνεχίζει να παρέχει τις υπηρεσίες της στο πάρκο αυτό. Τα δεδομένα που συλλέχθηκαν καλύπτουν τις περιόδους από τον Ιανουάριο του 2011 (01/01/2011) έως και τον Δεκέμβριο του 2012 (31/12/2012), και την περίοδο από τον Ιούλιο του 2013 (01/07/2013) έως και τον Φεβρουάριο του 2014 (28/02/2014). Αυτό το χρονικό «κενό» που υπάρχει στα διαθέσιμα δεδομένα, βοήθησε στον διαχωρισμό αυτών που θα χρησιμοποιηθούν στην Φάση I και την Φάση II της ανάλυσης. Συγκεκριμένα, για την Φάση I χρησιμοποιήθηκαν τα δεδομένα δύο ολόκληρων ετών, από 01/01/2011 έως και 31/12/2012, ενώ η Φάση II περιλαμβάνει τα δεδομένα της περιόδου από 01/07/2013 έως και 28/02/2014.

Τα αρχικά δεδομένα είναι σε μορφή excel και ένα δείγμα αυτών παρουσιάζεται στη συνέχεια :

S/N	Wind turbine	Alarm	Date ON	Date OFF	Delta Time
547992	3	102 CW feedback failure	16/10/2013 16:21	16/10/2013 16:26	00:04:59
560131	11	104 Auto yawing time exceeded	29/10/2013 10:37	29/10/2013 11:22	00:45:12

Η πρώτη στήλη περιλαμβάνει τον αύξοντα αριθμό της βλάβης, η δεύτερη στήλη τον αριθμό της ανεμογεννήτριας που παρουσίασε πρόβλημα στη λειτουργία της, η τρίτη στήλη τον κωδικό και την περιγραφή του σφάλματος, η τέταρτη στήλη την ακριβή ημερομηνία και ώρα που παρουσιάστηκε η βλάβη και η ανεμογεννήτρια σταμάτησε να λειτουργεί, η πέμπτη στήλη την ακριβή ημερομηνία και ώρα που η βλάβη επιδιορθώθηκε και η ανεμογεννήτρια τέθηκε ξανά σε λειτουργία και η τελευταία στήλη περιλαμβάνει την συνολική ώρα που η ανεμογεννήτρια έμεινε εκτός λειτουργίας.

Για τους σκοπούς τις παρούσας μελέτης δημιουργήθηκε μια ακόμη στήλη στα αρχικά δεδομένα, η οποία περιλαμβάνει τον συνολικό χρόνο που μια ανεμογεννήτρια έμεινε εκτός λειτουργίας (*Delta Time*) μεταφρασμένο σε δευτερόλεπτα. Για τον μετασχηματισμό του χρόνου σε δευτερόλεπτα χρησιμοποιήθηκε το πρόγραμμα Microsoft Excel και συγκεκριμένα η συνάρτηση :

$DAY(DeltaTime)*86400+HOUR(DeltaTime)*3600+MINUTE(DeltaTime)*60+SECOND(DeltaTime)$

Η νέα μεταβλητή ονομάστηκε «*Total Time*» και θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια για την κατασκευή των διαγραμμάτων ελέγχου.

4.5 Εφαρμογή Διαγραμμάτων Ελέγχου

Αφού επιλέχθηκε η μεταβλητή που θα απεικονιστεί στα διαγράμματα ελέγχου και υπολογίστηκαν οι τιμές της, μπορεί να γίνει εφαρμογή των εργαλείων του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών στα διαθέσιμα δεδομένα. Στην ενότητα αυτή παρουσιάζεται ο τρόπος ανάλυσης και απεικόνισης των δεδομένων στα κατάλληλα διαγράμματα ελέγχου, ξεχωριστά για καθεμία από τις τρεις βλάβες που επιλέχθηκαν ως αντιπροσωπευτικό δείγμα, με σκοπό να ελεγχθεί η ποιότητα των υπηρεσιών που προσφέρει η εταιρία Α στους πελάτες της.

Η μεταβλητή που θα χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή των διαγραμμάτων ελέγχου είναι η «*Total Time*», η οποία είναι μια συνεχής μεταβλητή και περιγράφει τον συνολικό χρόνο σε δευτερόλεπτα που χρειάζεται η ομάδα των τεχνικών συντήρησης για να επισκευάσει μια από τις τρεις βλάβες όταν εμφανιστεί σε κάποια ανεμογεννήτρια. Δεδομένου ότι η μεταβλητή «*Total Time*» είναι συνεχής και αποτελείται από μεμονωμένες παρατηρήσεις, τα διαγράμματα ελέγχου *Shewhart I-MR* είναι τα πλέον κατάλληλα για την παρακολούθηση των διεργασιών. Υπενθυμίζεται ότι το διάγραμμα ελέγχου *I-MR* περιλαμβάνει ένα διάγραμμα παρακολούθησης της διασποράς (*MR-chart*) και ένα διάγραμμα ελέγχου του μέσου της διεργασίας (*I-chart*).

4.5.1 Βλάβη 104

Η πρώτη βλάβη που θα μελετηθεί, αφορά σε ένα απλό τεχνικό πρόβλημα που συχνά παρουσιάζουν οι ανεμογεννήτριες και συνήθως αντιμετωπίζεται εύκολα και γρήγορα από τους εξειδικευμένους τεχνικούς συντήρησης. Συγκεκριμένα, αυτό το τεχνικό πρόβλημα παρουσιάζεται στον ανεμοδείκτη που κάθε ανεμογεννήτρια έχει στην κορυφή της και δείχνει την κατεύθυνση του ανέμου, ώστε να δίνει εντολή στη μηχανή και να περιστρέφεται προς εκείνη την κατεύθυνση για να παράγει τη μέγιστη δυνατή ισχύ. Όταν εμφανίζεται η βλάβη 104 σημαίνει ότι ο ανεμοδείκτης έχει κάποιο πρόβλημα και δεν λειτουργεί σωστά. Αυτό οφείλεται συνήθως σε κάποιο εξάρτημα του ανεμοδείκτη που έχει χαλάσει και πρέπει να αντικατασταθεί ή στο ηλεκτρολογικό σύστημα που συνδέει τον ανεμοδείκτη με την ανεμογεννήτρια και της δίνει τις εντολές αλλαγής κατεύθυνσης.

Όταν για την βλάβη 104 ευθύνεται το σύστημα διασύνδεσης, οι τεχνικοί συντήρησης καλούνται απλώς να το επαναφέρουν από τον υπολογιστή του υποσταθμού. Στην περίπτωση που οι τεχνικοί συντήρησης εκείνη τη στιγμή βρίσκονται στον υποσταθμό, η διαδικασία

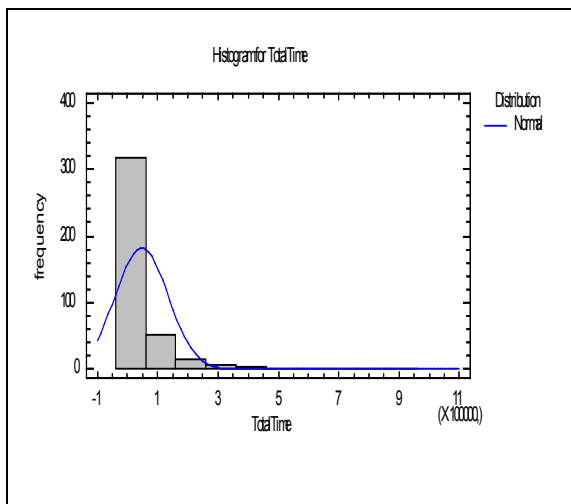
επαναφοράς απαιτεί λίγα δευτερόλεπτα. Από την άλλη, αν αυτό συμβεί εκτός του ωραρίου τους, η επιδιόρθωση θα χρειαστεί περισσότερο χρόνο καθώς θα πρέπει πρώτα να μεταβούν στον υποσταθμό του πάρκου.

Όταν για την βλάβη 104 ευθύνεται ο ανεμοδείκτης ή κάποιο εξάρτημά του, τότε η επιδιόρθωση είναι πολύ πιο χρονοβόρα. Οι τεχνικοί συντήρησης θα πρέπει να ανέβουν στην κορυφή της ανεμογεννήτριας και να βγουν εξωτερικά του θαλάμου ώστε να έχουν άμεση επαφή με τον ανεμοδείκτη. Σε περίπτωση που κάποιο εξάρτημα χρειαστεί αλλαγή, αυτόματα οι τεχνικοί θα πρέπει να κατέβουν, να πάρουν το εξάρτημα είτε από το πάρκο, εάν υπάρχει, είτε να το παραγγείλουν και στη συνέχεια να ξανανέβουν στην κορυφή της για να το αντικαταστήσουν. Όπως είναι φανερό, αυτή η διαδικασία μπορεί να χρειαστεί από κάποιες ώρες μέχρι και κάποιες ημέρες για να ολοκληρωθεί. Πολύ συχνά αυτό εξαρτάται και από τις καιρικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή, καθώς οι τεχνικοί απαγορεύεται να βγουν εξωτερικά μιας ανεμογεννήτριας όταν στο σημείο επικρατούν ακραία καιρικά φαινόμενα. Σε κάθε περίπτωση πάντως, απαιτείται η άμεση παρέμβαση των τεχνικών συντήρησης για να επιδιορθωθεί η συγκεκριμένη βλάβη.

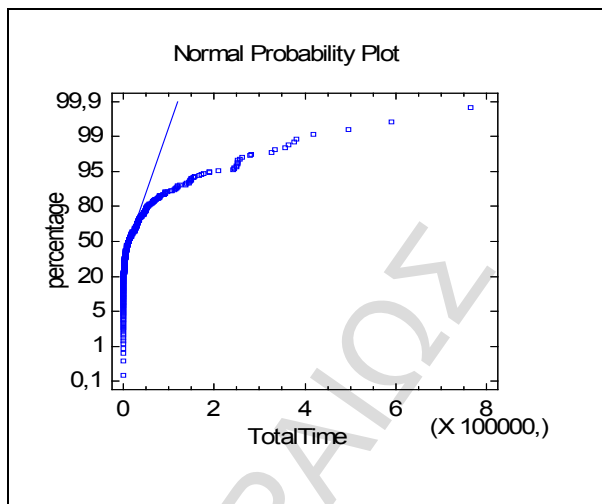
Μελέτη Φάσης I

Στο σημείο αυτό και με τη χρήση των ιστορικών δεδομένων της περιόδου από 01/01/2011 έως και 31/12/2012 θα γίνει η μελέτη Φάσης I, όπου θα εκτιμηθούν οι βασικές παράμετροι της διεργασίας. Την χρονική περίοδο που περιλαμβάνει η Φάση I, η βλάβη 104 εμφανίστηκε συνολικά 399 φορές και ο μέσος χρόνος επιδιόρθωσής της ήταν 46.927 δευτερόλεπτα. Επίσης, ο λιγότερος χρόνος που χρειάστηκε για να επιδιορθωθεί η βλάβη αυτή ήταν 10 δευτερόλεπτα, ενώ αντίθετα ο περισσότερος χρόνος ήταν 765.312 δευτερόλεπτα. Οι τιμές της βλάβης 104 που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση Φάσης I της εφαρμογής παρατίθενται στο Παράρτημα Π1 της παρούσας εργασίας.

Αρχικά, με τη βοήθεια του στατιστικού πακέτου Statgraphics Centurion, τα δεδομένα ελέγχθηκαν ως προς την κανονικότητά τους. Ο οπτικός έλεγχος μέσω του ιστογράμματος (Σχήμα 4.1) και του διαγράμματος πιθανότητας (Σχήμα 4.2) έδειξε ότι τα δεδομένα δεν προσεγγίζονται ικανοποιητικά από την κανονική κατανομή. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε το *p-value* του στατιστικού ελέγχου Kolmogorov-Smirnov και βρέθηκε μικρότερο του 0.05, κάτι που επιβεβαίωσε την μη κανονικότητα των δεδομένων.



Σχήμα 4.1: Ιστόγραμμα μεταβλητής TotalTime



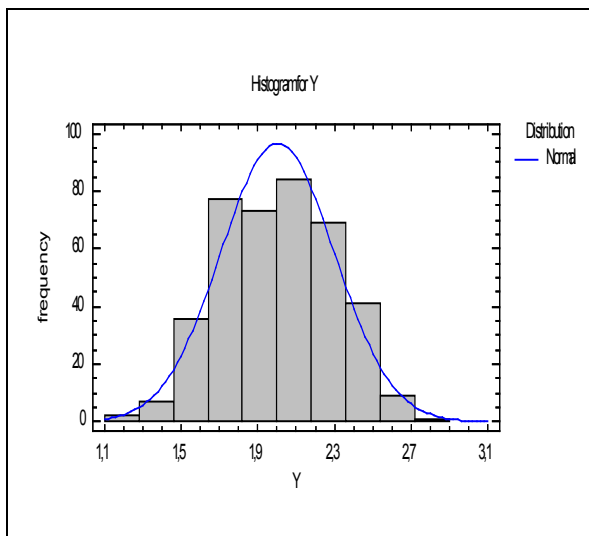
Σχήμα 4.2: Διάγραμμα Πιθανότητας μεταβλητής TotalTime

Επομένως, ο μετασχηματισμός των δεδομένων, με σκοπό να προσεγγίζονται από την κανονική κατανομή, είναι απαραίτητος πριν αυτά χρησιμοποιηθούν στην κατασκευή των διαγραμμάτων ελέγχου. Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της μη κανονικότητας των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ο μετασχηματισμός δύναμης των Box-Cox (*Power Transformations*) και οι τιμές της νέας μεταβλητής Y υπολογίστηκαν σύμφωνα με τον τύπο :

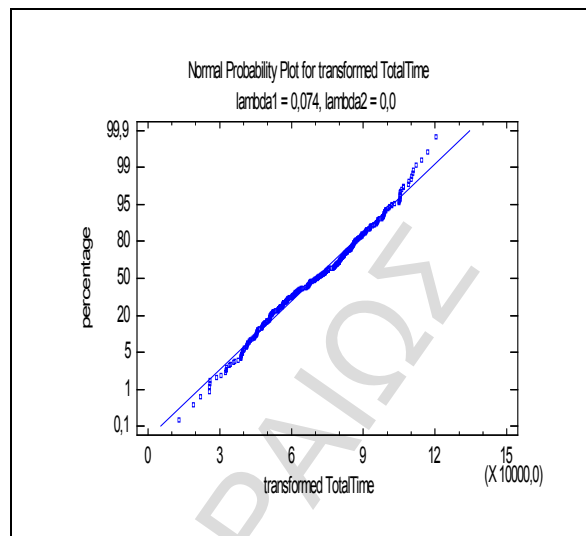
$$Y = 1 + \frac{x^\lambda - 1}{\lambda(GM(x))^{\lambda-1}}, \quad \text{για } \lambda \neq 0,$$

όπου λ είναι η παράμετρος δύναμης που ελαχιστοποιεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE) και GM είναι ο γεωμετρικός μέσος των αρχικών παρατηρήσεων. Με τη βοήθεια του στατιστικού πακέτου *Statgraphics* υπολογίστηκε το λ που ελαχιστοποιεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα ($\lambda=0.074$) και στη συνέχεια υπολογίστηκαν και αποθηκεύτηκαν οι τιμές της μεταβλητής Y .

Στα Σχήματα 4.3 και 4.4 παρουσιάζονται το ιστόγραμμα και το διάγραμμα πιθανότητας αντίστοιχα, για τις τιμές της μετασχηματισμένης μεταβλητής Y . Ο οπτικός έλεγχος δείχνει ότι τα δεδομένα προσεγγίζονται από την κανονική κατανομή κάτι που επιβεβαιώνει ο στατιστικός έλεγχος Kolmogorov-Smirnov. Το p -value του ελέγχου υπολογίστηκε ίσο με 0,17 και άρα η υπόθεση της κανονικότητας των δεδομένων δεν απορρίπτεται.



Σχήμα 4.3: Ιστόγραμμα μεταβλητής Y



Σχήμα 4.4 : Διάγραμμα Πιθανότητας μεταβλητής Y

Εκτός από την κανονικότητα των δεδομένων είναι εξίσου σημαντικό να ελεγχθεί η ύπαρξη ανεξαρτησίας στα δεδομένα. Εάν αποδειχθεί ότι υπάρχει αυτοσυσχέτιση μεταξύ των παρατηρήσεων, τότε η χρήση των κλασικών διαγραμμάτων ελέγχου *Shewhart* για μεμονωμένες παρατηρήσεις *I-MR* δεν ενδείκνυται για τον έλεγχο της διεργασίας και θα πρέπει να βρεθούν εναλλακτικοί τρόποι παρακολούθησής της. Η ύπαρξη αυτοσυσχέτισης μεταξύ των παρατηρήσεων της μεταβλητής «*Total Time*» ελέγχθηκε με το τεστ των ροών (*Runs Test*) και τα αποτελέσματα του ελέγχου φαίνονται στο πλαίσιο που ακολουθεί.

Runs Test: TotalTime

Runs test for TotalTime

Runs above and below K = 46927,3

The observed number of runs = 85

The expected number of runs = 152,850

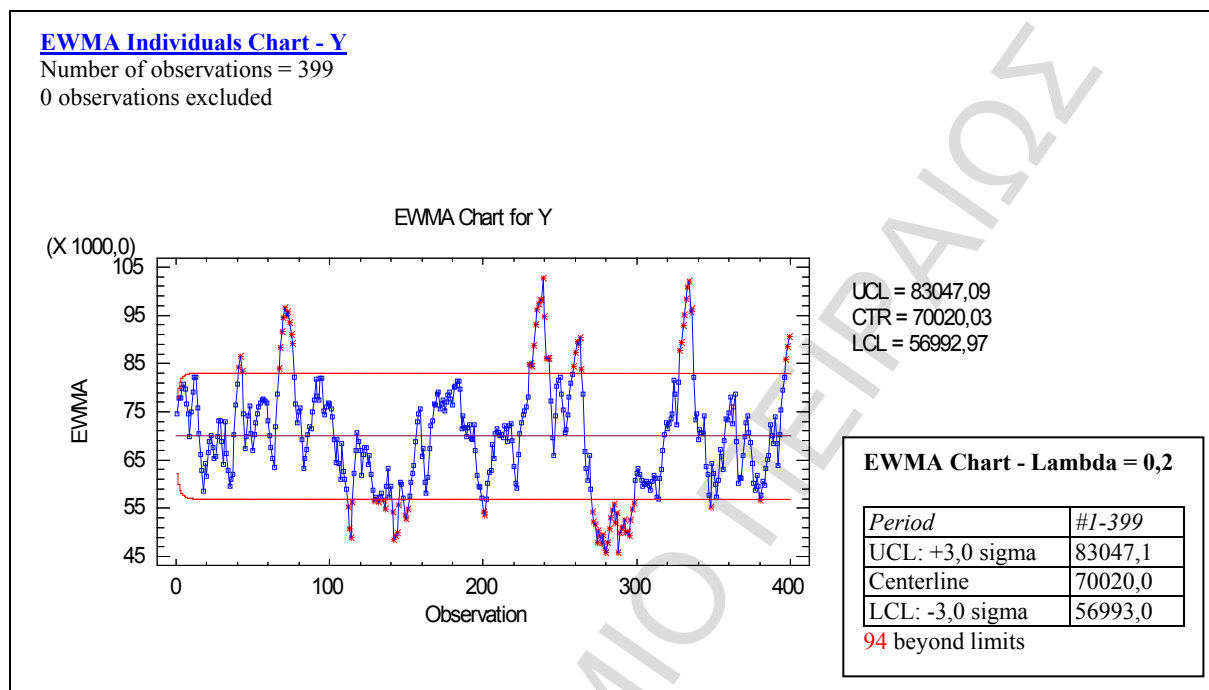
102 observations above K; 297 below

P-value = 0,000

Το *p-value* του ελέγχου βρέθηκε να είναι μικρότερο του 0.05, κάτι που δείχνει την ύπαρξη αυτοσυσχέτισης μεταξύ των παρατηρήσεων της μεταβλητής «*Total Time*». Σε αυτή την περίπτωση τα διαγράμματα ελέγχου *Shewhart I-MR* δεν είναι κατάλληλα για τον έλεγχο της διεργασίας, καθώς είναι ιδιαίτερα ευαίσθητα στην παραβίαση της υπόθεσης της ανεξαρτησίας των δεδομένων.

