

ΕΛΙΣΑΒΕΤ ΠΑΠΑΧΡΙΣΤΟΔΟΥΛΟΥ

ΤΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΕΞΙ ΣΙΓΜΑ ΜΕ ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ R

*Η ΠΑΡΟΥΣΑ ΔΙΑΤΡΙΒΗ
ΕΚΠΝΟΗΘΗΚΕ ΣΤΟ ΤΜΗΜΑ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΩΣ ΜΕΡΙΚΗ ΙΚΑΝΟΠΟΙΗΣΗ ΤΩΝ ΑΠΑΙΤΗΣΕΩΝ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΠΟΚΤΗΣΗ ΤΟΥ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ ΣΤΗΝ
ΣΤΑΤΙΣΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ*



Τμήμα Μαθηματικών, Πανεπιστήμιο Αιγαίου,
Σάμος, 20 Φεβρουαρίου 2018

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Αθανάσιος Ρακιτζής, Επικ. Καθηγητής, Επιβλέπων Καθηγητής

Αλέξανδρος Καραγρηγορίου, Καθηγητής, Μέλος

Τζων Τσιμήκας, Αναπλ. Καθηγητής,, Μέλος

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στα πλαίσια του Μεταπτυχιακού Προγράμματος Σπουδών «Στατιστική και Ανάλυση Δεδομένων» του τμήματος Μαθηματικών με Κατεύθυνση Στατιστική και Αναλογιστικά Χρηματοοικονομικά Μαθηματικά του Πανεπιστημίου Αιγαίου. Στο σημείο αυτό θα ήθελα να εκφράσω τις ελικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους του καθηγητές και συναδέλφους μου στο μεταπτυχιακό πρόγραμμα. Ιδιαίτερα όμως νιώθω την ανάγκη να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα καθηγητή μου κ. Αθανάσιο Ρακιτζή, ο οποίος συνέβαλε καθοριστικά στην επιτυχή ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας. Θα ήθελα να τον ευχαριστήσω για τις πολύτιμες συμβουλές και την καθοδήγησή του καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της συγκεκριμένης διπλωματικής.

Τέλος θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, η οποία με στηρίζει οικονομικά και συναισθηματικά όλα αυτά τα χρόνια προκειμένου να ολοκληρώσω τον κύκλο σπουδών μου. Ευχαριστώ επίσης τον σύντροφό μου, Αλέξανδρο, ο οποίος ήταν συνεχώς στο πλάι μου και με στήριζε.

Πίνακας Περιεχομένων

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1_ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2_ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΤΟ ΕΞΙ ΣΙΓΜΑ	15
2.1. Εισαγωγή	15
2.2. Ορισμοί.....	15
2.3. Ιστορική Αναδρομή.....	16
2.4. Μεθοδολογία 6σ	16
2.5. Ο Κύκλος DMAIC.....	19
2.5.1. Φάση Ορισμού.....	19
2.5.2. Φάση Μέτρησης	20
2.5.3. Φάση Ανάλυσης.....	20
2.5.4. Φάση Βελτίωσης.....	21
2.5.5. Φάση Ελέγχου	21
2.6.Λειτουργική δομή της μεθοδολογίας 6σ	23
2.7. Σύνοψη	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3_Η ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ R ΓΙΑ ΤΗ ΦΑΣΗ ΟΡΙΣΜΟΥ.....	27
3.1. Εισαγωγή	27
3.2. Χαρτογράφηση Διαδικασίας.....	27
3.2.1. Η Χαρτογράφηση Διαδικασίας ως Μέθοδος Επίλυσης Προβλημάτων.....	28
3.2.2. Στρατηγικές για Χαρτογράφηση Διαδικασίας.....	29
3.2.2.1. Χαρτογράφηση Διαδικασίας Δύο Σταδίων	30
3.2.3. Η Βήμα προς Βήμα Χαρτογράφηση της Διαδικασίας	34
3.2.4. Σχεδιασμός Χάρτη Διαδικασίας με Χρήση του Πακέτου SixSigma	38
3.2.5. Σύνοψη	41
3.3. Συνάρτηση απώλειας με χρήση της R.....	42
3.3.1. Κόστος κακής ποιότητας	42
3.3.2. Μοντελοποίηση της Συνάρτησης Απώλειας.....	45
3.3.3. Η Συνάρτηση Απώλειας του Taguchi.....	45
3.3.4. Συνάρτηση Μέσης Απώλειας	48
3.3.5. Χρήση της Συνάρτησης Απώλειας μέσα στον Κύκλο DMAIC	49
3.3.6. Συνάρτησης Απώλειας με Χρήση του Πακέτου SixSigma	50
3.3.7. Άλλα μοντέλα	54
3.2.8. Σύνοψη	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4_ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ R ΓΙΑ ΤΗ ΦΑΣΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ.....	57
4.1. Εισαγωγή	57

4.2 Ανάλυση Μετρητικού Συστήματος	57
4.2.1. Ορισμοί.....	58
4.2.2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ	59
4.2.2.1. Συλλογή δεδομένων	59
4.2.2.2. Εφαρμογή της Ανάλυσης Διακύμανσης (ANOVA).....	61
4.2.2.3.Αξιολόγηση του Μετρητικού Συστήματος	64
4.2.3. Χρησιμοποιώντας το Πακέτο SixSigma	66
4.2.4.Σύνοψη	73
4.3. Ανάλυση Pareto.....	74
4.3.1 Αρχή Pareto	74
4.3.1.1. Η Αρχή Pareto ως Τεχνική Επίλυσης Προβλημάτων	75
4.3.2. Ανάλυση Pareto σε 6σ	76
4.3.2.1. Προσδιορισμός των αιτιών	77
4.3.2.2.Μέτρηση του αποτελέσματος.....	79
4.3.3.Κατασκευή ενός διαγράμματος Pareto	80
4.3.4. Διαγράμματα Pareto με χρήση της R.....	81
4.3.5. Άλλες χρήσεις του διαγράμματος Pareto	85
4.3.6. Σύνοψη	86
4.4. Ανάλυση Ικανότητας Διεργασίας	87
4.4.1. Προδιαγραφές.....	88
4.4.2. Απόδοση της διαδικασίας.....	89
4.4.3. Διαδικασία εναντίον Προδιαγραφών	94
4.4.4. Δείκτες ικανότητας.....	97
4.4.5. Μελέτη Ικανότητας με το Πακέτο SixSigma	99
4.4.6. Σύνοψη	102
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5_ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ R ΓΙΑ ΤΗ ΦΑΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ	103
5.1. Εισαγωγή	103
5.2. Γραφήματα με την R.....	103
5.3. Χρήση των γραφημάτων	104
5.4. Υπόβαθρο	104
5.5. Ραβδόγραμμα (Bar Chart)	109
5.6.. Ιστόγραμμα.....	112
5.7. Διάγραμμα διασποράς (Scatterplot).....	116
5.8. Διάγραμμα ροής (run chart).....	118
5.9. Διάγραμμα βαθμίδων (tier chart)	121
5.10. Box – Whisker διάγραμμα (Θηκόγραμμα)	123

5.11. Άλλα γραφήματα.....	126
5.11.1. Ομαδικό γράφημα.....	126
5.11.2. Διαγράμματα θέσης	128
5.11.3. Διάγραμμα Multi-Vari.....	128
5.11.4. Περισσότερα σχετικά με τα γραφήματα.....	130
5.12. Σύνοψη	131
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ R ΓΙΑ ΤΗ ΦΑΣΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ.....	133
6.1. Εισαγωγή	133
6.2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ	133
6.3. Η Σημασία του Πειραματισμού.....	134
6.3.1. Μη-Συνεπή δεδομένα	134
6.3.2. Εύρος Τιμών της Μεταβλητής.....	135
6.3.3. Συσχετισμένες μεταβλητές.....	136
6.4. Στρατηγικές πειραματισμού.....	137
6.4.1. Στρατηγικές σχεδιασμού	137
6.4.2. Επίπεδα παραγόντων και αναπαραγωγές	138
6.4.3. Προοδευτικό Πείραμα.....	141
6.4.4. Μοντέλα υποθέσεων	141
6.5. 2k Παραγοντικός Σχεδιασμός.....	143
6.6. Σχεδιασμός πειραμάτων για βελτίωση της διαδικασίας	155
6.7. Σύνοψη	158
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ R ΓΙΑ ΤΗ ΦΑΣΗ ΕΛΕΓΧΟΥ	159
7.1 Εισαγωγή	159
7.2. Έλεγχος διαδικασίας με χρήση της R	159
7.3. Στρατηγικές προστασίας από σφάλματα (Poka – Yoke).....	160
7.4. Βασικά στοιχεία διαγραμμάτων ελέγχου	162
7.4.1. Το γράφημα.....	162
7.4.2. Ερμηνεία διαγραμμάτων.....	163
7.4.3. Στρατηγική Δειγματοληψίας	166
7.5. Σχεδιασμός Διαγραμμάτων Ελέγχου.....	167
7.5.1. Συμβολισμοί για τον Υπολογισμό των Ορίων Ελέγχου	168
7.5.2. Διαγράμματα ελέγχου για μεταβλητές	169
7.5.3. Διαγράμματα ελέγχου για ιδιότητες.....	176
7.6. Σύνοψη	180
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 Μια Μελέτη Περίπτωσης.....	183
8.1. Φάση Ορισμού:	185