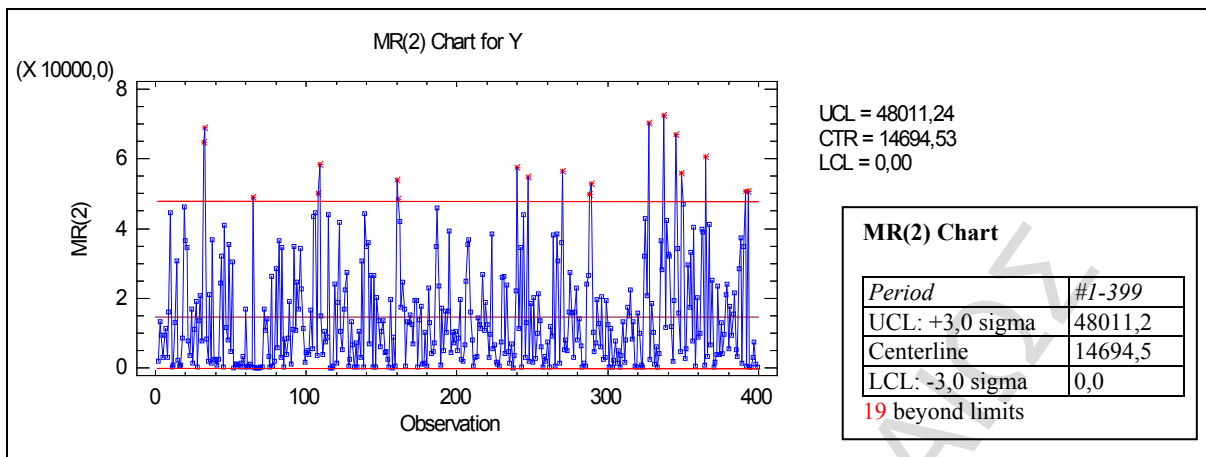
Ένα διάγραμμα που είναι λιγότερο ευαίσθητο στην παραβίαση αυτής της υπόθεσης είναι το *EWMA* διάγραμμα ελέγχου (*Exponentially Weighted Moving Average control chart*). Στη

συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα ελέγχου *EWMA* όπου απεικονίζονται οι τιμές της μετασχηματισμένης μεταβλητής *Y* για την περίοδο από 01/01/2011 έως και 31/12/2012 (Φάση Ι).



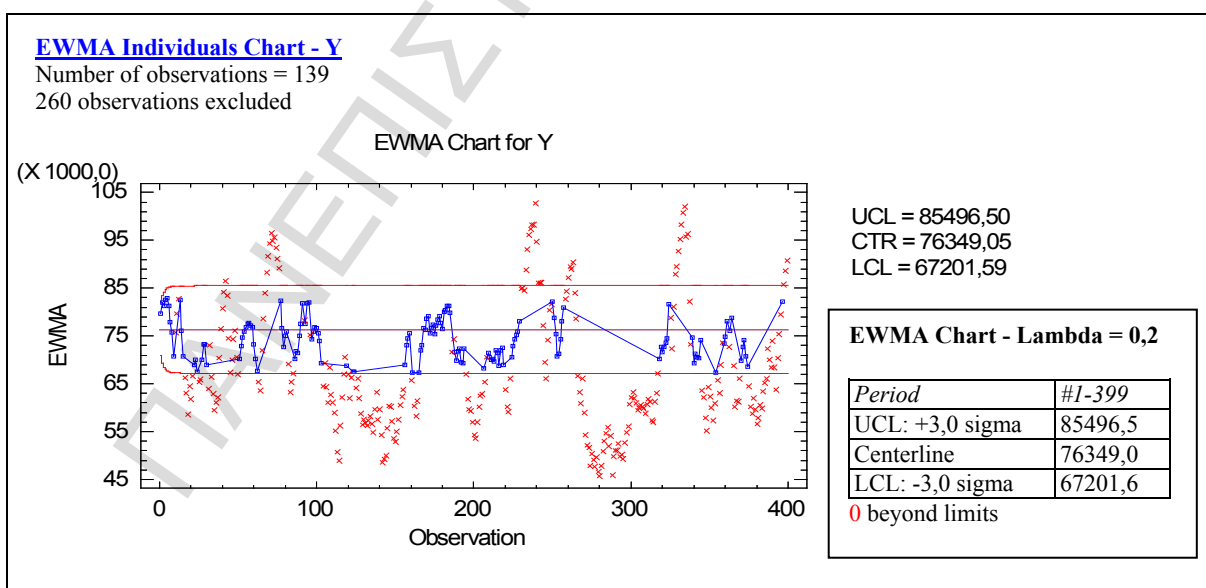
Το +3σ άνω όριο ελέγχου του διαγράμματος είναι ίσο με 83047.09, η κεντρική γραμμή του διαγράμματος ελέγχου είναι ίση με 70020.03, ενώ το -3σ κάτω όριο ελέγχου βρέθηκε ίσο με 56992.97. Συνολικά 94 σημεία εντοπίστηκαν εκτός των ορίων ελέγχου, τα οποία στη συνέχεια θα πρέπει να αφαιρεθούν ώστε η διεργασία να σταθεροποιηθεί εντός των ορίων και οι εντός ελέγχου παράμετροί της να μπορούν να χρησιμοποιηθούν μετέπειτα για την συνεχή παρακολούθησή της (Φάση ΙΙ).

Παράλληλα με την παρακολούθηση του μέσου μιας διεργασίας θα πρέπει να παρακολουθείται και η διασπορά της. Στην περίπτωση των μεμονωμένων παρατηρήσεων αυτό γίνεται με το κλασικό διάγραμμα *Shewhart* κινούμενου μέσου (*Moving Range chart-MR*), καθώς δεν υπάρχει κάποιο διάγραμμα παρακολούθησης της διασποράς με μνήμη όπως είναι το *EWMA* για τον μέσο. Στο επόμενο πλαίσιο παρουσιάζεται το *MR* διάγραμμα ελέγχου της μεταβλητής *Y* με τις 399 τιμές που περιλαμβάνονται στην Φάση Ι της μελέτης.



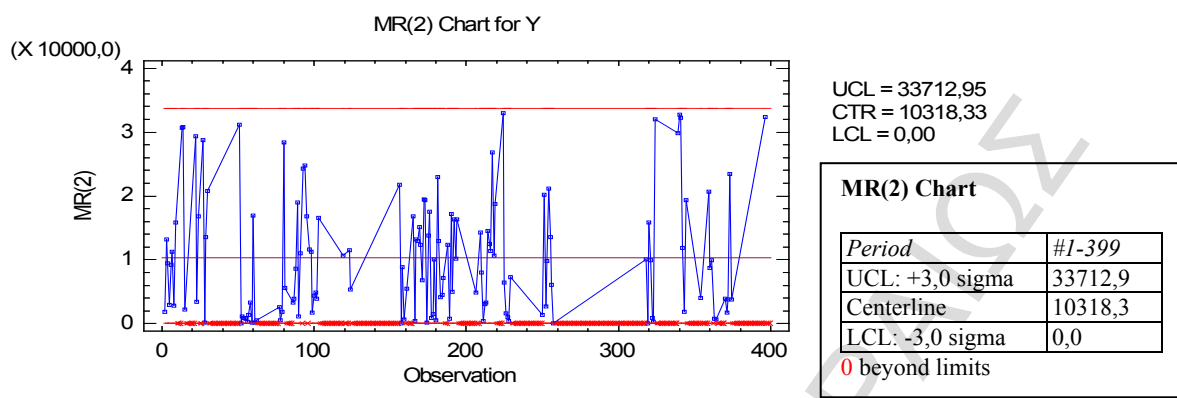
Το $+3\sigma$ άνω όριο ελέγχου του διαγράμματος είναι ίσο με 48011,24, η κεντρική γραμμή του διαγράμματος ελέγχου είναι ίση με 14694,53, ενώ το -3σ κάτω όριο ελέγχου είναι ίσο με 0. Συνολικά 19 σημεία εντοπίστηκαν εκτός των ορίων ελέγχου, τα οποία θα πρέπει να αφαιρεθούν ώστε η διακύμανση της διεργασίας να σταθεροποιηθεί εντός των ορίων ελέγχου και η εκτίμησή της να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό των ορίων του *EWMA* διαγράμματος.

Αρχικά, αφαιρέθηκαν από το *MR* διάγραμμα όλα τα σημεία που βρέθηκαν εκτός των ορίων και όταν η διακύμανση σταθεροποιήθηκε, έγινε το ίδιο με τα εκτός ορίων σημεία του *EWMA* διαγράμματος. Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα δύο διαγράμματα ελέγχου μετά την αφαίρεση των σημείων.



EWMA Individuals Chart - Y

Number of observations = 139
260 observations excluded



Για να σταθεροποιηθεί η διεργασία εντός των ορίων ελέγχου αφαιρέθηκαν 260 από τα συνολικά 399 σημεία, κάτι που φανερώνει πως ούτε το *EWMA* διάγραμμα ελέγχου είναι κατάλληλο για την παρακολούθηση της συγκεκριμένης διεργασίας.

Σε αυτή την περίπτωση, η έντονη αυτοσυσχέτιση που υπάρχει στα δεδομένα θα μπορούσε να περιγραφεί από το κατάλληλο μοντέλο *ARIMA* και στη συνέχεια τα κατάλοιπα του μοντέλου να απεικονιστούν σε ένα διάγραμμα ελέγχου, ώστε να ελεγχθεί η σταθερότητα της διεργασίας. Αυτή η μέθοδος χρησιμοποιείται συχνά όταν υπάρχει αυτοσυσχέτιση στα δεδομένα και έχει αποδειχθεί αποτελεσματική σε πολλές περιπτώσεις.

Με τη βοήθεια του στατιστικού πακέτου *Statgraphics Centurion* υπολογίστηκαν οι τιμές του κριτηρίου *Akaike* (*AIC*) για όλα τα μοντέλα *ARIMA* με $p=0,1,2,3,4$, $q=0,1,2,3,4$ και $d=0,1,2$. Η τιμή *AIC* υπολογίζεται από την τετραγωνική ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος (*RMSE-root mean squared error*) και το πλήθος των παραμέτρων που χρησιμοποιούνται στο μοντέλο. Το μοντέλο με το μικρότερο *AIC* είναι αυτό που ελαχιστοποιεί την ρίζα του μέσου τετραγωνικού σφάλματος και χρησιμοποιεί τις λιγότερες δυνατές παραμέτρους. Από την σύγκριση όλων των μοντέλων προέκυψε ότι το καλύτερο είναι το *ARIMA*(1,0,1) ή αλλιώς *ARMA*(1,1) καθώς, όπως φαίνεται και στον επόμενο πίνακα, έχει το μικρότερο *AIC*.

Model	AIC
ARIMA(1,0,1) with constant	19,6375
ARIMA(3,0,0) with constant	19,6388
ARIMA(1,0,2) with constant	19,6394
ARIMA(2,0,1) with constant	19,6402
ARIMA(2,0,0) with constant	19,6441

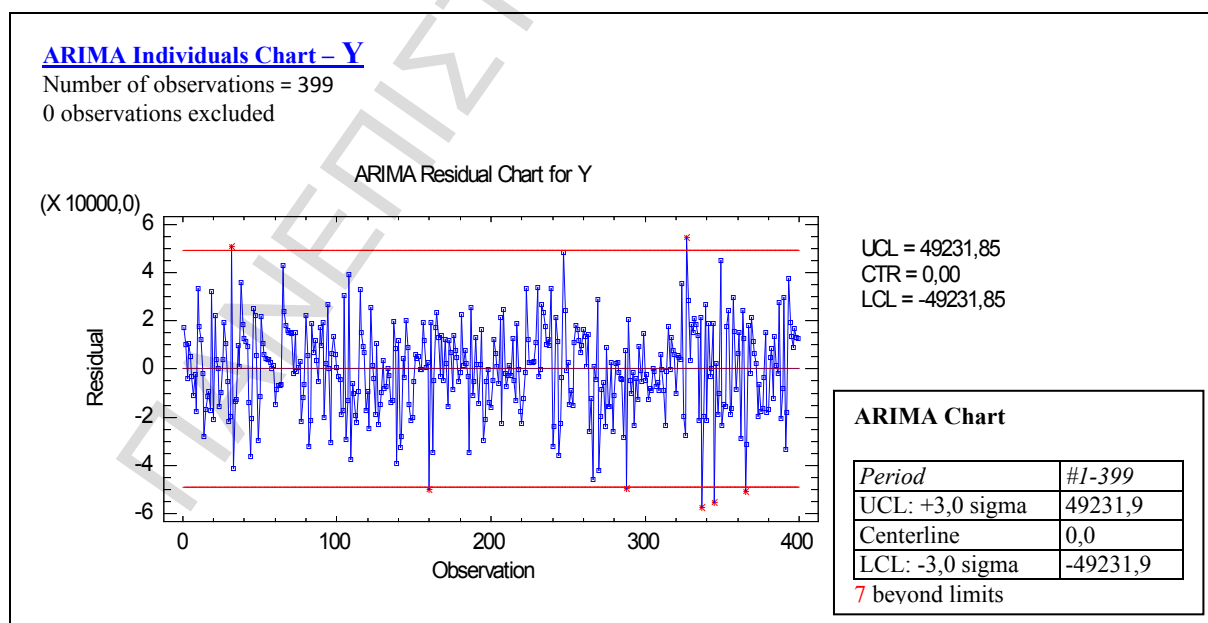
Οι παράμετροι του μοντέλου φαίνονται αναλυτικότερα στον πίνακα που ακολουθεί.

ARIMA Model Summary				
<i>Parameter</i>	<i>Estimate</i>	<i>Std. Error</i>	<i>t</i>	<i>P-value</i>
AR(1)	0,707692	0,0745678	9,4906	0,000000
MA(1)	0,318386	0,0982719	3,23985	0,001297
Mean	70238,9	2086,89	33,6572	0,000000
Constant	20531,4			

Backforecasting: yes
 Estimated white noise variance = 3,32805E8 with 396 degrees of freedom
 Estimated white noise standard deviation = 18243,0
 Number of iterations: 7

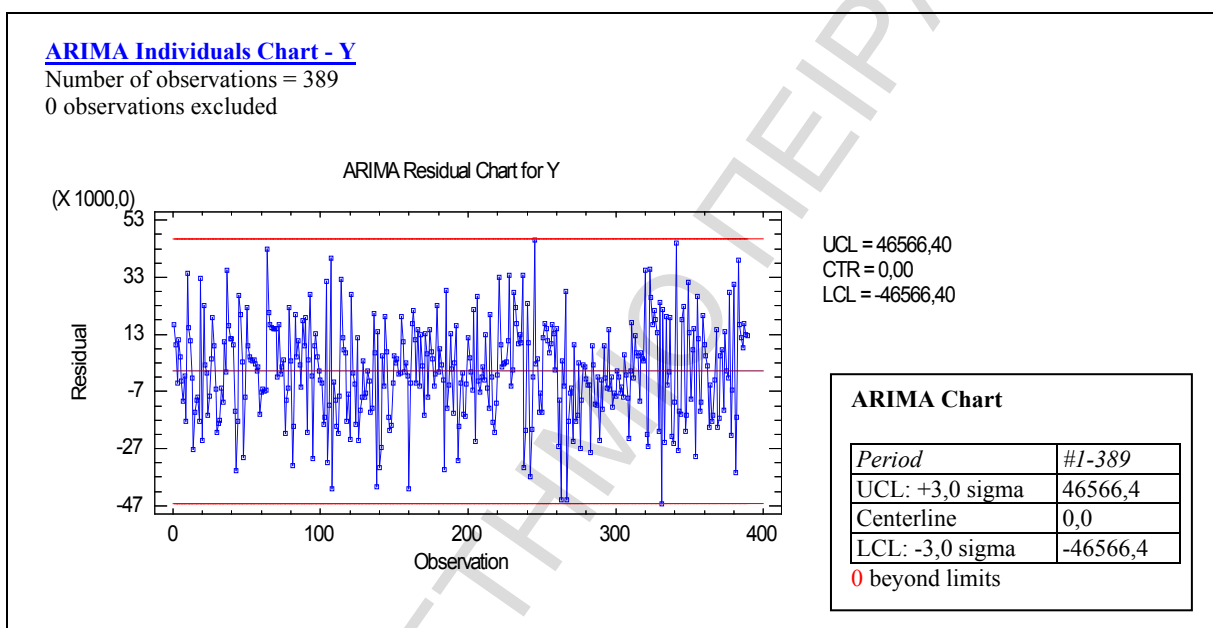
Από τα *p-values* των *t-tests*, τα οποία είναι μικρότερα του 0.05, προκύπτει επίσης ότι το αυτοπαλίνδρομο μέρος του μοντέλου (AR) τάξης 1 είναι στατιστικά σημαντικό και το μέρος του κινούμενου μέσου του μοντέλου (MA) τάξης 1 είναι επίσης στατιστικά σημαντικό, και άρα και τα δύο θα πρέπει να συμπεριληφθούν στο μοντέλο. Επίσης η εκτίμηση του μέσου του μοντέλου ισούται με 70238,9 και η εκτίμηση της τυπικής απόκλισης του λευκού θορύβου ισούται με 18243.

Αφού επιλέχθηκε το κατάλληλο μοντέλο για τα δεδομένα, κατασκευάζεται το διάγραμμα ελέγχου *ARIMA* για μεμονωμένες παρατηρήσεις, όπου απεικονίζονται τα κατάλοιπα του μοντέλου.



Τα $\pm 3\sigma$ όρια ελέγχου του διαγράμματος είναι ίσα με ± 49231.9 , ενώ η κεντρική γραμμή του διαγράμματος ελέγχου είναι ίση με 0. Συνολικά 7 σημεία εντοπίστηκαν εκτός των ορίων, τα οποία στη συνέχεια θα αφαιρεθούν ώστε η διεργασία να σταθεροποιηθεί εντός των ορίων και οι εντός ελέγχου παράμετροί της να μπορούν να χρησιμοποιηθούν μελλοντικά για την συνεχή παρακολούθησή της (Φάση II).

Μετά την αφαίρεση συνολικά 10 σημείων η διεργασία σταθεροποιήθηκε εντός των ορίων, ο μέσος και τα όρια ελέγχου της διεργασίας επαναυπολογίστηκαν και το διάγραμμα ελέγχου *ARIMA* πήρε τη μορφή που φαίνεται στο επόμενο πλαίσιο.



Τα $\pm 3\sigma$ όρια ελέγχου του διαγράμματος είναι ίσα με ± 46566.4 και η κεντρική γραμμή του διαγράμματος ελέγχου είναι ίση με 0. Οι εντός ελέγχου παράμετροι της διεργασίας θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για την κατασκευή του διαγράμματος ελέγχου *ARIMA* Φάσης II.

Μελέτη Φάσης II

Στη μελέτη Φάσης II θα διαπιστωθεί αν η διεργασία παραμένει εντός ελέγχου χρησιμοποιώντας τις εντός ελέγχου παραμέτρους που υπολογίστηκαν στην Φάση I και κατασκευάζοντας ένα διάγραμμα ελέγχου *ARIMA* Φάσης II. Το διάγραμμα ελέγχου *EWMA*, όπως αποδείχθηκε νωρίτερα, δεν είναι κατάλληλο για την παρακολούθηση της συγκεκριμένης διεργασίας και παραλείπεται. Τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν αφορούν

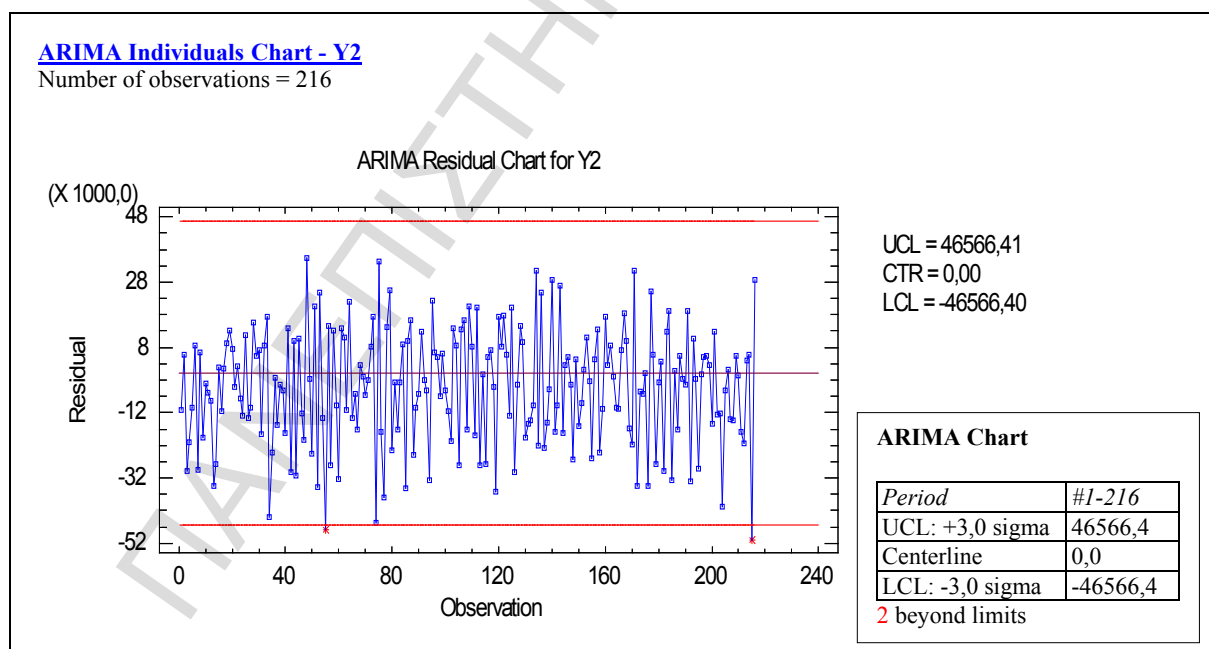
την περίοδο από 01/07/2013 έως και 28/02/2014 και στο διάστημα αυτό η βλάβη 104 εμφανίστηκε συνολικά 216 φορές. Οι τιμές της βλάβης 104 που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση Φάσης II της εφαρμογής παρατίθενται στο Παράρτημα Π1 της παρούσας εργασίας.

Προτού χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα για την κατασκευή του διαγράμματος ελέγχου, εφαρμόζεται σε αυτά ο ίδιος μετασχηματισμός που έγινε στις τιμές της μεταβλητής «Total Time» της Φάσης I. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε ο μετασχηματισμός δύναμης Box-Cox με $\lambda=0.074$ και υπολογίστηκαν οι τιμές της μετασχηματισμένης μεταβλητής Y_2 σύμφωνα με τον τύπο :

$$Y_2 = 1 + \frac{x^\lambda - 1}{\lambda(GM(x))^{\lambda-1}}, \quad \text{για } \lambda \neq 0$$

Το p -value του ελέγχου Kolmogorov-Smirnov για την μεταβλητή Y_2 είναι ίσο με 0.8478, επομένως δεν απορρίπτεται η υπόθεση της κανονικότητας των δεδομένων.

Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα ελέγχου *ARIMA* Φάσης II, όπου απεικονίζονται τα κατάλοιπα του μοντέλου *ARIMA*(1,0,1) για τις τιμές της μεταβλητής Y_2 , της περιόδου από 01/07/2013 έως και 28/02/2014. Οι παράμετροι της διεργασίας και τα όρια ελέγχου είναι αυτά που εκτιμήθηκαν στην Φάση I της μελέτης από τα ιστορικά δεδομένα.



Από το διάγραμμα υπάρχει ένδειξη ότι η διεργασία δεν είναι πλέον εντός στατιστικού ελέγχου και αυτό συμβαίνει για πρώτη φορά στην 55^η παρατήρηση, όπου ένα σημείο

βρίσκεται κάτω από το -3σ όριο ελέγχου. Στη συνέχεια, το ίδιο συμβαίνει ξανά στην 215^η παρατήρηση όπου πάλι ένα σημείο βρίσκεται εκτός του κάτω ορίου ελέγχου. Τα εκτός ελέγχου σημεία βρίσκονται κάτω από το κάτω όριο ελέγχου και επομένως οι ενδείξεις δεν είναι ανησυχητικές για την εταιρία A, καθώς αυτό σημαίνει ότι για την επιδιόρθωση της βλάβης 104 χρειάστηκε αρκετά λιγότερος χρόνος. Παρόλα αυτά θα πρέπει να διερευνηθούν οι αιτίες που οδήγησαν σε αυτά τα γεγονότα και να ελεγχθεί το ενδεχόμενο μετατόπισης του μέσου της διεργασίας προς τα κάτω. Αρκετά σημεία βρίσκονται κοντά στο κάτω όριο ελέγχου και πολλά σημεία βρίσκονται κάτω από την κεντρική γραμμή. Αυτό ίσως σημαίνει ότι οι τεχνικοί συντήρησης, έπειτα από 2 χρόνια που εργάζονται στην εταιρία, απέκτησαν την απαιτούμενη εμπειρία και εξειδίκευση και κατάφεραν να επιδιορθώνουν την συγκεκριμένη βλάβη γρηγορότερα. Σε αυτή την περίπτωση, τα όρια ελέγχου θα πρέπει να επαναυπολογιστούν για να ανταποκρίνονται στα νέα δεδομένα.

4.5.2 Βλάβη 402

Η βλάβη 402 είναι πιο σοβαρή από την 104 που μελετήθηκε στην προηγούμενη ενότητα και κατά μέσο όρο απαιτεί περισσότερο χρόνο για να επιδιορθωθεί. Κάθε ανεμογεννήτρια έχει μια δεξαμενή όπου τοποθετείται ειδικό λάδι μηχανής, το οποίο χρησιμεύει στην μείωση της τριβής των κινούμενων μηχανικών μερών και γενικότερα στην απαγωγή της θερμότητας που παράγεται. Η ποσότητα του λαδιού που τοποθετείται στη δεξαμενή είναι συγκεκριμένη και ελέγχεται συνεχώς από έναν αισθητήρα που είναι τοποθετημένος εσωτερικά της δεξαμενής. Η βλάβη 402 εμφανίζεται όταν η στάθμη του λαδιού πέσει χαμηλότερα από το επιτρεπτό όριο και αυτό συνήθως οφείλεται σε κάποια διαρροή λαδιού ή και στην εξάτμιση ποσότητας λαδιού από τις υψηλές θερμοκρασίες που δημιουργούνται.

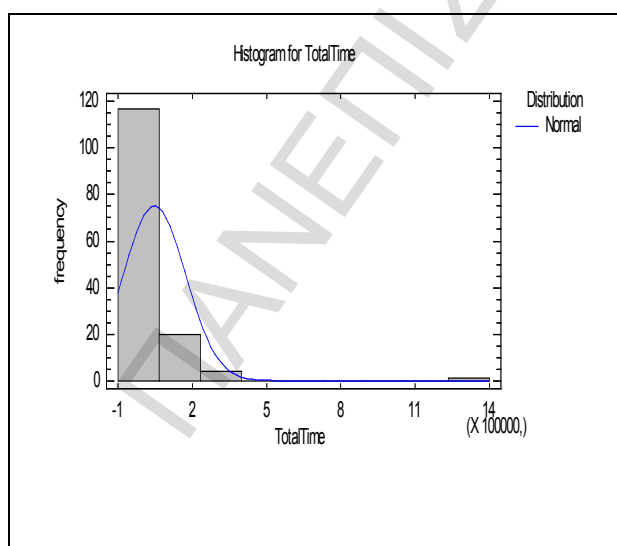
Η βλάβη 402 απαιτεί την άμεση παρέμβαση των τεχνικών συντήρησης, είτε απλώς για να προσθέσουν την απαιτούμενη ποσότητα λαδιού είτε για να επιδιορθώσουν την διαρροή στη δεξαμενή. Αυτή η διαδικασία μπορεί να διαρκέσει πολλές ώρες ή και ημέρες όταν η διαρροή είναι πολύ μεγάλη ή όταν δεν είναι εμφανής και οι τεχνικοί χρειάζονται πολύ χρόνο για να την εντοπίσουν. Σε κάθε περίπτωση η ανάβαση στον θάλαμο της ανεμογεννήτριας είναι υποχρεωτική, καθώς η βλάβη αυτή δεν μπορεί να επιδιορθωθεί απομακρυσμένα από τον υποσταθμό. Ο χρόνος επιδιόρθωσης της βλάβης 402 εξαρτάται τόσο από την αιτία που την

προκάλεσε όσο και από την χρονική στιγμή που εμφανίζεται, καθώς εάν οι τεχνικοί συντήρησης δεν βρίσκονται στο πάρκο τη δεδομένη στιγμή ο χρόνος που μεσολαβεί μέχρι να φτάσουν μπορεί να είναι ιδιαίτερα κρίσιμος για την εξέλιξή της.

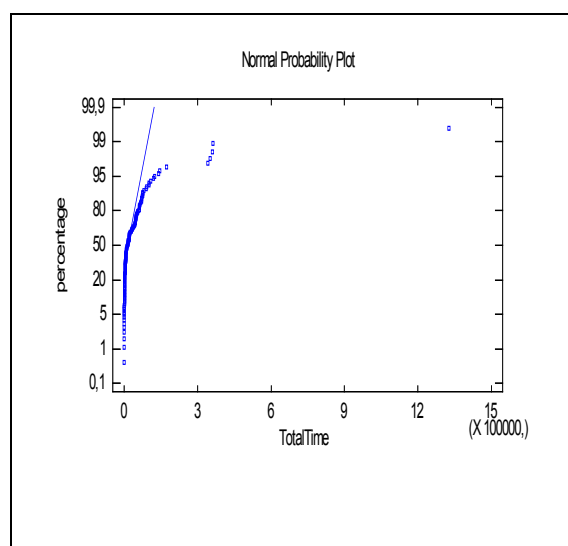
Μελέτη Φάσης I

Στο σημείο αυτό και με τη χρήση των ιστορικών δεδομένων της περιόδου από 01/01/2011 έως και 31/12/2012 θα γίνει η μελέτη Φάσης I, όπου θα εκτιμηθούν οι βασικές παράμετροι της διεργασίας. Την χρονική περίοδο που περιλαμβάνει η Φάση I, η βλάβη 402 εμφανίστηκε συνολικά 142 φορές και ο μέσος χρόνος επιδιόρθωσής της ήταν 47.535,8 δευτερόλεπτα. Επίσης, ο λιγότερος χρόνος που χρειάστηκε για να επιδιορθωθεί η βλάβη αυτή ήταν 1.062 δευτερόλεπτα, ενώ αντίθετα ο περισσότερος χρόνος ήταν 1.327.318 δευτερόλεπτα. Οι τιμές της βλάβης 402 που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση Φάσης I της εφαρμογής παρατίθενται στο Παράρτημα Π2 της παρούσας εργασίας.

Αρχικά, με τη βοήθεια του στατιστικού πακέτου *Statgraphics Centurion*, τα δεδομένα ελέγχθηκαν ως προς την κανονικότητά τους. Ο οπτικός έλεγχος μέσω του ιστογράμματος (Σχήμα 4.5) και του διαγράμματος πιθανότητας (Σχήμα 4.6) έδειξε ότι τα δεδομένα δεν προσεγγίζονται ικανοποιητικά από την κανονική κατανομή. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε το *p-value* του στατιστικού ελέγχου Kolmogorov-Smirnov και βρέθηκε μικρότερο του 0.05, κάτι που επιβεβαίωσε την μη κανονικότητα των δεδομένων.



Σχήμα 4.5: Ιστόγραμμα μεταβλητής TotalTime



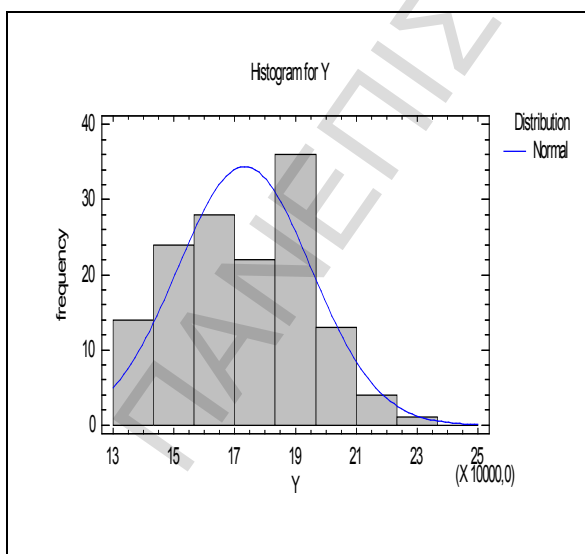
Σχήμα 4.6: Διάγραμμα Πιθανότητας μεταβλητής TotalTime

Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της μη κανονικότητας των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ο μετασχηματισμός δύναμης των Box-Cox (*Power Transformations*) και οι τιμές της νέας μεταβλητής Y υπολογίστηκαν σύμφωνα με τον τύπο :

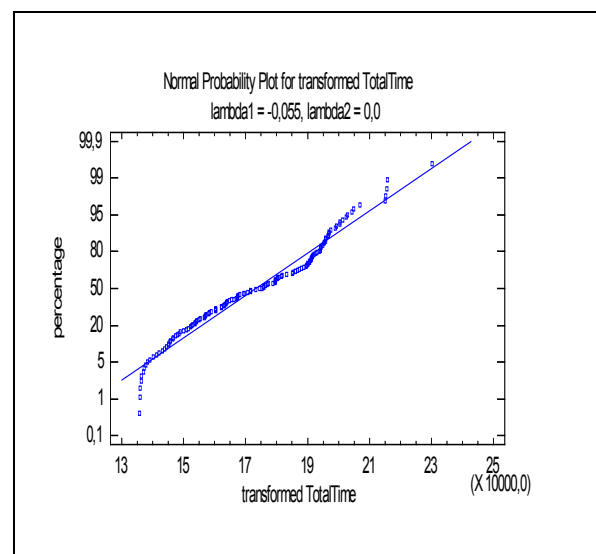
$$Y = 1 + \frac{x^\lambda - 1}{\lambda(GM(x))^{\lambda-1}}, \quad \text{για } \lambda \neq 0 ,$$

όπου λ είναι η παράμετρος δύναμης που ελαχιστοποιεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (*MSE*) και GM είναι ο γεωμετρικός μέσος των αρχικών παρατηρήσεων. Με τη βοήθεια του στατιστικού πακέτου *Statgraphics* υπολογίστηκε το λ που ελαχιστοποιεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα ($\lambda = -0.055$) και στη συνέχεια υπολογίστηκαν και αποθηκεύτηκαν οι τιμές της μετασχηματισμένης μεταβλητής Y .

Στα Σχήματα 4.7 και 4.8 παρουσιάζονται το ιστόγραμμα και το διάγραμμα πιθανότητας αντίστοιχα, για τις τιμές της μετασχηματισμένης μεταβλητής Y . Ο οπτικός έλεγχος δείχνει ότι τα δεδομένα προσεγγίζονται από την κανονική κατανομή κάτι που επιβεβαιώνει ο στατιστικός έλεγχος Kolmogorov-Smirnov. Το *p-value* του ελέγχου υπολογίστηκε ίσο με 0,158 και άρα η υπόθεση της κανονικότητας των δεδομένων δεν απορρίπτεται. Αφού τα δεδομένα μετασχηματίστηκαν ώστε να προσεγγίζονται ικανοποιητικά από την κανονική κατανομή, στη συνέχεια για την κατασκευή των διαγραμμάτων ελέγχου θα χρησιμοποιηθούν οι τιμές της μεταβλητής Y .



Σχήμα 4.7: Ιστόγραμμα μεταβλητής Y



Σχήμα 4.8: Διάγραμμα Πιθανότητας μεταβλητής Y

Στη συνέχεια, ελέγχθηκε η πιθανότητα ύπαρξης αυτοσυσχέτισης μεταξύ των παρατηρήσεων της μεταβλητής «Total Time» με το τεστ των ροών (*Runs Test*). Τα αποτελέσματα του στατιστικού ελέγχου φαίνονται στο πλαίσιο που ακολουθεί.

Runs Test: TotalTime

Runs test for TotalTime

Runs above and below K = 47535,8

The observed number of runs = 54

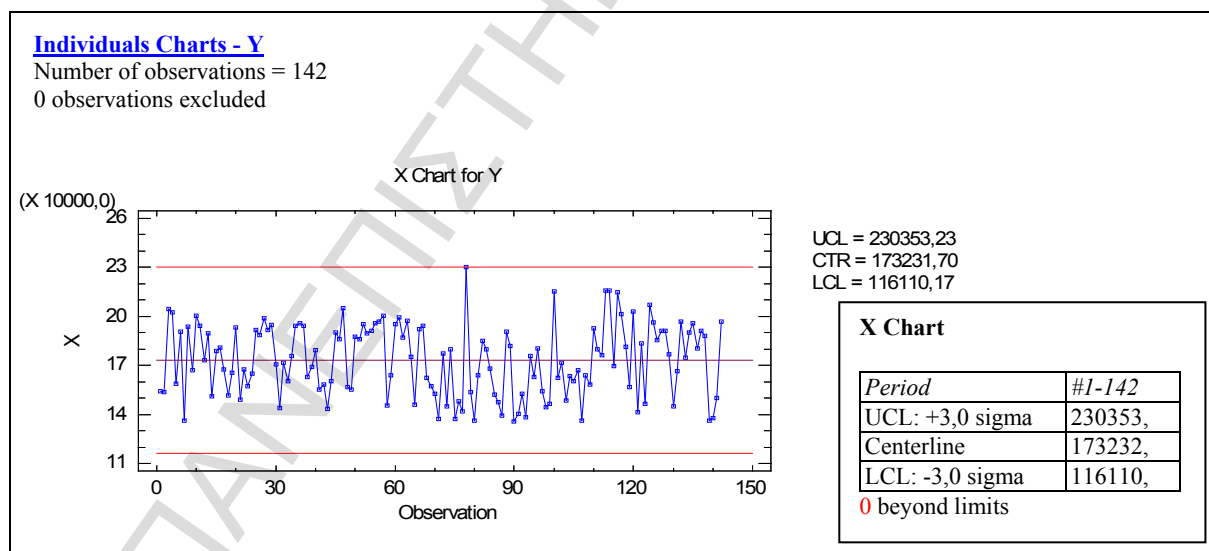
The expected number of runs = 60,1549

42 observations above K; 100 below

P-value = 0,213

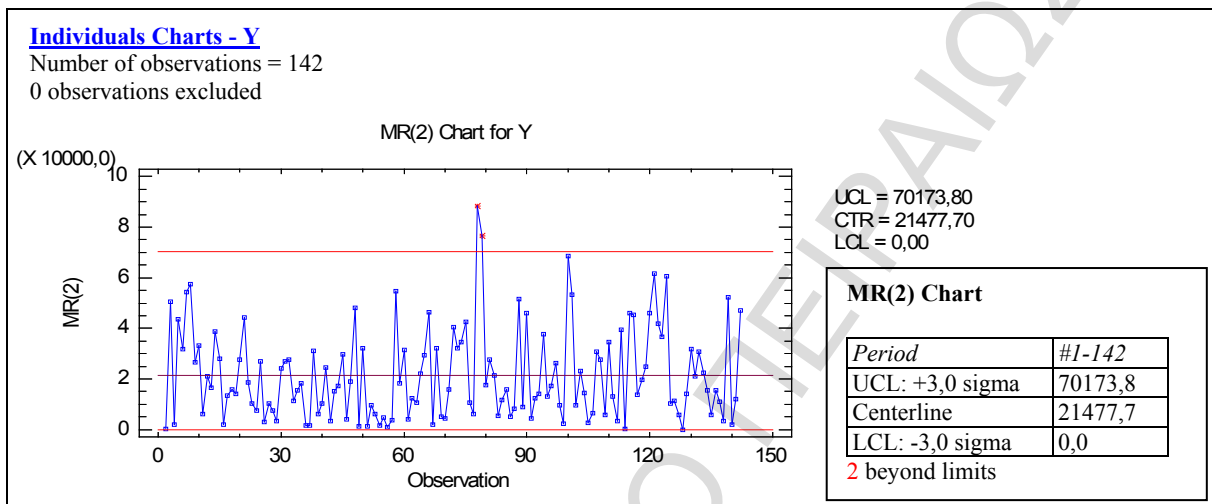
Το *p-value* του ελέγχου βρέθηκε ίσο με 0.213 και άρα δεν μπορεί να απορριφθεί η μηδενική υπόθεση περί τυχαιότητας της ακολουθίας, δηλαδή δεν επαληθεύεται στατιστικά η υποψία για πιθανή αυτοσυσχέτιση των παρατηρήσεων.