8.2. Φάση Μέτρησης:.....	194
8.3. Φάση Ανάλυσης	205
8.4. Φάση Βελτίωσης	210
8.5. Φάση Ελέγχου	218
8.6. Σύνοψη	226
Κεφάλαιο 9_Κριτική - Σχόλια έναντι του 6σ	229
9.1. Διαγράμματα ελέγχου και σχεδιασμός πειραμάτων	229
9.2. 6σ προγράμματα	230
9.2.1. Στοιχεία ενός 6σ προγράμματος	234
9.2.2. 6σ εφαρμογές και προγράμματα	236
9.2.3. Η έννοια 6σ για την ικανοποίηση των πελατών	236
9.2.4. Φτωχό 6σ (Lean Six Sigma -LSS)	237
9.2.5. Σχετικά προγράμματα / άλλες εταιρείες	237
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10_ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ	239
Βιβλιογραφία.....	241

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Στις μέρες μας, ένας σημαντικός παράγοντας επιτυχίας μια επιχείρησης είναι η ποιότητα. Τις τελευταίες δεκαετίες ήρθαν στο προσκήνιο πολλές μεθοδολογίες (προγράμματα) διαχείρισης ποιότητας. Η μεθοδολογία (ή πρόγραμμα) 6σ έχει αναδειχθεί ως μια σημαντική καινοτομία και ουσιαστικά είναι ένα πρότυπο ποιότητας, το οποίο μεταφράζει (ή αποκωδικοποιεί) την εμπλεκόμενη επιστημονική μεθοδολογία σε έναν απλό τρόπο εφαρμογής της επιστημονικής μεθόδου σε έναν οποιονδήποτε οργανισμό. Πιο απλά, σύμφωνα με τον Διεθνή Οργανισμό Τυποποίησης (ISO 13053 – 1: 2011), «Το 6σ μιλά τη γλώσσα των επιχειρήσεων».

Στην παρούσα διπλωματική εργασία, θα ασχοληθούμε με τη μεθοδολογία 6σ χρησιμοποιώντας το λογισμικό ανοικτού κώδικα της R. Πιο συγκεκριμένα, θα διευκρινιστεί η έννοια του σίγμα και θα παρουσιαστεί μια ιστορική αναδρομή του προγράμματος 6σ. Θα γίνει μια εκτενής μελέτη στη μεθοδολογία 6σ και ουσιαστικά θα μελετήσουμε τα στάδια του κύκλου DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) τα οποία είναι η βάση της εν λόγω μεθοδολογίας. Η λειτουργική δομή της μεθοδολογίας θα παρουσιαστεί αναλυτικά, δίνοντας πληροφορίες για κάθε βασικό ρόλο που αναφέρεται στη τυπική δομή εργασιών της.

Εν συνεχεία, θα εμπλακεί το λογισμικό ανοικτού κώδικα της R, το οποίο θα μας βοηθήσει να πραγματοποιήσουμε μία προς μία της φάσης του κύκλου DMAIC. Η φάση ορισμού είναι αυτή στην οποία δηλώνονται οι ανάγκες των πελατών και προσδιορίζονται οι διαδικασίες ή τα προϊόντα τα οποία χρήζουν βελτίωση. Δύο βασικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται στη φάση αυτή είναι η χαρτογράφηση διαδικασίας και η συνάρτηση απώλειας. Θα δούμε κάποιες σημαντικές πτυχές των δύο αυτών εργαλείων και μέσω διαφόρων παραδειγμάτων που εκτελούνται στην R, θα κατανοήσουμε τη σημαντικότητά τους μέσα σε ένα οργανισμό.