Επομένως, σε αυτή την περίπτωση το διάγραμμα ελέγχου τύπου *Shewhart I-MR* για μεμονωμένες παρατηρήσεις είναι το πλέον κατάλληλο για την παρακολούθηση της διεργασίας. Στη συνέχεια παρουσιάζεται το διάγραμμα ελέγχου *I*, όπου απεικονίζονται οι 142 τιμές της μεταβλητής *Y* που περιλαμβάνονται στην Φάση *I* της μελέτης.

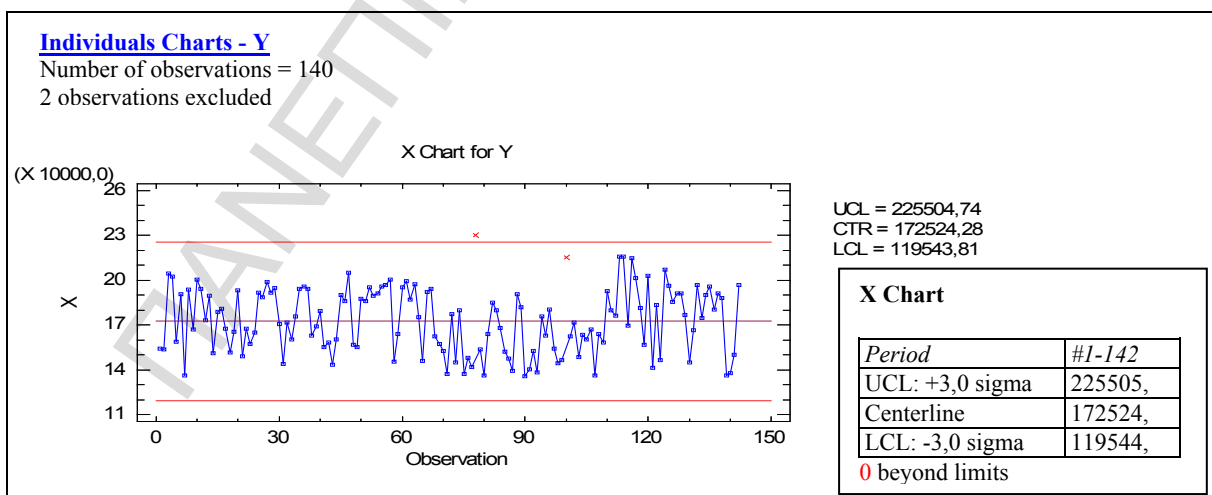


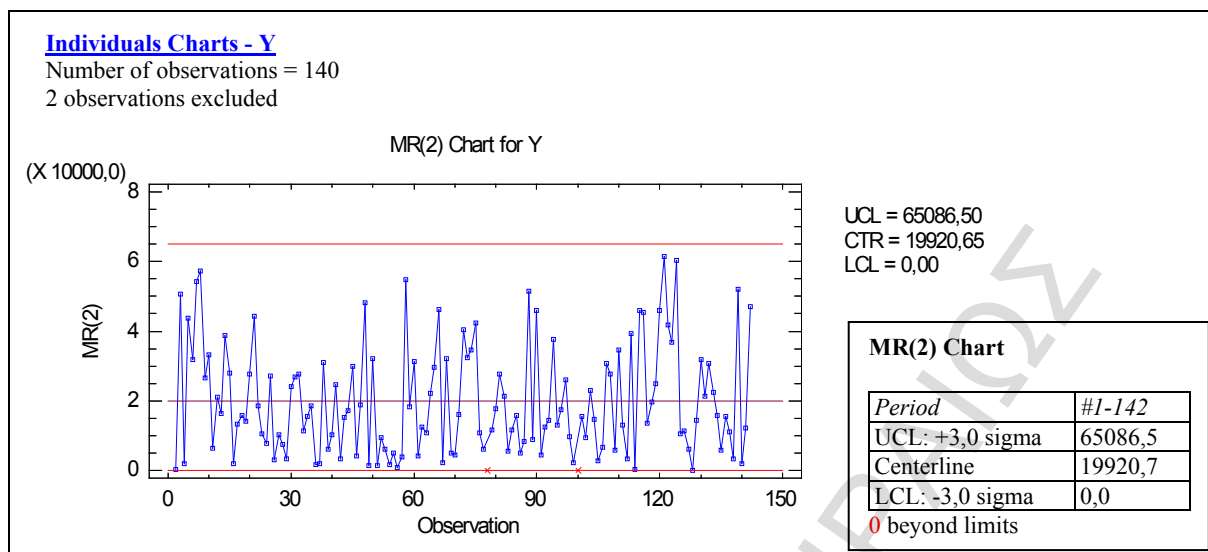
Το +3σ άνω όριο ελέγχου του διαγράμματος είναι ίσο με 230653.23, η κεντρική γραμμή του διαγράμματος ελέγχου είναι ίση με 173231.70, ενώ το -3σ κάτω όριο ελέγχου βρέθηκε ίσο με 116110.17. Κανένα σημείο δεν βρέθηκε εκτός των 3σ ορίων ελέγχου, αλλά ένα από αυτά βρίσκεται επάνω στο άνω όριο.

Παράλληλα με την παρακολούθηση του μέσου μιας διεργασίας θα πρέπει να παρακολουθείται και η διασπορά της. Στην περίπτωση των μεμονωμένων παρατηρήσεων αυτό γίνεται με το διάγραμμα κινούμενου μέσου (*Moving Range chart-MR*). Στη συνέχεια παρουσιάζεται το *MR* διάγραμμα ελέγχου της μεταβλητής *Y* με τις 142 τιμές που περιλαμβάνονται στην Φάση I της μελέτης.



Το +3σ άνω όριο ελέγχου του διαγράμματος είναι ίσο με 70173.80, η κεντρική γραμμή του διαγράμματος ελέγχου είναι ίση με 21477.70 ενώ το -3σ κάτω όριο ελέγχου βρέθηκε ίσο με 0. Συνολικά 2 σημεία εντοπίστηκαν εκτός του 3σ άνω ορίου, τα οποία αφαιρέθηκαν ώστε να σταθεροποιηθεί η διακύμανση. Μετά την αφαίρεση των δύο σημείων, η διεργασία σταθεροποιήθηκε εντός των ορίων ελέγχου και τα διαγράμματα *I-MR* πήραν την μορφή που φαίνεται στα επόμενα πλαίσια.





Μετά την αφαίρεση των 2 σημείων η διεργασία σταθεροποιήθηκε εντός των ορίων ελέγχου και η εκτίμηση της μέσης τιμής της υπολογίστηκε ίση με 172524.28, ενώ η εκτίμηση της διακύμανσης ίση με 17660.2. Οι εντός ελέγχου παράμετροι της διεργασίας θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για την κατασκευή των διαγραμμάτων ελέγχου Φάσης II.

Μελέτη Φάσης II

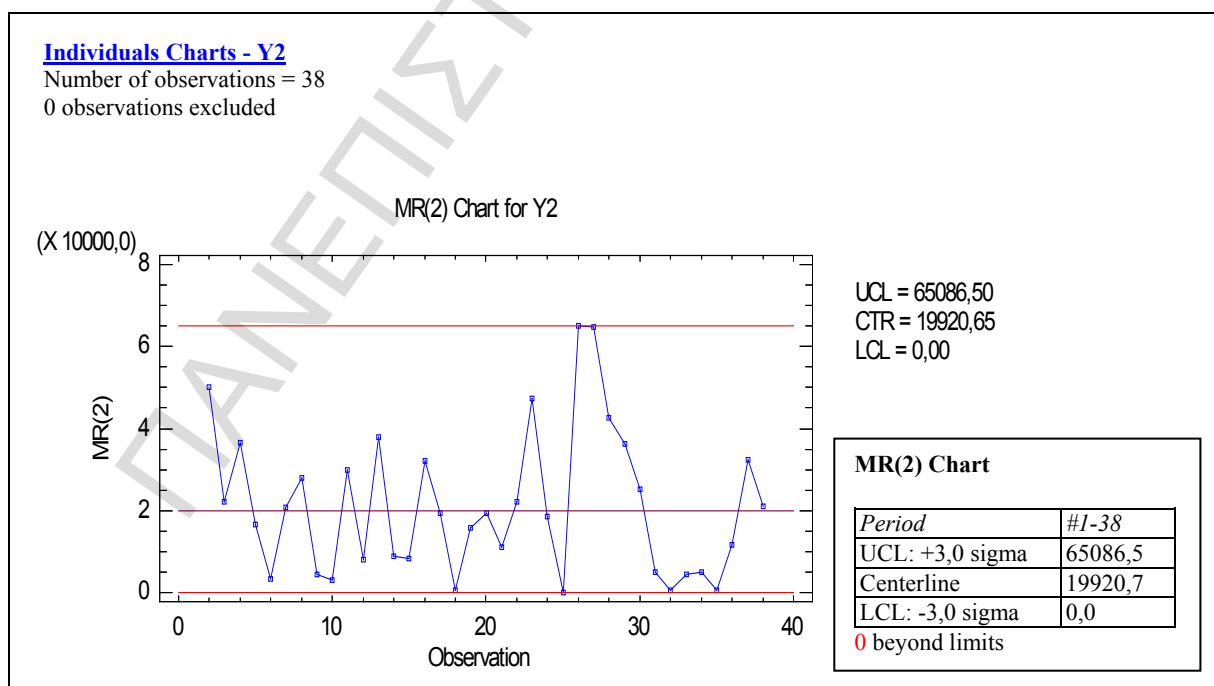
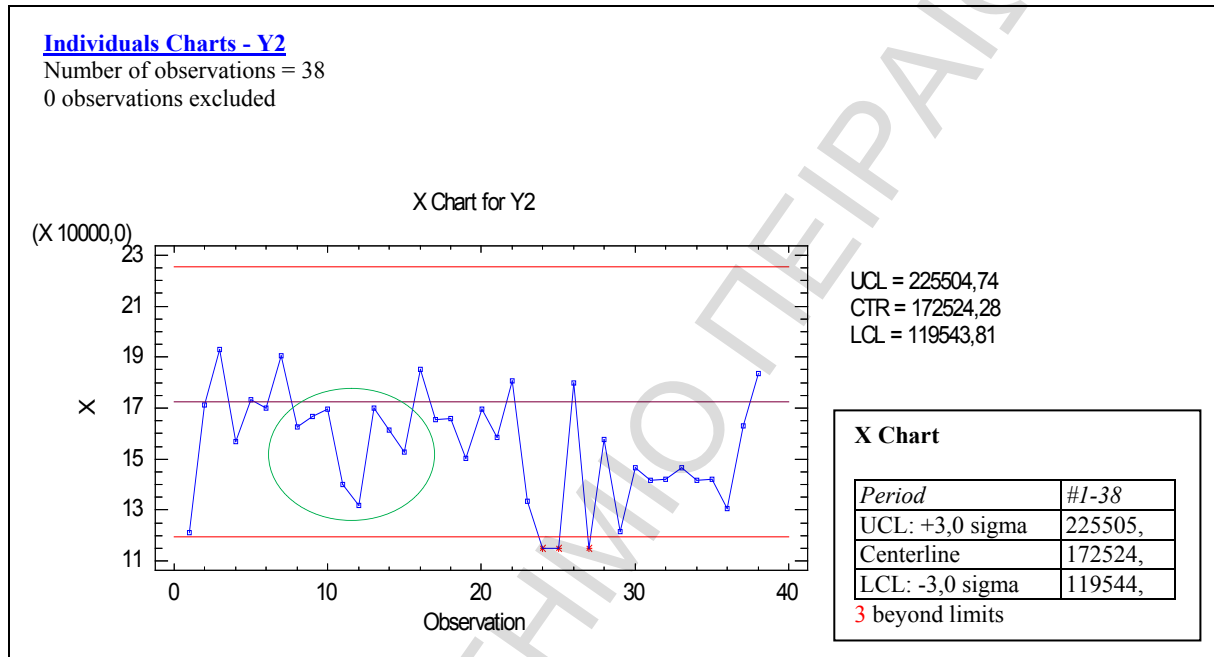
Στην ενότητα αυτή και με τη βοήθεια των παραμέτρων της διεργασίας που εκτιμήθηκαν στην Φάση I της μελέτης, θα κατασκευαστούν τα διαγράμματα *I-MR* για τις μετρήσεις που συγκεντρώθηκαν την περίοδο από 01/07/2013 έως και 28/02/2014, με σκοπό να διαπιστωθεί αν η διεργασία παραμένει εντός στατιστικού ελέγχου. Το διάστημα αυτό η βλάβη 402 εμφανίστηκε συνολικά 38 φορές και τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν παρατίθενται στο Παράρτημα Π2 της παρούσας εργασίας.

Προτού χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα για την κατασκευή των διαγραμμάτων, εφαρμόζεται σε αυτά ο ίδιος μετασχηματισμός που έγινε στις τιμές της μεταβλητής «*Total Time*» της Φάσης I. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε ο μετασχηματισμός δύναμης Box-Cox με $\lambda = -0.055$ και υπολογίστηκαν οι τιμές της μετασχηματισμένης μεταβλητής Y_2 σύμφωνα με τον τύπο :

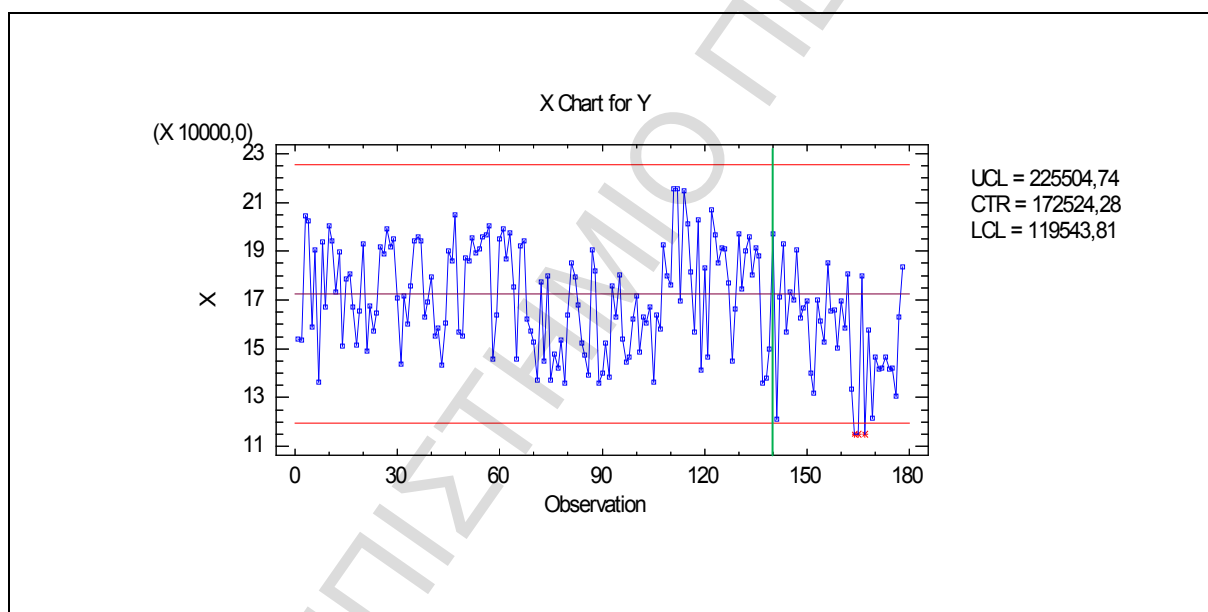
$$Y_2 = 1 + \frac{x^\lambda - 1}{\lambda(GM(x))^{\lambda-1}}, \quad \text{για } \lambda \neq 0$$

Το p -value του ελέγχου Kolmogorov-Smirnov για την μεταβλητή Y_2 είναι ίσο με 0.9168, επομένως δεν μπορεί να απορριφθεί η υπόθεση της κανονικότητας των δεδομένων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα ελέγχου I - MR Φάσης II για τις τιμές της μεταβλητής Y_2 της περιόδου από 01/07/2013 έως 28/02/2014. Οι παράμετροι της διεργασίας και τα όρια ελέγχου των διαγραμμάτων είναι αυτά που εκτιμήθηκαν στην Φάση I της μελέτης από τα ιστορικά δεδομένα.



Στο *I* διάγραμμα ελέγχου βρέθηκαν 3 σημεία εκτός του -3σ κάτω ορίου ελέγχου και επομένως η διεργασία δεν είναι πλέον εντός ελέγχου. Επίσης, αν η παρακολούθηση της διεργασίας γινόταν σε πραγματικό χρόνο, θα υπήρχαν ενδείξεις μη στάσιμης διεργασίας πολύ νωρίτερα. Συγκεκριμένα, στην 15^η παρατήρηση παραβιάζεται ο κανόνας ροών των 8 συνεχόμενων σημείων στην ίδια μεριά της κεντρικής γραμμής (επάνω ή κάτω), αφού από την 8^η παρατήρηση και έως την 15^η όλες οι παρατηρήσεις βρίσκονται κάτω από την κεντρική γραμμή του διαγράμματος. Από το *I* διάγραμμα ελέγχου φαίνεται ακόμη ότι ο μέσος της διεργασίας έχει μετατοπιστεί προς τα κάτω. Λίγα σημεία βρίσκονται πάνω από την κεντρική γραμμή, ενώ όλα τα υπόλοιπα κάτω από αυτή. Πολλά σημεία επίσης βρίσκονται εκτός του -1σ και -2σ ορίων ελέγχου. Το διάγραμμα που ακολουθεί περιλαμβάνει τις παρατηρήσεις της Φάσης I και Φάσης II μαζί, όπου η μετατόπιση του μέσου είναι περισσότερο εμφανής.



Στην περίπτωση που μελετάται εδώ αυτό είναι μια θετική ένδειξη για την εταιρία A, καθώς σημαίνει ότι ο χρόνος που οι τεχνικοί συντήρησης χρειάζονται για να επιδιορθώσουν την βλάβη 402 έχει μειωθεί σημαντικά σε σχέση με το παρελθόν. Πιθανώς αυτό οφείλεται στην εμπειρία που απέκτησαν οι τεχνικοί συντήρησης το χρονικό διάστημα που εργάζονταν στην εταιρία. Ενώ τον πρώτο καιρό λειτουργίας του πάρκου οι τεχνικοί χρειάζονταν περισσότερο χρόνο για να εντοπίσουν την βλάβη και να την επισκευάσουν, μετά από 2 χρόνια εργασίας σε πραγματικές συνθήκες έμαθαν να αναγνωρίζουν γρηγορότερα τις πιθανές αιτίες που την προκαλούν και να την επισκευάζουν σε μικρότερο χρονικό διάστημα.

Από την άλλη μεριά, αυτή η μετατόπιση του μέσου της διεργασίας δημιουργεί πρόβλημα στην μελλοντική παρακολούθηση της διεργασίας. Προφανώς, οι παράμετροι της διεργασίας που υπολογίστηκαν στην Φάση I της μελέτης δεν ανταποκρίνονται πλέον στα νέα δεδομένα και θα πρέπει να επανεκτιμηθούν για να μπορέσουν να χρησιμοποιηθούν μελλοντικά. Μια πιθανή λύση στο πρόβλημα αυτό θα ήταν να χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα της Φάσης II ως ιστορικά και να επαναληφθεί η μελέτη Φάσης I. Αφού εκτιμηθούν οι νέες παράμετροι της διεργασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της διεργασίας με νέα δεδομένα που θα συλλεχθούν στο μέλλον.

4.5.3 Βλάβη 411

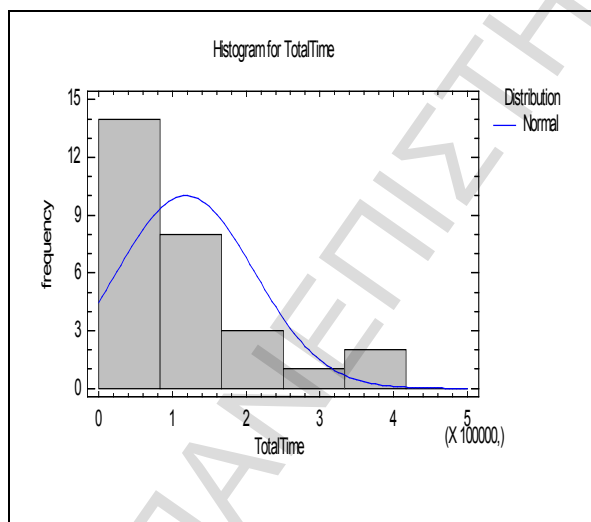
Στην ενότητα αυτή θα μελετηθεί η βλάβη 411 που είναι πολύ σοβαρότερη από τις δύο προηγούμενες και κατά μέσο όρο απαιτεί πολύ περισσότερο χρόνο για να επιδιορθωθεί. Η βλάβη αυτή σχετίζεται με τα φρένα των ανεμογεννητριών και συγκεκριμένα με τις υψηλές θερμοκρασίες που δημιουργούνται στο κιβώτιο ταχυτήτων. Κάθε ανεμογεννήτρια έχει έναν δίσκο με έξι τακάκια. Σε ένα από αυτά τα τακάκια είναι τοποθετημένος ένας αισθητήρας ο οποίος μετρά τη θερμοκρασία, έτσι ώστε όταν ξεπερνιέται το μέγιστο επιτρεπτό όριο να σταματά τη λειτουργία του μηχανισμού φρεναρίσματος για να αποφευχθούν σοβαρότερες ζημιές στην ανεμογεννήτρια. Όταν εμφανίζεται η βλάβη 411 σημαίνει ότι κάποιο από τα έξι τακάκια του δίσκου έχει παρουσιάσει πρόβλημα και θα πρέπει να αντικατασταθεί άμεσα ώστε να επαναλειτουργήσουν σωστά τα φρένα της ανεμογεννήτριας.

Και σε αυτή τη βλάβη η άμεση παρέμβαση των τεχνικών συντήρησης είναι αναγκαία και καθοριστική για την εξέλιξη της ζημιάς που έχει προκληθεί. Το κιβώτιο ταχυτήτων κάθε ανεμογεννήτριας είναι ένα από τα σημαντικότερα μηχανικά μέρη της και η δυσλειτουργία του μπορεί να επηρεάσει αρνητικά και τα υπόλοιπα τμήματά της δημιουργώντας πολλές και σοβαρότερες βλάβες. Όταν εμφανίζεται η βλάβη 411, οι τεχνικοί συντήρησης, είτε βρίσκονται στο πάρκο είτε όχι, θα πρέπει σε πολύ σύντομο χρονικό διάστημα να ανέβουν στον θάλαμο της ανεμογεννήτριας και να βρουν την αιτία που την προκάλεσε. Στην περίπτωση που κάποιο τακάκι πρέπει να αντικατασταθεί θα πρέπει να το παραγγείλουν και όταν το λάβουν θα πρέπει να ανέβουν πάλι στην ανεμογεννήτρια για να το αντικαταστήσουν άμεσα ώστε ο μηχανισμός φρεναρίσματος να επαναλειτουργήσει σωστά.

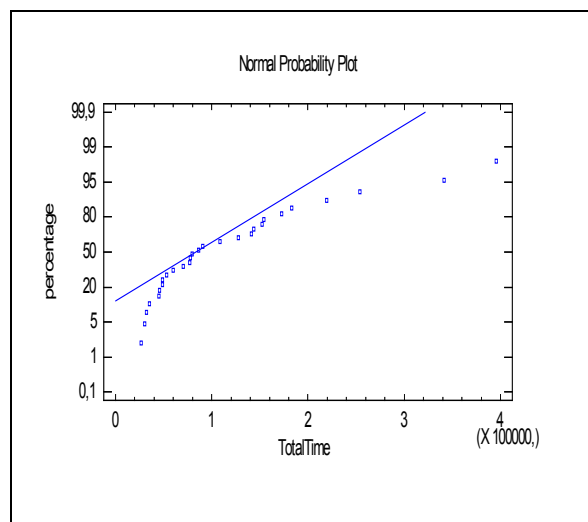
Μελέτη Φάσης I

Με τη χρήση των ιστορικών δεδομένων της περιόδου από 01/01/2011 έως και 31/12/2012 θα γίνει η μελέτη Φάσης I, όπου θα εκτιμηθούν οι βασικές παράμετροι της διεργασίας. Την χρονική περίοδο που περιλαμβάνει η Φάση I, η βλάβη 411 εμφανίστηκε συνολικά 28 φορές και ο μέσος χρόνος επιδιόρθωσής της ήταν 117.900,1 δευτερόλεπτα. Επίσης, ο λιγότερος χρόνος που χρειάστηκε για να επιδιορθωθεί η βλάβη αυτή ήταν 26.615 δευτερόλεπτα, ενώ αντίθετα ο περισσότερος χρόνος ήταν 395.763 δευτερόλεπτα. Οι τιμές της βλάβης 411 που χρησιμοποιήθηκαν για την ανάλυση Φάσης I της εφαρμογής παρατίθενται στο Παράρτημα Π3 της παρούσας εργασίας.

Αρχικά, με τη βοήθεια του στατιστικού πακέτου Statgraphics Centurion, τα δεδομένα ελέγχθηκαν ως προς την κανονικότητά τους. Ο οπτικός έλεγχος μέσω του ιστογράμματος (Σχήμα 4.9) και του διαγράμματος πιθανότητας (Σχήμα 4.10) έδειξε ότι τα δεδομένα δεν προσεγγίζονται ικανοποιητικά από την κανονική κατανομή. Στη συνέχεια, υπολογίστηκε το p -value του στατιστικού ελέγχου Shapiro-Wilk και βρέθηκε μικρότερο του 0.05, κάτι που επιβεβαίωσε την μη κανονικότητα των δεδομένων. Στη συγκεκριμένη περίπτωση χρησιμοποιήθηκε το Shapiro-Wilk Test αντί του Kolmogorov-Smirnov Test εξαιτίας του μικρού αριθμού παρατηρήσεων.



Σχήμα 4.9: Ιστόγραμμα μεταβλητής TotalTime



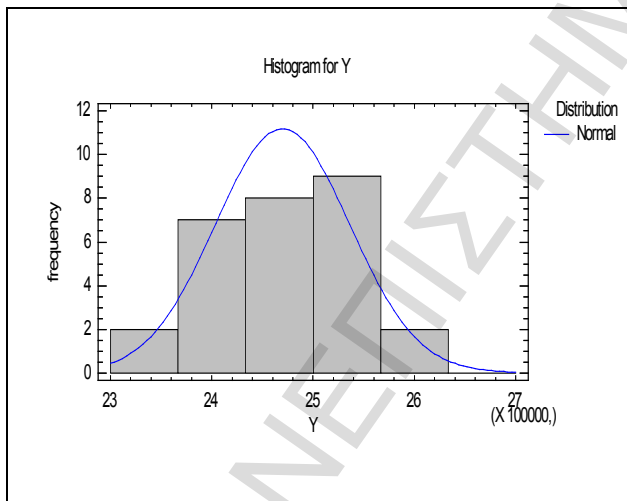
Σχήμα 4.10: Διάγραμμα Πιθανότητας μεταβλητής TotalTime

Για να αντιμετωπιστεί το πρόβλημα της μη κανονικότητας των δεδομένων χρησιμοποιήθηκε ο μετασχηματισμός δύναμης των Box-Cox (*Power Transformations*) και οι τιμές της νέας μεταβλητής Y υπολογίστηκαν σύμφωνα με τον τύπο :

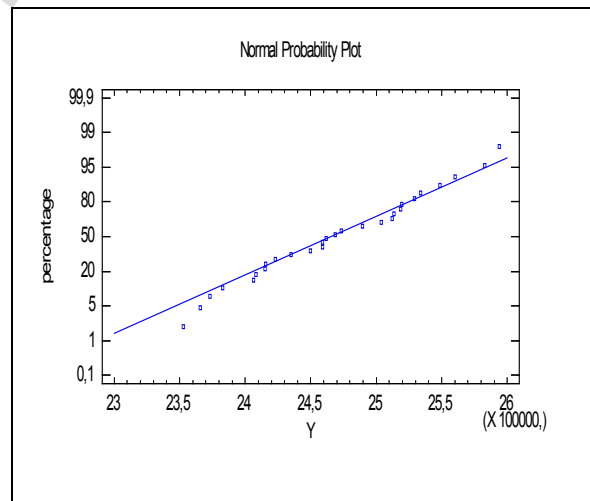
$$Y = 1 + \frac{x^\lambda - 1}{\lambda(GM(x))^{\lambda-1}}, \quad \text{για } \lambda \neq 0,$$

όπου λ είναι η παράμετρος δύναμης που ελαχιστοποιεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα (MSE) και GM είναι ο γεωμετρικός μέσος των αρχικών παρατηρήσεων. Με τη βοήθεια του στατιστικού πακέτου *Statgraphics* υπολογίστηκε το λ που ελαχιστοποιεί το μέσο τετραγωνικό σφάλμα ($\lambda = -0.136$) και στη συνέχεια υπολογίστηκαν και αποθηκεύτηκαν οι τιμές της μετασχηματισμένης μεταβλητής Y .

Στα Σχήματα 4.11 και 4.12 παρουσιάζονται το ιστόγραμμα και το διάγραμμα πιθανότητας αντίστοιχα, για τις τιμές της μετασχηματισμένης μεταβλητής Y . Ο οπτικός έλεγχος δείχνει ότι τα δεδομένα προσεγγίζονται από την κανονική κατανομή κάτι που επιβεβαιώνει ο στατιστικός έλεγχος Shapiro-Wilk. Το p -value του ελέγχου υπολογίστηκε ίσο με 0,666 και άρα η υπόθεση της κανονικότητας των δεδομένων δεν απορρίπτεται. Αφού τα δεδομένα μετασχηματίστηκαν ώστε να προσεγγίζονται ικανοποιητικά από την κανονική κατανομή, στη συνέχεια για την κατασκευή των διαγραμμάτων ελέγχου θα χρησιμοποιηθούν οι τιμές της μεταβλητής Y .



Σχήμα 4.11: Ιστόγραμμα μεταβλητής Y



Σχήμα 4.12: Διάγραμμα Πιθανότητας μεταβλητής Y

Στη συνέχεια, ελέγχθηκε η πιθανότητα ύπαρξης αυτοσυσχέτισης μεταξύ των παρατηρήσεων της μεταβλητής «*Total Time*» με το τεστ των ροών (*Runs Test*). Τα αποτελέσματα του στατιστικού ελέγχου φαίνονται στο πλαίσιο που ακολουθεί.

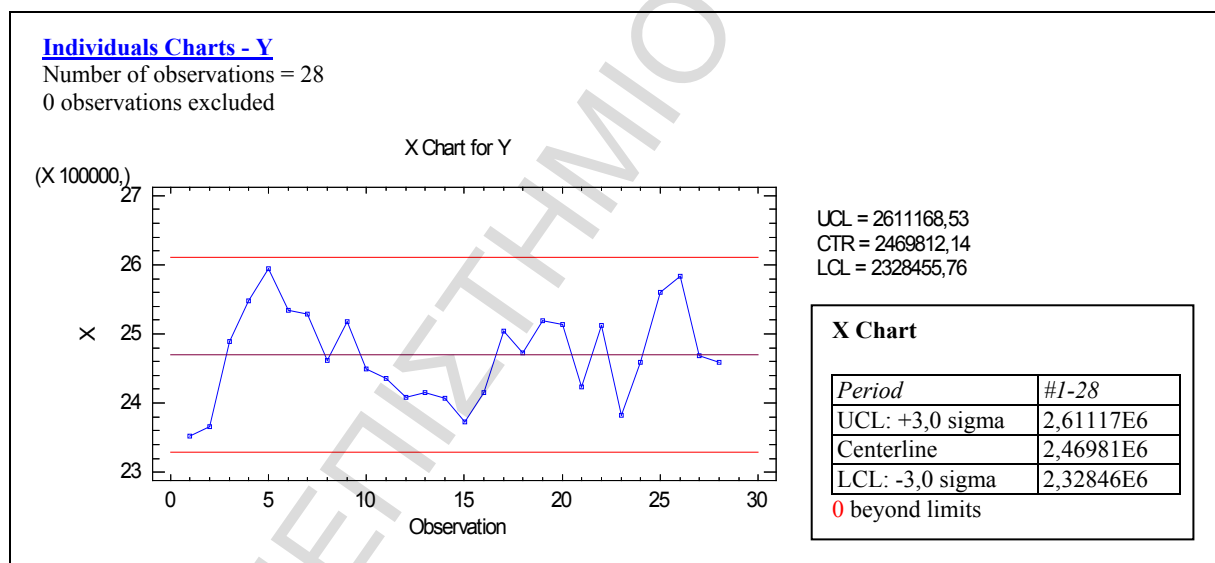
Runs Test: TotalTime

Runs above and below K = 117900

The observed number of runs = 13
The expected number of runs = 14,3571
11 observations above K; 17 below
P-value = 0,583

Το p -value του ελέγχου υπολογίστηκε ίσο με 0.583 και άρα δεν μπορεί να απορριφθεί η μηδενική υπόθεση περί τυχαιότητας της ακολουθίας, δηλαδή δεν επαληθεύεται στατιστικά η υποψία για πιθανή αυτοσυσχέτιση των παρατηρήσεων.

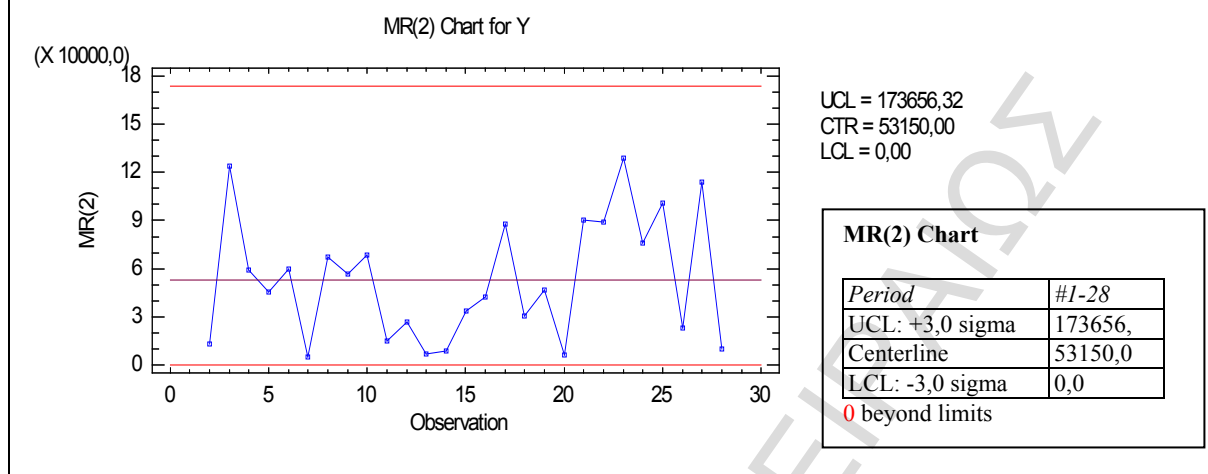
Επομένως, τα διαγράμματα ελέγχου τύπου *Shewhart I-MR* για μεμονωμένες παρατηρήσεις είναι κατάλληλα για την παρακολούθηση της διεργασίας. Στα επόμενα δύο πλαίσια παρουσιάζονται τα διαγράμματα *I* και *MR* αντίστοιχα, όπου απεικονίζονται οι 28 τιμές της μεταβλητής *Y* που περιλαμβάνονται στην Φάση I της μελέτης.



Individuals Charts - Y

Number of observations = 28

0 observations excluded



Τόσο στο I όσο και στο MR διάγραμμα δεν υπάρχει κανένα σημείο εκτός των 3σ ορίων ελέγχου, επομένως η διεργασία είναι στάσιμη. Η εκτίμηση της μέσης τιμής της διεργασίας υπολογίστηκε ίση με $2.46981E6$, ενώ η εκτίμηση της διακύμανσης ίση με 47118.8 . Οι εντός ελέγχου παράμετροι που εκτιμήθηκαν από τα ιστορικά δεδομένα θα χρησιμοποιηθούν στη συνέχεια για την κατασκευή των διαγραμμάτων Φάσης II.

Μελέτη Φάσης II

Στην ενότητα αυτή και με τη βοήθεια των παραμέτρων της διεργασίας που εκτιμήθηκαν στην Φάση I της μελέτης, θα κατασκευαστούν τα διαγράμματα $I-MR$ για τις μετρήσεις που συγκεντρώθηκαν την περίοδο από 01/07/2013 έως και 28/02/2014, με σκοπό να διαπιστωθεί αν η διεργασία παραμένει εντός στατιστικού ελέγχου και στάσιμη. Το διάστημα αυτό η βλάβη 411 εμφανίστηκε μόλις 8 φορές, καθώς η συγκεκριμένη βλάβη είναι αρκετά σοβαρή και δεν εμφανίζεται τόσο συχνά όσο αυτές που μελετήθηκαν στις προηγούμενες ενότητες. Τα δεδομένα που χρησιμοποιήθηκαν για την κατασκευή των διαγραμμάτων Φάσης II παρατίθενται στο Παράρτημα Π3 της παρούσας εργασίας.

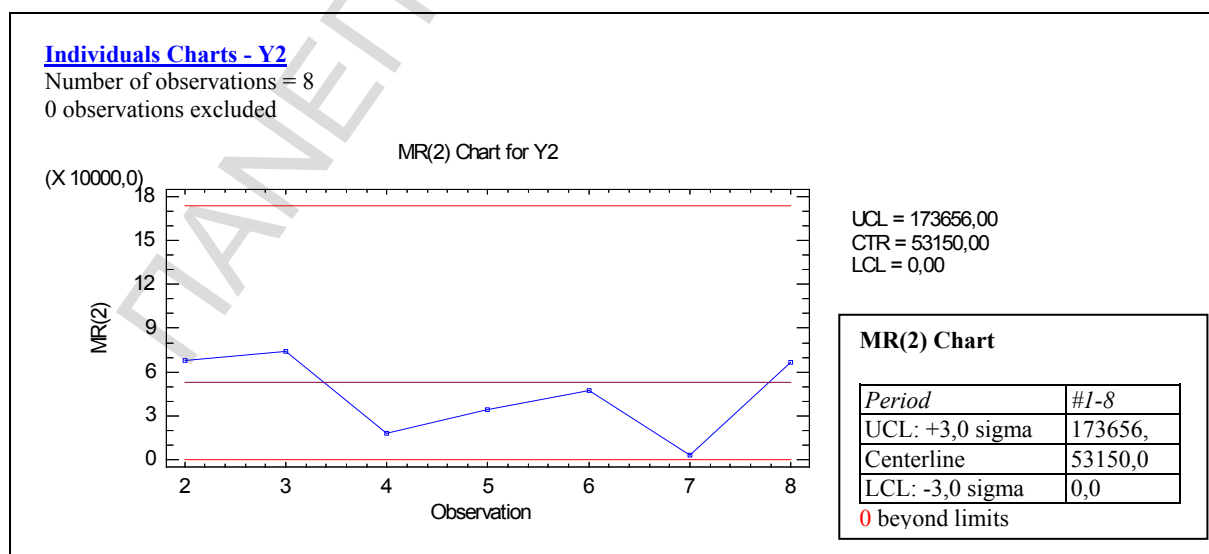
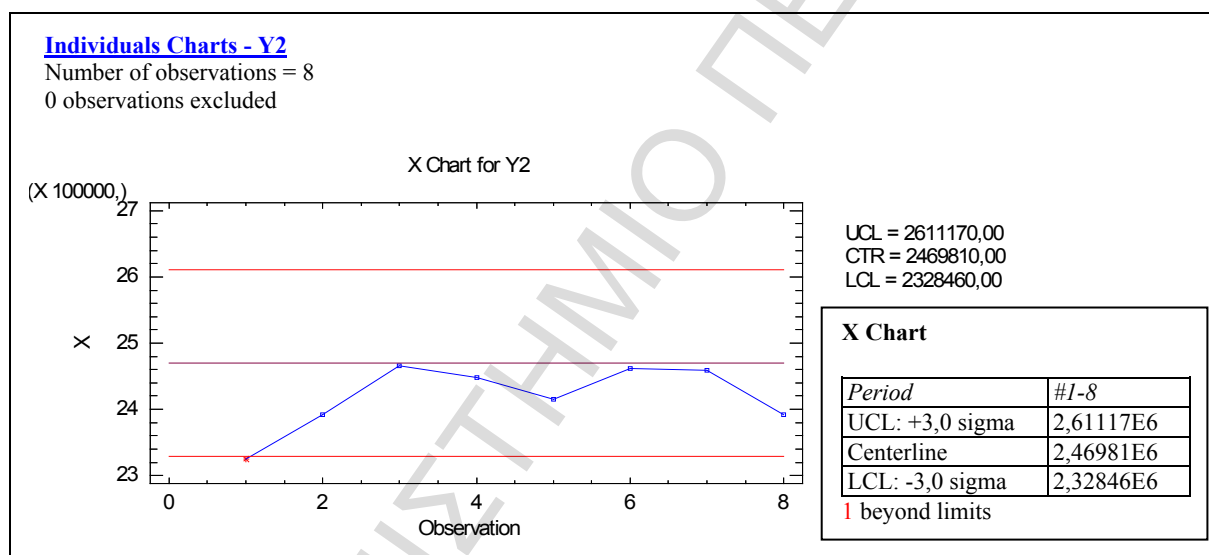
Προτού όμως χρησιμοποιηθούν τα δεδομένα για την κατασκευή των διαγραμμάτων, πρέπει να εφαρμοστεί σε αυτά ο ίδιος μετασχηματισμός που έγινε στις τιμές της μεταβλητής «Total Time» της Φάσης I. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκε στα δεδομένα ο μετασχηματισμός

δύναμης Box-Cox με $\lambda = -0.136$ και υπολογίστηκαν οι τιμές της μετασχηματισμένης μεταβλητής Y_2 σύμφωνα με τον τύπο :

$$Y_2 = 1 + \frac{x^\lambda - 1}{\lambda(GM(x))^{\lambda-1}}, \quad \text{για } \lambda \neq 0$$

Το p -value του ελέγχου Shapiro-Wilk για την μεταβλητή Y_2 είναι ίσο με 0.1616, επομένως δεν μπορεί να απορριφθεί η υπόθεση της κανονικότητας των δεδομένων.

Στη συνέχεια παρουσιάζονται τα διαγράμματα ελέγχου I - MR Φάσης II για τις τιμές της μεταβλητής Y_2 της περιόδου από 01/07/2013 έως 28/02/2014. Οι παράμετροι της διεργασίας και τα όρια ελέγχου των διαγραμμάτων είναι αυτά που εκτιμήθηκαν στην Φάση I της μελέτης από τα ιστορικά δεδομένα.



Από το 1^ο κιάλας σημείο του *I* διαγράμματος η διεργασία βγαίνει εκτός ελέγχου καθώς το σημείο αυτό είναι κάτω από το -3σ όριο. Εκτός αυτού, και τα 8 σημεία είναι κάτω από την κεντρική γραμμή του διαγράμματος και άρα παραβιάζεται επίσης ο κανόνας των ροών που λέει ότι όταν 8 συνεχόμενα σημεία βρίσκονται από την ίδια μεριά της κεντρικής γραμμής (επάνω ή κάτω) υπάρχει ένδειξη μη στάσιμης διεργασίας. Από τα αποτελέσματα θα μπορούσε να θεωρηθεί ότι υπάρχει μια μετατόπιση του μέσου προς τα κάτω, αν και οι παρατηρήσεις της Φάσης II της μελέτης είναι λίγες. Εξαιτίας αυτού, προτείνεται να χρησιμοποιηθούν τα ίδια όρια ελέγχου για ένα εύλογο χρονικό διάστημα, ώστε να συλλεχθούν περισσότερες παρατηρήσεις και να είναι πιο εμφανές αν όντως ο μέσος της διεργασίας έχει μετατοπιστεί και για την μελλοντική παρακολούθησή της θα πρέπει να επανεκτιμηθούν οι παράμετροί της.

4.6 Ανακεφαλαίωση - Συμπεράσματα

Στην προηγούμενη ενότητα παρουσιάστηκε ένας τρόπος ελέγχου της ποιότητας των υπηρεσιών που μια εταιρία συντήρησης αιολικών πάρκων προσφέρει στους πελάτες της. Συγκεκριμένα, εφαρμόστηκαν οι μέθοδοι του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών στην παρακολούθηση και την βελτίωση του χρόνου που χρειάζονται οι τεχνικοί συντήρησης της εταιρίας για να επιδιορθώσουν μια βλάβη σε κάποια ανεμογεννήτρια.

Σκοπός της εφαρμογής αυτής ήταν κυρίως να δείξει τον τρόπο που μια εταιρία σαν αυτή που μελετήθηκε εδώ, θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει εύκολα και αποτελεσματικά τα διαγράμματα ελέγχου για να βελτιώσει τις υπηρεσίες που προσφέρει στους πελάτες της. Η παράμετρος που επιλέχθηκε να ελεγχθεί είναι ενδεικτική και προφανώς, αν η εταιρία επιθυμεί να υιοθετήσει τέτοιου είδους μεθόδους ελέγχου, θα μπορούσαν με τον ίδιο τρόπο να παρακολουθηθούν κι άλλες παράμετροι που επηρεάζουν την ποιότητα των προσφερόμενων υπηρεσιών. Το σημαντικό πλεονέκτημα που έχουν αυτού του είδους οι εταιρίες, και διευκολύνει κατά πολύ την εφαρμογή των μεθόδων Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών, είναι ότι όλες οι διαδικασίες καταγράφονται λεπτομερώς και στις περισσότερες περιπτώσεις αυτοματοποιημένα, επομένως υπάρχουν διαθέσιμα προς επεξεργασία και ανάλυση πολλά δεδομένα.

Η εφαρμογή που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα αφορά σε τρεις συγκεκριμένες βλάβες ανεμογεννητριών και τα δεδομένα συλλέχθηκαν από ένα αιολικό πάρκο που συντηρεί η εταιρία Α. Τα αποτελέσματα της μελέτης έδωσαν σαφή ένδειξη βελτίωσης του χρόνου επιδιόρθωσης των βλαβών και επομένως βελτίωσης της ποιότητας συντήρησης. Παρόλα αυτά η εταιρία Α δεν θα πρέπει να «επαναπαυτεί» και να θεωρήσει ότι λειτουργεί με τον καλύτερο δυνατό τρόπο. Αντίθετα, θα μπορούσε να χρησιμοποιήσει τα αποτελέσματα της ανάλυσης ώστε να βρει εναλλακτικούς τρόπους για να μειώσει ακόμη περισσότερο τον χρόνο επισκευής μιας βλάβης. Για παράδειγμα, θα μπορούσε να «στενέψει» τα όρια ελέγχου των διαγραμμάτων χρησιμοποιώντας 2σ όρια αντί των 3σ ή ακόμη και να ορίσει δικά της όρια προδιαγραφών. Μέχρι σήμερα, κανείς από την εταιρία δεν είχε επεξεργαστεί τα διαθέσιμα δεδομένα, ώστε με κάποιο τρόπο να βρει πόσος χρόνος χρειάζεται κάθε είδους βλάβης για να επισκευαστεί. Στο μέλλον, οι υπεύθυνοι της εταιρίας σε συνεργασία με τους έμπειρους τεχνικούς συντήρησης θα μπορούσαν να εκτιμήσουν τον μέσο χρόνο και τον μέγιστο επιτρεπτό χρόνο που απαιτείται για να επιδιορθωθεί κάθε βλάβη, και οι τιμές αυτές να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή των διαγραμμάτων ελέγχου.

Επίσης, τα θετικά αποτελέσματα της μελέτης αφορούν σε ένα από τα συνολικά επτά αιολικά πάρκα που συντηρεί η εταιρία Α και σε δύο από τους συνολικά 20 τεχνικούς συντήρησης που απασχολεί. Οι δύο αυτοί τεχνικοί εργάζονται στον εν λόγω πάρκο από την αρχή της λειτουργίας του μέχρι και σήμερα και είναι από τους πιο έμπειρους εργαζόμενους της εταιρίας. Δεν συμβαίνει όμως το ίδιο και στα υπόλοιπα έξι αιολικά πάρκα, όπου οι τεχνικοί συντήρησης χρειάστηκε πολλές φορές να αντικατασταθούν με άλλους νεότερους. Επομένως, τα συμπεράσματα της εφαρμογής που προηγήθηκε δεν θα πρέπει να γενικεύονται, καθώς αφορούν ένα μόνο μέρος της εταιρίας Α και όχι το σύνολό της. Για μια πιο ολοκληρωμένη εικόνα θα έπρεπε οι ίδιες μέθοδοι να εφαρμοστούν και στα υπόλοιπα έξι πάρκα της εταιρίας, κάτι που αν η εταιρία επιθυμεί μπορεί εύκολα να γίνει βάσει όσων παρουσιάστηκαν στην μελέτη που προηγήθηκε.

Ολοκληρώνοντας το κεφάλαιο αυτό, θα πρέπει να αναφερθεί πως η συνεργασία και η βοήθεια των υπεύθυνων συντήρησης της εταιρίας Α ήταν καθοριστικής σημασίας. Η εφαρμογή τέτοιου είδους μεθόδων σε πραγματικές και κυρίως μη βιομηχανικές διεργασίες απαιτεί, εκτός από καλή γνώση χειρισμού των εργαλείων του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών, πολύ καλή γνώση του αντικειμένου που μελετάται. Για παράδειγμα, στη βιομηχανία οι προδιαγραφές για τα προϊόντα που παράγονται είναι προκαθορισμένες και

κάθε παρέκκλιση από αυτές μπορεί εύκολα να εντοπιστεί. Αντίθετα, όταν ένα τέτοιου είδους σύστημα ελέγχου πρόκειται να εγκατασταθεί σε μια εταιρία παροχής υπηρεσιών, οι παράμετροι που ελέγχονται μπορεί να διαφέρουν κατά περίπτωση και η ερμηνεία των αποτελεσμάτων θα πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή καθώς οι ειδικές αιτίες μεταβλητότητας που ίσως παρατηρηθούν δεν είναι πάντα εύκολα αναγνωρίσιμες.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

Γενικά Συμπεράσματα

Ολοκληρώνοντας την παρούσα μελέτη και με την εμπειρία που αποκτήθηκε από την έρευνα που πραγματοποιήθηκε, αξίζει να αναφερθούν κάποια γενικά σχόλια και συμπεράσματα που προκύπτουν από όσα παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια.

Αδιαμφισβήτητα ο Στατιστικός Έλεγχος Διεργασιών και τα διαγράμματα ελέγχου αποτελούν ένα ισχυρό εργαλείο ελέγχου και βελτίωσης της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων που κάθε οργανισμός θα μπορούσε αποτελεσματικά να αξιοποιήσει προς όφελός του. Αν και παραδοσιακά οι μέθοδοι αυτοί χρησιμοποιούνται κυρίως στη βιομηχανία και τις τυπικές παραγωγικές διεργασίες, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μια σημαντική εξάπλωση της χρήσης τους σε τομείς όπως η υγεία, οι υπηρεσίες, η εκπαίδευση, το περιβάλλον κ.α..

Στην παρούσα εργασία έγινε μια προσπάθεια καταγραφής και κατηγοριοποίησης ανά τομέα όλων των δημοσιευμένων μη βιομηχανικών εφαρμογών των τεχνικών του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών από το 1989 έως και τα μέσα του 2014. Από την μελέτη αυτή ανέκυψαν κάποια θεμελιώδη ζητήματα που πηγάζουν από την χρήση των μεθόδων αυτών στους ποικίλους τομείς εκτός της βιομηχανίας. Η πολυπλοκότητα των μη παραγωγικών διεργασιών και πολύ συχνά η φύση των δεδομένων καθιστούν τα κλασσικά διαγράμματα ελέγχου ανεπαρκή για τον έλεγχο και την βελτίωση της ποιότητας. Για παράδειγμα, αν παραβιαστεί κάποια από τις βασικές υποθέσεις της ανεξαρτησίας και της κανονικότητας των δεδομένων, τα κλασσικά διαγράμματα ελέγχου δεν λειτουργούν καλά και συχνά οδηγούν σε λανθασμένα συμπεράσματα. Σε ορισμένες δημοσιεύσεις παρατηρήθηκαν σημαντικές παραλείψεις αυτής της αρχής που, είτε έγιναν εσκεμμένα είτε από αμέλεια, κατέστησαν ολόκληρη την μελέτη αναξιόπιστη. Ένα εξίσου σημαντικό ζήτημα που προκύπτει από την εφαρμογή των διαγραμμάτων ελέγχου σε μη παραγωγικές διεργασίες είναι η επιλογή των κατάλληλων παραμέτρων που επιλέγονται να ελεγχθούν. Ενώ στη βιομηχανία τα προϊόντα που ελέγχονται είναι αυτά που παράγονται και συνήθως υπάρχουν συγκεκριμένα όρια προδιαγραφών που θα πρέπει να ικανοποιούνται σύμφωνα με διεθνή πρότυπα ποιότητας, στις μη βιομηχανικές εφαρμογές τα πράγματα είναι περισσότερο πολύπλοκα και ρευστά. Τέλος, η ερμηνεία των

εκτός ελέγχου σημάτων και η αναγνώριση των ειδικών αιτιών που συντελούν σε αυτές είναι επίσης ένα καίριο ζήτημα που απαιτεί ιδιαίτερη γνώση τόσο του αντικειμένου που μελετάται όσο και των τεχνικών που χρησιμοποιούνται.

Πολλές από τις μελέτες που συλλέχθηκαν και εξετάστηκαν στα πλαίσια της παρούσας εργασίας διεξήχθησαν είτε από άτομα με ελλιπή στατιστικό υπόβαθρο που εργάζονταν σε κάποιον οργανισμό και αναζητούσαν πιθανούς τρόπους βελτίωσης της ποιότητας των υπηρεσιών που παρείχαν, είτε από ακαδημαϊκούς διαφόρων επιστημονικών πεδίων που χρησιμοποίησαν τις μεθόδους αυτές με σκοπό να διερευνήσουν το πεδίο ενδιαφέροντός τους. Αυτός είναι και ο κύριος λόγος των προβλημάτων που προκύπτουν από την χρήση των εργαλείων του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών σε μη παραγωγικές διεργασίες και περιγράφηκαν στην προηγούμενη παράγραφο. Για να εγκατασταθεί ένα σύστημα ελέγχου και να χρησιμοποιηθεί αποτελεσματικά, απαιτείται συνδυαστική γνώση τόσο των στατιστικών αρχών που διέπουν τις τεχνικές του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών, όσο και του αντικειμένου που πρόκειται να μελετηθεί.

Η εφαρμογή που παρουσιάστηκε στο 4^ο κεφάλαιο και πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της παρούσας εργασίας, είχε ως στόχο την αναγνώριση των ζητημάτων που περιγράφηκαν νωρίτερα και των πιθανών τρόπων αντιμετώπισής τους. Για τον λόγο αυτόν, επιλέχθηκε να μελετηθεί μια μη παραγωγική διεργασία, με πραγματικά δεδομένα από μια εταιρία παροχής υπηρεσιών που μέχρι και σήμερα δεν έχει εγκαταστήσει κανένα σύστημα ελέγχου ποιότητας. Τα στάδια που ακολουθήθηκαν, από τον καθορισμό της μεταβλητής ελέγχου και την επεξεργασία των διαθέσιμων δεδομένων, μέχρι την επιλογή των κατάλληλων διαγραμμάτων ελέγχου, την κατασκευή τους και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων, περιγράφηκαν βήμα – βήμα. Απώτερος σκοπός ήταν η παρουσίαση της μεθοδολογίας που ακολουθείται για την εγκατάσταση ενός συστήματος ελέγχου μιας μη παραγωγικής διεργασίας, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες του περιβάλλοντος εφαρμογής καθώς και τα συνήθη εμπόδια που εμφανίζονται κατά την εφαρμογή τέτοιου είδους τεχνικών ελέγχου. Προφανώς, οι επιλογές που έγιναν είναι ενδεικτικές και όχι απόλυτες καθώς, όπως ήδη αναφέρθηκε, υπάρχουν διάφοροι εναλλακτικοί τρόποι ελέγχου που θα μπορούσαν να υιοθετηθούν από την υπό μελέτη εταιρία. Το ζητούμενο ήταν να διερευνηθεί το κατά πόσο οι τεχνικές αυτές μπορούν να εφαρμοστούν σε μια εταιρία του εν λόγω κλάδου, με ποιόν τρόπο θα μπορούσαν πρακτικά να χρησιμοποιηθούν και ποια τελικά θα ήταν τα οφέλη για την εταιρία, κάτι που σε αυτό το σημείο εύλογα θεωρείται ότι επιτεύχθηκε.

Ολοκληρώνοντας την μελέτη αυτή και ως γενική διαπίστωση τόσο της έρευνας που πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια της βιβλιογραφικής ανασκόπησης όσο και της εφαρμογής, αξίζει να αναφερθεί η ανάγκη για περαιτέρω διεύρυνση των μεθόδων του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών, ώστε να προσαρμόζονται καλύτερα στην πολυπλοκότητα των μη παραγωγικών διεργασιών. Οι κλασικές προσεγγίσεις και οι υφιστάμενες τεχνικές ελέγχου προτάθηκαν πριν από αρκετά χρόνια και μέχρι πρόσφατα ανταποκρίνονταν ικανοποιητικά στις απαιτήσεις των βιομηχανικών μονάδων. Όμως σε μια εποχή έντονης ανταγωνιστικότητας, όπου η ανάγκη για έλεγχο των διεργασιών έχει επεκταθεί σε τομείς πέραν της βιομηχανίας, η αναζήτηση καινοτόμων μεθόδων και πιο ευέλικτων εργαλείων που θα προσαρμόζονται στις αυξανόμενες απαιτήσεις των σύγχρονων επιχειρήσεων, είναι καίριας σημασίας.

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

Π1 Δεδομένα βλάβης 104

Π2 Δεδομένα βλάβης 402

Π3 Δεδομένα βλάβης 411

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

Π1 Δεδομένα βλάβης 104

Φάση I (01/01/2011 – 31/12/2012)							
S/N	Total Time	S/N	Total Time	S/N	Total Time	S/N	Total Time
1	93542	51	40006	101	13386	151	6090
2	80344	52	40081	102	9166	152	9445
3	25303	53	36250	103	1615	153	14947
4	58226	54	33400	104	853	154	11761
5	45008	55	31088	105	65199	155	11596
6	19605	56	30383	106	764	156	68711
7	6572	57	26867	107	1167	157	68666
8	8744	58	19916	108	139342	158	31685
9	1650	59	19558	109	431	159	30020
10	115762	60	3676	110	2442	160	72
11	114032	61	3611	111	1619	161	18076
12	106792	62	3406	112	469	162	170
13	35089	63	3021	113	183	163	1411
14	1635	64	2946	114	562	164	17938
15	1271	65	251221	115	50836	165	79872
16	1322	66	251186	116	50771	166	76976
17	1420	67	251261	117	50601	167	24099
18	529	68	251246	118	48651	168	75276
19	59084	69	250511	119	5055	169	19709
20	1671	70	249606	120	4400	170	59248
21	50452	71	245535	121	540	171	32816
22	25344	72	61896	122	40554	172	5086
23	18420	73	150135	123	15706	173	32676
24	3480	74	46099	124	9406	174	32046
25	3070	75	34314	125	1620	175	8750
26	9407	76	33754	126	16197	176	44820
27	53894	77	2570	127	925	177	41260
28	53000	78	2425	128	880	178	36355
29	15576	79	2966	129	1154	179	14405
30	1850	80	45950	130	4898	180	13725
31	775	81	27845	131	2432	181	104433
32	333332	82	611	132	2373	182	34325
33	454	83	430	133	5091	183	49267
34	1223	84	17588	134	4970	184	33152
35	980	85	17499	135	1596	185	17136
36	9204	86	37461	136	1141	186	395
37	8177	87	26475	137	26262	187	46882
38	209659	88	11849	138	25577	188	5096
39	173401	89	66286	139	211	189	5541
40	145960	90	60425	140	10486	190	28807
41	137993	91	150291	141	180	191	18272
42	113962	92	6577	142	70	192	3615
43	13153	93	18450	143	1910	193	10157
44	400	94	155983	144	1935	194	45997
45	410	95	37890	145	27875	195	875
46	30341	96	1200	146	27719	196	521
47	82436	97	12950	147	3864	197	1686
48	41871	98	36614	148	873	198	3611
49	1190	99	31519	149	425	199	1143
50	2006	100	21134	150	1446	200	640

S/N	Total Time	S/N	Total Time	S/N	Total Time	S/N	Total Time
201	1688	251	7010	301	9621	351	1710
202	12711	252	5349	302	3050	352	918
203	16018	253	1881	303	2960	353	20081
204	13345	254	16305	304	2365	354	91975
205	6985	255	55082	305	5297	355	4215
206	69664	256	92313	306	5965	356	1874
207	2362	257	91848	307	3640	357	90548
208	79777	258	69336	308	3724	358	87511
209	19595	259	80443	309	2548	359	14668
210	9067	260	147894	310	9831	360	32968
211	9475	261	149243	311	8495	361	77836
212	12731	262	55946	312	3815	362	1638
213	9206	263	120146	313	535	363	72778
214	35682	264	3461	314	2894	364	68786
215	11213	265	3317	315	26157	365	106
216	3550	266	26	316	11945	366	68
217	46344	267	1416	317	40609	367	8674
218	17568	268	1659	318	38921	368	4407
219	2660	269	55595	319	38620	369	48339
220	643	270	134	320	8767	370	49342
221	905	271	269	321	22667	371	42572
222	2642	272	724	322	24547	372	30374
223	98767	273	1283	323	25152	373	3058
224	62766	274	184	324	355615	374	4579
225	35761	275	4468	325	8991	375	1123
226	31051	276	791	326	989	376	698
227	28236	277	549	327	590832	377	2097
228	27246	278	3389	328	495401	378	17860
229	52232	279	229	329	118652	379	1534
230	418912	280	608	330	263141	380	815
231	51382	281	2972	331	243293	381	5596
232	36161	282	5663	332	382356	382	14195
233	257054	283	5501	333	376171	383	2946
234	363180	284	4817	334	279209	384	24696
235	327330	285	4571	335	12343	385	15375
236	191088	286	287	336	147072	386	11274
237	190994	287	5888	337	72	387	138785
238	144099	288	10	338	340	388	4546
239	765312	289	7979	339	30549	389	5261
240	5824	290	2782	340	1100	390	124963
241	1754	291	1696	341	29260	391	918
242	51702	292	3717	342	9546	392	882
243	51462	293	401	343	11432	393	121377
244	570	294	1775	344	65813	394	120829
245	400	295	897	345	40	395	118468
246	1832	296	8065	346	2890	396	91884
247	281166	297	6295	347	475	397	168447
248	243411	298	4705	348	835	398	155780
249	53404	299	30246	349	177516	399	156360
250	46312	300	9457	350	2275		

Φάση II (01/07/2013 – 28/02/2014)

S/N	Total Time	S/N	Total Time	S/N	Total Time	S/N	Total Time
1	2712	55	22	109	60089	163	18278
2	10564	56	4549	110	50433	164	5741
3	365	57	183	111	4399	165	3020
4	224	58	6966	112	60089	166	12753
5	499	59	2386	113	1398	167	59683
6	5172	60	119	114	5477	168	60630
7	197	61	6623	115	321	169	5903
8	3839	62	18605	116	4108	170	1045
9	580	63	4231	117	11314	171	79610
10	2009	64	59010	118	6682	172	685
11	2254	65	6323	119	142	173	2309
12	1899	66	5730	120	10971	174	2427
13	69	67	1371	121	18006	175	5147
14	31	68	5685	122	67510	176	127
15	851	69	6559	123	46521	177	21102
16	592	70	4302	124	7735	178	18803
17	2769	71	5768	125	72671	179	778
18	11905	72	17837	126	1310	180	2970
19	34560	73	65341	127	3885	181	7536
20	37978	74	188	128	26048	182	295
21	15653	75	69724	129	37183	183	8903
22	19097	76	3669	130	3090	184	46270
23	7622	77	98	131	1484	185	671
24	2756	78	7019	132	931	186	4388
25	19534	79	69127	133	1126	187	954
26	3410	80	2384	134	66919	188	6225
27	2351	81	5307	135	2337	189	6153
28	23995	82	1207	136	67676	190	5851
29	23848	83	3029	137	2591	191	48531
30	33134	84	13012	138	1443	192	694
31	3288	85	209	139	2615	193	11927
32	17969	86	6317	140	73666	194	8445
33	64897	87	31742	141	4302	195	404
34	240	88	1279	142	3315	196	2722
35	155	89	1604	143	78059	197	8060
36	1279	90	2201	144	4453	198	14348
37	491	91	16617	145	11980	199	15567
38	1595	92	9600	146	18717	200	2855
39	2092	93	6552	147	10544	201	22837
40	590	94	230	148	722	202	4139
41	11144	95	20623	149	5719	203	2199
42	307	96	21406	150	1235	204	36
43	7010	97	24800	151	1509	205	538
44	198	98	9043	152	4453	206	2266
45	6031	99	20806	153	18717	207	852
46	1714	100	9353	154	10544	208	602
47	459	101	3578	155	722	209	4469
48	73042	102	730	156	5719	210	5487
49	18270	103	13357	157	25620	211	1105
50	1306	104	22878	158	1235	212	343
51	35293	105	827	159	1509	213	3295
52	408	106	15887	160	22859	214	8849
53	34943	107	50433	161	17156	215	16
54	3988	108	4399	162	32499	216	17254

Π3 Δεδομένα βλάβης 411

Φάση I (01/01/2011 – 31/12/2012)	
S/N	Total Time
1	26615
2	30061
3	108614
4	219298
5	395763
6	183351
7	172719
8	79881
9	151997
10	70171
11	60110
12	45688
13	48838
14	44820
15	32306
16	49092
17	127772
18	90550
19	154398
20	143354
21	52947
22	141231
23	35466
24	77485
25	253862
26	341135
27	86269
28	77410

Φάση II (01/07/2013 – 28/02/2014)	
S/N	Total Time
1	20460
2	38832
3	83865
4	69191
5	48580
6	79962
7	77295
8	38768

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

Βιβλιογραφία

- Αναστασίου, Α. και Κατιρτζής, Π. (2010), “Ανάπτυξη Δεικτών για την Αξιολόγηση της Ποιότητας των Διεργασιών Εσωτερικής Επικοινωνίας μιας Επιχείρησης”, Διπλωματική Εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών στη Διασφάλιση Ποιότητας
- Αντζουλάκος, Δ. (2010), “Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας-Σημειώσεις Παραδόσεων”, Πανεπιστήμιο Πειραιώς, Τμήμα Στατιστικής και Ασφαλιστικής Επιστήμης, Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών στην Εφαρμοσμένη Στατιστική
- Μπερσίμης, Σ. και Μαραβελάκης, Π. (2006), “Η Στατιστική ως Εργαλείο Μέτρησης, Ελέγχου και Βελτίωσης της Ποιότητας”, *ΤΑ ΝΕΑ- Ανοικτό MBA*, Β' Κύκλος, Τεύχος 23
- Σηλιμίρη, Σ. (2012), “Χρήση των διαγραμμάτων Στατιστικού Ελέγχου Διεργασίας σε μη βιομηχανικές διεργασίες και εφαρμογή αυτών σε λειτουργίες της Πολεμικής Αεροπορίας”, Διπλωματική Εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας, Πρόγραμμα Σπουδών στη Διασφάλιση Ποιότητας
- Acosta-Mejia, C. A. and Pignatiello, J. J. (2000), "Monitoring process dispersion without subgrouping", *Journal of Quality Technology*, Vol.32, p.89–102.
- Alt, F.B. (1985), “Multivariate Quality Control”, *Encyclopedia of Statistical Sciences*, Vol.6, edited by N.L. Johnson and S. Kotz, Wiley, New York
- Alwan, L.C. (1992), “Effects of Autocorrelation on Control Charts”, *Communications in Statistics-Theory and Methods*, Vol.21
- Alwan, L.C. and Roberts, H.V. (1988), “Time Series Modeling for Statistical Process Control”, *Journal of Business and Economic Statistics*, Vol.6
- Anderson, E.A. and Dian, J. (1996), “Using process control chart techniques to analyze crime rates in Houston, Texas”, *Journal of the Operational Research Society*, Vol.47 No.7, pp.871-881
- Anderson, M.J. and Thompson, A.A. (2004), “Multivariate Control Charts for Ecological and Environmental Monitoring”, *Ecological Applications*, Vol.14, pp.1921-1935
- Anuradha, S. and Feyi-Waboso, A. (2005), “The use of control charts in monitoring endophthalmitis”, *ACTA Ophthalmologica Scandinavica*, Vol.84 No.3, pp.440-441
- Atienza, O.O., Ang, B.W. and Tang, L.C. (1997), “Statistical process control and forecasting”, *International Journal of Quality Science*, Vol.2 No.1, pp.37-51
- Baik, S. W., Kim, W. and Kim, B. (2009), “In-Situ Detection of Plasma Processing Equipment Using a V-Mask Control Chart”, *Materials and Manufacturing Processes*, Vol.24 No.12, pp.1418-1422
- Baldassarre, M.T, Boffoli, N. and Caivano, D. (2010), “Statistical Process Control for Software: Fill the Gap”, *Quality Management and Six Sigma*, Vol.8, pp.135-154

- Barnard, G.A. (1959), "Control Charts and Stochastic Processes", *Journal of the Royal Statistical Society*, (B), Vol.21
- Baum, D.H., Ward, S., Baum, C.L., Lee, N., Polson, D.D. and Harris D.L., (2005), "Statistical process control methods used to evaluate the serologic responses of pigs infected with three Salmonella serovars", *Journal of Swine Health and Production*, Vol.13, pp.304-313
- Ben-Daya, M. and Rahim, M.A., (2000), "Effect of maintenance on the economic design of x-control chart", *European Journal of Operational Research*, Vol.120, pp.131-143
- Benneyan, J.C., Lloyd, R.C. and Plsek P.E. (2003), "Statistical process control as a tool for research and health care improvement", *Quality and Safety in Healthcare*, Vol.12, pp.458-464
- Berlemann, M., Freese, J. and Knoth, S. (2012), "Eyes wide shut? The U.S. house market bubble through the lense of statistical process control", *CESifo Working Paper: Monetary Policy and International Finance*, No.3962
- Bersimis, S., Psarakis, S. and Panaretos, J. (2007), "Multivariate Statistical Process Control Charts: An Overview", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol.23(5), pp.517-543
- Bersimis, S. and Triantafyllopoulos, K. (2012), "Space-Time Monitoring of Air-Quality", *submitted*
- Berthouex, P.M., Hunter, W.G. and Pallesen, L. (1978), "Monitoring Sewage Treatment Plants: Some Quality Control Aspects", *Journal of Quality Technology*, Vol.10
- Bodnar, O. and Schmid, W. (2007), "Surveillance of the mean behavior of multivariate time series", *Statistica Neerlandica*, Vol.61, pp.383-406
- Boggs, P.B., Wheeler, D., Washburne, W.F. and Hayati, F. (1998), "Peak expiratory flow rate control chart in asthma care: chart construction and use in asthma care", *Annals of Allergy, Asthma, and Immunology*, Vol.81 No.6, pp.552-62
- Box, G.E.P., Jenkins, G.M. and Reinsel, G.C. (1994), *Time Series Analysis, Forecasting and Control*, 3rd edition, Prentice
- Callahan, C.D. and Griffen, D.L. (2003), "Applying statistical process control techniques to emergency medicine: A primer for providers", *Academic Emergency Medicine*, Vol.10 No.8, pp.883-890
- Cangussu, J.W., DeCarlo, R.A. and Mathur, A.P. (2003), "Monitoring the Software Test Process Using Statistical Process Control: A Logarithmic Approach", *ESEC/FSE 2003*, Vol.28 No.5, pp.158-167
- Cannon, J., Krokmal, P.A., Chen, Y. and Murphey, R. (2012), "Detection of Temporal Changes in Psychophysiological Data Using Statistical Process Control Methods", *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, Vol.107, pp.367-381
- Cartwright, G. and Hogg, B. (1996), "Case studies: measuring processes for profit", *The TQM Magazine*, Vol.8 No.1, pp.26-30

- Cassady, C.R., Bowden, R.O., Liew, L. and Poho, E.A. (2000), "Combining preventive maintenance and statistical process control: a preliminary investigation", *IIE Transactions*, Vol.32, pp.471-8.
- Chen, T., Chung, K., Hu, Fu-Ch., Fan, Ch. and Yang, M., (2010), "The use of statistical process control (risk-adjusted CUSUM, risk-adjusted RSPRT and CRAM with prediction limits) for monitoring the outcomes of out-of-hospital cardiac arrest patients rescued by the EMS system", *Journal of Evaluation in Clinical Practice*, Vol.17, pp.71-77
- Chen, T., Yun-Jau, Shei-Ling Ku, Kuo-Piao (2009), "Statistical process control as a tool for controlling operating room performance", *Journal of Evaluation in Clinical Practice*, Vol.16, pp.905-910
- Chesher, D. and Burnett, L. (1996), "Using Shewhart p control charts of external quality-assurance program data to monitor analytical performance of a clinical chemistry laboratory", *Clinical Chemistry*, Vol.42 No.9, pp.1478-82
- Chiam, PJT, Feyi-Waboso, A. (2008), "The use of control charts in monitoring postcataract surgery endophthalmitis", *Eye*, Vol.23, pp.1028–1031
- Clark, D.E., Cushing, B.M. and Bredenberg, C.E. (1998), "Monitoring hospital trauma mortality using statistical process control methods", *Journal of the American College of Surgeons*, Vol.186 No.6, pp.630-5
- Cook, G.E., Maxwell, J.E., Barnett, R.J. and Strauss, A.M. (1997), "Statistical process control application to weld process", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol.33 No.2, pp.454-63
- Cordero-Coma, M., Yilmaz, T., Padula, W., Rodriguez, E. and Lanier, S. (2010), "Statistical process control charts for ophthalmology", *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, Vol.249, No.7, pp.1103–1105
- Crandall W.V., Margolis P.A., Kappelman M.D. *et al.* (2012), "Improved outcomes in a quality improvement collaborative for pediatric inflammatory bowel disease", *Pediatrics*, Vol.129, pp.e1030–41
- Crosier, R.B. (1988), "Multivariate Generalizations of Cumulative Sum Quality Control Schemes", *Technometrics*, Vol.30
- Crowder, S.V. (1987a), "A Simple Method for Studying Run-Length Distributions of Exponentially Weighted Moving Average Charts", *Technometrics*, Vol.29
- Crowder, S.V. (1989), "Design of Exponentially Weighted Moving Average Schemes", *Journal of Quality Technology*, Vol.21
- Crowder, S.V., and M. Hamilton (1992), "An EWMA for Monitoring a Process Standard Deviation", *Journal of Quality Technology*, Vol.24
- Curran ET, Benneyan JC, Hood J. (2002), "Controlling methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*: a feedback approach using annotated statistical process control charts", *Infection Control and Hospital Epidemiology*, Vol.23 No.1, pp.13-18

- Doherty, J.A., Reichley, R.M., Noirot, L.A., Resetar, E., Hodge, M.R., Sutter, R.D., Dunagan, C. and Bailey, T.C. (2003), "Monitoring Pharmacy Expert System Performance Using Statistical Process Control Methodology", *AMIA 2003 - Annual Symposium Proceedings*, pp.205–209
- Domangue, R. and Patch, S. (1991), "Some omnibus exponentially weighted moving average statistical process monitoring schemes", *Technometrics*, Vol.33, p.299–313
- Duclos, A., Touzet, S., Soardo, P., Colin, C., Peix, J.L. and Lifante, C. (2009), "Quality Monitoring in Thyroid Surgery Using the Shewhart Control Chart", *British Journal for Surgery*, Vol.96, pp.171-174
- Dull, R.B. and Tegarden, D. (2004), "Using control charts to monitor financial reporting of public companies", *International Journal of Accounting Information System*, Vol.5, pp.109 -127
- Duncan, F. and Haigh, C. (2013), "Measuring and improving the quality of postoperative epidural analgesia for major abdominal surgery using statistical process control charts", *Journal of Clinical Nursing*, Vol.22, pp.2748–2757
- Dzik, W., Beckman, N., Selleng, K., Heddle, N., Szczepiorkowski, Z., Wendel, S. and Murphy, M. (2008), "Errors in patient specimen collection: application of statistical process control", *Transfusion Practice*, Vol.48, pp.2143-2151
- Fasting, S. and Gisvold S.E. (2003), "Statistical process control methods allow the analysis and improvement of anesthesia care", *Canadian Journal of Anesthesia*, Vol.50 No.8, pp.767-774
- Fricker, Jr. R.D. (2006), "Directionally Sensitive Multivariate Statistical Process Control Procedures with Application to Syndromic Surveillance", *International Society for Disease Surveillance*, Vol.3 No.1, pp.1-17
- Frisén, M. (2009), "Optimal Sequential Surveillance for Finance, Public Health, and Other Areas", *Sequential Analysis: Design Methods and Applications*, Vol.28:3, pp.310-337
- Frisén, M. and Andersson, E. (2009), "Semiparametric Surveillance of Monotonic Changes" *Sequential Analysis: Design Methods and Applications*, Vol.28:4, pp.434-454
- Gardiner, J.S. (1987), *Detecting Small Shifts in Quality Levels in a Near-Zero Defect Environment for Integrated Circuits*, Ph.D. Dissertation, Department of Mechanical Engineering, University of Washington, Seattle, WA
- Gardiner, S.C. and Mitra, A. (1994), "Quality control procedures to determine staff allocation in a bank", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol.11 No.1, pp.6-21
- Gentleman, R.C., Hamada, M.S., Matthews, D.E. and Wilson, A.R. (1994), "Statistical quality control of HIV-1 ELISA test performance", *Journal of the American Statistical Association*, Vol.89 No.428, pp.1200-8
- Golosnoy, W., Okhrin, I., Ragulin, S. and Schmid, W. (2011), "On the application of SPC in finance", *Frontiers in Statistical Quality Control*, Vol.9, pp.119–132

- Green, R.S. (1999), "The application of statistical process control to manage global client outcomes in behavioral healthcare", *Evaluation and Program Planning*, Vol.22, pp.199-210
- Griffen, D., Callahan, Ch., Markwell, S., Cruz, J., Milbrandt, J. and Harvey, T. (2012), "Application of Statistical Process Control to Physician-specific Emergency Department Patient Satisfaction Scores: A Novel Use of the Funnel Plot", *Official Journal of the Society for Academic Emergency Medicine*, Vol.19, pp.348-355
- Hand, R., Piontek, R., Klemka-Walden, L. and Inczauskis, D. (1994), "Use of statistical control charts to assess outcomes of medical care: pneumonia in medicare patients", *The American Journal of the Medical Sciences*, Vol.307 May, pp.329-34
- Hanna, D.M., Raichura, N. and Bernardes, E. (2012), "Using Statistical Process Control to Enhance Student Progression", *Journal of Learning in Higher Education*
- Hansen, E., Godwin, R., Wood, D. and Turner, L. (1996), "Early detection of feedwater-heater leaks", *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, Vol.118, January, pp.198-203.
- Harris, T.J. and Ross, W.H. (1991), "Statistical Process Control Procedures for Correlated Observations", *Canadian Journal of Chemical Engineering*, Vol.69
- Hawkins, D.M. (1981), "A CUSUM for a Scale Parameter", *Journal of Quality Technology*, Vol.13
- Hawkins, D.M. (1991), "Multivariate Quality Control Based on Regression Adjusted Variables", *Technometrics*, Vol.33
- Hawkins, D.M. (1993a), "Cumulative Sum Control Charting: An Underutilized SPC Tool", *Quality Engineering*, Vol.5
- Hawkins, D.M. (1993b), "Regression Adjustment for Variables in Multivariate Quality Control", *Journal of Quality Technology*, Vol.25
- Hayes, G.D., Seallan, A.J. and Wong, J.H.F. (1997), "Applying statistical process control to monitor and evaluate the hazard analysis critical control point hygiene data", *Food Control*, Vol.8 No.4, pp.173-6
- Hicks, C.R. (1955), "Some Applications of Hotteling's T²", *Industrial Quality Control*, Vol.11
- Hill, J.F. (1996), "Monitoring information and materials to enhance logistics performance", *Logistics Information Management*, Vol.9 No.2, pp.10-15
- Hong, G.Y., Xie, M. and Shanmugan, P. (1999), "A statistical method for controlling software defect detection process", *Computers & Industrial Engineering*, Vol.37 No.1-2, pp.137-40
- Ipek, H., Ankara, H. and Ozdag, H. (1999), "The application of statistical process control", *Minerals Engineering*, Vol.12 No.7, pp.827-35
- Iyer, S., Anderson, J., Slicker, J., Beekman, R. and Lannon, C. (2011), "Using Statistical Process Control to Identify Early Growth Failure Among Infants With Hypoplastic Left Heart Syndrome", *World Journal for Pediatric and Congenital Heart Surgery*, Vol.2 No.4, pp.576-585

- Jackson J.E. (1972), "All Count Distributions Are Not Alike", *Journal of Quality Technology*, Vol.4
- Jackson, J.E. (1956), "Quality Control Methods for Two Related Variables", *Industrial Quality Control*, Vol.12
- Jackson, J.E. (1959), "Quality Control Methods for Several Related Variables", *Technometrics*, Vol.1
- Jackson, J.E. (1985), "Multivariate Quality Control", *Communications in Statistics – Theory and Methods*, Vol.14
- Jennings, A.D. and Drake, P.R. (1997), "Machine tool condition monitoring using statistical quality control charts", *International Journal of Tools Manufacture Design, Research and Application*, Vol.37 No.9, pp.1243-9
- Jensen, J.B. and Markland, R.E. (1996), "Improving the application of quality conformance tools in service firms", *Journal of Services Marketing*, Vol.10 No.1, pp.35-55
- Jiang, W., Au, T. and Tsui, K. (2007), "A Statistical Process Control Approach to Business Activity Monitoring", *IIE Transactions*, Vol.39 No.3, pp.235-249
- JiJi R., Hammond, M., Williams, F. and Rose-Pehrsson, S. (2003), "Multivariate statistical process control for continuous monitoring of networked early warning fire detection (EWFD) systems", *Sensors and Actuators*, Vol.B93, pp.107–116
- Johnson, N.L., and S. Kotz (1969), *Discrete Distributions*, Houghton Mifflin, Boston
- Jun, C. and Suh, S. (1999), "Statistical tool breakage detection schemes based on vibration signals in NC milling", *International Journal of Machine Tools and Manufacture Design, Research and Application*, Vol.39, pp.1733-46
- Kahn, M.G., Bailey, T.C., Steib, S.A., Fraser, V.J. and Dunagan, W.C. (1996), "Statistical process control methods for expert system performance monitoring", *Journal of the American Medical Informatics Association*, Vol.3 No.4, pp.258-69
- Karvounidis, T., Chimos, K., Bersimis, S. and Douligeris, C. (2014), "Evaluating Web 2.0 technologies in higher education using students' perceptions and performance", *Journal of Computer Assisted Learning*
- Katter, J.G. Jr, Tu, J.F., Monacelli, L.E. and Gartner, M. (1998), "Predictive cathode maintenance of an industrial laser using statistical process control charting", *Journal of Laser Applications*, Vol.10 No.4, pp.161-9
- Kegel, T.M. (1996), "Statistical control of a pressure instrument calibration process", *ISA Transactions*, Vol.35, pp.69-77
- Kirkham, J.J., Bouamra, O. (2008), "The Use of Statistical Process Control for Monitoring Institutional Performance in Trauma Care", *The Journal of Trauma*, Vol.65 No.6, pp.1494-1501
- Koksalan, M., Erkip, N. and Moskowitz, H. (1999), "Explaining beer demand: a residual modeling regression approach using statistical process control", *International Journal of Production Economics*, Vol.58, pp.165-76

- Konrad, C., Gerber, H.R., Schuepfer, G. and Schmucki, O. (1998), "Transurethral resection syndrome: effect of the introduction into clinical practice of a new method for monitoring fluid absorption", *Journal of Clinical Anesthesia*, Vol.10, pp.360-5
- Koutras, M.V., Bersimis S. and Maravelakis, P.E. (2007), "Statistical Process Control using Shewhart Control Charts with Supplementary Runs Rules", *Methodology and Computing in Applied Probability*, Vol.9(2), pp.207-224
- Kovářík, M. and Klímek, P. (2012), "The Usage of Time Series Control Charts for Financial Process Analysis", *Journal of Competitiveness*, Vol.4, pp.29
- Lee Ann, H. (2009), "The Use of Statistical Control Charts to Monitor and Improve the Management of Education Department Resources", *Journal for Nurses in Staff Development*, Vol.25 No.3, pp.118-124
- Leu, S.S., Lin, Y., Chen, T. and Ho, Y.Y. (2006), "Improving Traditional Earned Value Management by Incorporating Statistical Process Charts", *International Symposium on Automation and Robotics in Construction 2006*, pp.275-280
- Lowry, C.A. and D.C. Montgomery (1995), "A Review of Multivariate Control Charts", *IIE Transactions*, Vol. 26
- Lowry, C.A., W.H. Woodall, C.W. Champ, and S.E. Rigdon (1992), "A Multivariate Exponentially Weighted Moving Average Control Chart", *Technometrics*, Vol.34
- Lucas, J.M., and M.S. Saccucci (1990), "Exponentially Weighted moving Average Control Schemes: Properties and Enhancements", *Technometrics*, Vol.32
- MacCarthy, B.L. and Wasusri, Th. (2001), "A Review of non-standard Applications of Statistical Process Control (SPC) Charts", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol.19 No.3, pp.295-320
- MacGregor, J.F., and T.J. Harris (1993), "The Exponentially Weighted Moving Variance", *Journal of Quality Technology*, Vol.25
- Maheswaran, S.K. U. (2009), "Statistical Process Control analysis for Monitoring of dangerous Hospital acquired infections", *International Journal of Pure and Applied Mathematics*, Vol.57 No.4, pp.593-603
- Maragah, H.O. and Woodall, W.H. (1992), "The Effect of Autocorrelation on the Retrospective X-chart", *Journal of Statistical Computation and Simulation*, Vol.40
- Marks, N.B. and O'Connell R.T. (2003), "Using Statistical Control Charts to Analyze Data from Student Evaluations of Teaching", *Decision Sciences Journal of Innovative Education*, Vol.1 No.2, pp.259-272
- Mataragas, M., Drosinos, E.H., Tsola, E. and Zoiopoulos P.E. (2012), "Integrating statistical process control to monitor and improve carcasses quality in a poultry slaughterhouse implementing a HACCP system", *Food Control*, Vol.28, pp. 205-211
- Matias, R., de Araujo, L.B. and Araujo, M.F.C. (2010), "Quality monitoring of network traffic forecasts using statistical process control", *ISCC, IEEE*, pp. 393-398
- Maul, G.P., Richardson, R. and Jones, B. (1996), "Statistical process control applied to gas metal arc welding", *Computers and Industrial Engineering*, Vol.31 No.1/2, pp.253-6
- Maurer, D., Mengel, M., Robertson, G., Gerlinger, T. and Lissner, A. (1998), "Statistical process control in sediment pollutant analysis", *Environmental Pollution*, Vol.104, pp.21-

- Mertens, W.C., Hoople N.E., Rodrigues C., Lindenauer P.K. and Benjamin E.M. (2004), "Associations of date of admission to cancer patient survival on a large regional hospice: Utility of a statistical process control analysis", *American Journal of Hospice and Palliative Medicine*, Vol.21 No.4, pp.275-284
- Minne, L., Eslami, S., Keizer, N., Jonge, E., Rooij, S. and Abu-Hanna, A. (2011), "Statistical process control for validating a classification tree model for predicting mortality – A novel approach towards temporal validation", *Journal of Biomedical Informatics*, Vol.45, pp.37–44
- Minne, L., Eslami, S., Keizer, N., Jonge, E., Rooij, S. and Abu-Hanna, A. (2012), "Statistical process control for monitoring standardized mortality ratios of a classification tree model", *Methods Inf Med*, Vol.51(4), pp.353 –358.
- Model, F., Konig, T., Piepenbrock, C., Adorjan, P. (2002), "Statistical process control for large scale microarray experiments", *Bioinformatics*, Vol.18, pp.S155–S163
- Mohammadian, F. and Amiri, A. (2013), "Economic-Statistical Design of Acceptance Control Chart", *Qual. Reliab. Engng. Int.*, Vol.29, pp.53–61
- Montgomery, D.C. (2001), *Introduction to Statistical Quality Control*, 4th ed., New York: Wiley
- Montgomery, D.C. (2004), *Introduction to Statistical Quality Control*, 5th ed., New York: Wiley
- Montgomery, D.C. (2009), *Introduction to Statistical Quality Control*, 6th ed., New York: Wiley
- Montgomery, D.C., and H.M. Wadsworth, Jr (1972), "Some Techniques for Multivariate Quality Control Applications", *ASQC Technical Conference Transactions*, Washington, DC
- Montgomery, D.C. and Friedman, J.J. (1989), "Statistical Process Control in a Computer-Integrated Manufacturing Environment", *Statistical Process Control in Automated Manufacturing, Series in Quality and Reliability*, New York
- Montgomery, D.C. and Mastrangelo, C.M. (1991), "Some Statistical Process Control Methods for Autocorrelated Data", *Journal of Quality Technology*, Vol.23
- Montgomery, D.C., Johnson, J.S. and Gardiner, J.S. (1990), *Forecasting and Time Series Analysis*, 2nd edition, McGraw-Hill, New York
- Morton, A. P., Whitby, M., McLaws, M.-L., Dobson, A., McElwain, S., Looke, D., Stackelroth, J. and Sartor, A. (2001), "The application of statistical process control charts to the detection and monitoring of hospital-acquired infections", *Journal of Quality in Clinical Practice*, p.p.112–117
- Murphy, R.Y., Osaili, T., Beard, B.L., Marcy, J.A. and Duncan, L.K. (2005), "Application of statistical process control, sampling, and validation for producing *Listeria monocytogenes*-free chicken leg quarters processed in steam followed by impingement cooking", *Food Microbiology*, Vol.22, pp.47–52
- Ng, C. and Case, K. (1989), "Development and evaluation of control charts using exponentially weighted moving averages", *Journal of Quality Technology*, Vol.21, p.242–250

- Nijhuis, A., de Jong, S. and Vandeginste, B.G.M. (1999), "The application of multivariate quality control in gas chromatography", *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, Vol.47, pp.107-25
- Ning, X. and Tsung, F. (2012), "A density-based statistical process control scheme for highdimensional and mixed-type observations", *IIE Transactions*, Vol.44:4, pp.301-311
- Noskievicova, D. (2009), "Statistical Analysis of the Blast Furnace Process Output Parameter using ARIMA Control Chart with Proposed Methodology of Control Limits Setting", *Metalurgija*, Vol.48, pp.281-284
- Page, E.S. (1954), "Continuous Inspection Schemes", *Biometrika*, Vol.41(1/2), pp.100–115
- Parasuraman, A., Zeithaml, V.A. and Berry, L.L. (1988), "SERVQUAL: a multiple-item scale for measuring consumer perceptions of service quality", *Journal of Retailing*, Spring, pp.12-37
- Paul, W.L. and Barnett, N.S. (1995), "Control charting instrumental analyses", *Laboratory Automation and Information Management*, Vol.31, pp.141-8
- Piccirillo, J.F. (1996), "The use of patient satisfaction data to assess the impact of continuous quality improvement efforts", *Archives of Otolaryngology-Head & Neck Surgery*, Vol.122 No.10, pp.1045-8
- Pignatiello, J.J. and Runger, G.C. (1990), "Comparison of Multivariate CUSUM Charts", *Journal of Quality Technology*, Vol.22
- Polit, D. and Chaboyer, W. (2012), "Statistical Process Control in Nursing Research", *Research in Nursing & Health*, Vol.35, pp.82–93
- Prabhu, S.S. and Runger, G.C. (1997), "Designing a Multivariate EWMA Control Chart", *Journal of Quality Technology*, Vol.29, No.1
- Roberts, S.W. (1959), "Control Chart Tests Based on Geometric Moving Averages", *Technometrics*, Vol.1
- Rodriguez, R. and Rainsdell, B. (2010), "Statistical process control for health care quality improvement using SAS/QS software", *SAS Institute Inc.*, Cary, NC
- Safaei, A.S., Kazemzadeh, R.B. and Niaki, S.T.A (2012), "Multi-objective economic statistical design of X-bar control chart considering Taguchi loss function", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.59, pp.1091–1101
- Sanghangthum, T., Suriyapee, S., Srisatit, S. and Pawlicki, T. (2012), "Statistical process control analysis for patient-specific IMRT and VMAT QA", *Journal of Radiation Research 2013*, Vol.54, pp.546–52
- Schiöler, L. and Frisén, M. (2012), "Multivariate outbreak detection", *Journal of Applied Statistics*, Vol.39:2, pp.223-242
- Seim, A., Andersen, B. and Warren, S. (2006), "Statistical Process Control as a Tool for Monitoring Nonoperative Time", *Anesthesiology*, Vol.105, pp.370-380
- Sheaffer, R.L. and Leavenworth R.S. (1976), "The Negative Binomial Model for Counts in Units of Varying Size", *Journal of Quality Technology*, Vol.8
- Shmueli, G. and Burkom, H. (2010), "Statistical challenges facing early outbreak detection in biosurveillance", *Technometrics*, Vol.52, pp.39–51

- Shmueli, G. and Fienberg, S.E. (2006), "Current and potential statistical methods for monitoring multiple data streams for bio-surveillance", *In Statistical Methods in Counter-Terrorism*, pp.109-140
- Smith, I.R., Garlick, B., Gardner, M.A., Brighthouse, R.D., Foster, K.A. and Rivers J.T. (2013), "Use of graphical statistical process control tools to monitor and improve outcomes in cardiac surgery", *Heart Lung and Circulation*, Vol.22, pp.92–99
- Spiegelhalter, D., Sherlaw-Johnson, C., Bardsley, M., Blunt, I., Wood, C. and Grigg, O. (2012), "Statistical methods for healthcare regulation: rating, screening and surveillance", *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (Statistics in Society)*, Vol.175, pp.1–47
- Sulek, J.M., Lind, M.R. and Maruchek, A.S. (1995), "Assessing the outcomes of quality improvement interventions: the role of X chart methodology", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol.12 No.9, pp.170-82
- Sullivan, J.H., and Woodall W.H. (1995), "A Comparison of Multivariate Quality Control Charts for Individual Observations", *Journal of Quality Technology*, Vol.27
- Sweet, A. (1986), "Control charts using coupled exponentially weighted moving averages", *IIE Transactions*, Vol.18, p.26–33
- Tesfaye, S., Barry, D., Gobeze, A.G., *et al.* (2014), "Improving coverage of postnatal care in rural Ethiopia using a community-based, collaborative quality improvement approach", *J Midwifery Womens Health*, Vol.59, pp.S55–S64
- Tracy, N.D., Young J.C., and Mason R.L. (1992), "Multivariate Control Charts for Individual Observations", *Journal of Quality Technology*, Vol.24
- Varona, M.A., Soriano, A., Aguirre-Jamine, A. *et al.* (2012), "Statistical quality control charts for liver transplant process indicators. Evaluation of a single-center experience", *Transplantation Proceedings*, Vol.44, pp.1517–1522
- Vassilakis, E. and Besseris, G. (2010), "The use of SPC tools for a preliminary assessment of an aeroengines' maintenance process and prioritization of aero engines' faults", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, Vol.16 No.1, pp.5-22
- Vitez, T.S. and Macri, A. (1998), "Setting performance standards for an anaesthesia department", *Journal of Clinical Anaesthesia*, Vol.10, March, pp.166-75
- Wahab, M. and El-Enein, N. (2009), "Statistical Process Control for Cancelled Operations at the Paediatric Surgery Department of a University Hospital in Alexandria", *J Egypt Public Health Association*, Vol.85 No.5&6, pp.405-421
- Wardell, D.G. and Candia, M.R. (1996), "Statistical process monitoring of customer satisfaction survey data", *Quality Management Journal*, Vol.3 No.4, pp.36-50
- Woodall, W.H. (2006), "The Use of Control Charts in Health Care and Public Health Surveillance", *Journal of Quality Technology*, Vol.38, pp. 89-104
- Woodall, W.H., Adams, B.M., and Benneyan, J.C. (2011), "The Use of Control Charts in Healthcare", *Statistical Methods in Healthcare*
- Wortham, A.W. and Heinrich, G.F. (1972), "Control Charts Using Exponential Smoothing Techniques," *Annual Conference Transactions, American Society for Quality Control, Milwaukee, Wisconsin*, p.451 -458

- Wortham, A.W. and Ringer, L.J. (1971), "Control Via Exponential Smoothing," *The Logistics Review*, Vol.7, p.33-40
- Ye, N. and Chen, Q. (2001), "An anomaly detection technique based on a chi-square statistic for detecting intrusions into information systems", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol.17, pp.105–112
- Zhao, Y., Wang, S.W. and Xiao, F. (2013), "A statistical fault detection and diagnosis method for centrifugal chillers based on exponentially-weighted moving average control charts and support vector regression", *Applied Thermal Engineering*, Vol.51, pp.560–572
- Zimmerman, S.M., Dardeau, M.R., Crozier, G.F. and Wagstaff, B. (1996), "The second battle of mobile bay - using SPC to control the quality of water monitoring", *Computers and Industrial Engineering*, Vol.31 No.1-2, pp.257-60

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