Στη δεύτερη φάση του κύκλου, τη φάση μέτρησης, κρίνεται απαραίτητο να προσδιοριστεί η απόδοση των βασικών γραμμών και στόχων της διαδικασίας και να οριστούν οι μεταβλητές καταχώρηση/ αποτέλεσμα της διαδικασίας. Στη εν λόγω φάση θα χρησιμοποιηθούν τρία εργαλεία τα οποία είναι η Ανάλυση μετρητικού

συστήματος, η Ανάλυση Pareto και η Ανάλυση ικανότητας διεργασίας. Πιο συγκεκριμένα, θα δούμε πόσο σημαντικό είναι για το πρότζεκτ μας να έχουμε ένα ικανοποιητικό μετρητικό σύστημα, καθώς εάν η μεταβλητότητά του δεν ελέγχεται τότε η διαδικασία δε μπορεί να βελτιωθεί. Τα παραδείγματα που παρουσιάζονται στη διπλωματική είναι πολύ χρήσιμα για να καταστεί κατανοητή η σημαντικότητα ενός ικανοποιητικού μετρητικού συστήματος. Η Ανάλυση Pareto που μελετάμε στην συνέχεια, είναι χρήσιμη στο να δώσει προτεραιότητα στις πιθανές αιτίες των ελαττωμάτων και να επικεντρωθεί στις πιο σημαντικές. Είναι εύκολα αντιληπτό ότι η αναγνώριση των πιθανών αιτιών που επηρεάζουν τη διαδικασία αλλά και η εστίαση στις πιο σημαντικές, μπορεί να βοηθήσει σημαντικά στη βελτίωση της εν λόγω διαδικασίας. Τέλος μέσω της Ανάλυσης ικανότητας, μπορούμε να μετρήσουμε κατά πόσο η απόδοση της διαδικασίας συμφωνεί με τις απαιτήσεις των πελατών. Είναι εξαιρετικά σημαντικό να μπορεί η διαδικασία να αντεπεξέρχεται στις απαιτήσεις που έχουν οι πελάτες.

Η τρίτη φάση του κύκλου DMAIC είναι η φάση Ανάλυσης, κατά τη διάρκεια της οποίας τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των βασικών καταχωρήσεων της διαδικασίας, καθώς επίσης και της σχέσης τους με τα αποτελέσματα. Στη φάση αυτή είναι χρήσιμα κάποια διαγράμματα, όπως το ιστόγραμμα, το ραβδόγραμμα, το θηκόγραμμα κ.α., τα οποία θα δούμε αναλυτικά χρησιμοποιώντας την R. Στόχος αυτών των διαγραμμάτων είναι να υποστηρίξουν την ερμηνεία των δεδομένων και να καταστήσουν καλύτερα κατανοητή την ήδη δοσμένη ερμηνεία. Επομένως είναι εύκολα αντιληπτό ότι τα διαγράμματα είναι ιδιαίτερα χρήσιμα και σημαντικά σε 6σ πρότζεκτ.

Τέταρτο στάδιο είναι η φάση βελτίωσης, κατά τη διάρκεια της οποίας επαληθεύεται η σχέση μεταξύ των μεταβλητών εισόδου και απόκρισης. Επιπλέον επικυρώνονται στατιστικά οι νέες συνθήκες λειτουργίας της διαδικασίας. Το πιο αντιπροσωπευτικό εργαλείο της φάσης αυτής, που θα μελετήσουμε, είναι ο σχεδιασμός πειραμάτων. Είναι η ουσία της φάσης βελτίωσης και η βάση για το σχεδιασμό ισχυρών διαδικασιών. Τα παραδείγματα που γίνονται με τη βοήθεια της R επιβεβαιώνουν τη σημασία του στη φάση αυτή.

Ολοκληρώνοντας τον κύκλο DMAIC, μελετούμε τη φάση ελέγχου, στην οποία τα κέρδη που προέκυψαν από τις τέσσερις προηγούμενες φάσεις πρέπει να

παρακολουθούνται. Για να γίνει αυτό, θα αναφερθούμε σε στρατηγικές προστασίας από λάθη και σε διαγράμματα ελέγχου, τα οποία είναι τα πιο αντιπροσωπευτικά εργαλεία της εν λόγω φάσης.

Επιπρόσθετα παραθέτουμε κάποιες κριτικές / σχολιασμούς έναντι που 6σ.

Ολοκληρώνοντας τη διπλωματική εργασία, πραγματοποιείται μια μελέτη περίπτωσης. Ουσιαστικά, η μελέτη περίπτωσης αναφέρεται στην κατασκευή ενός ελικοπτέρου χαρτιού, του οποίου ο σχεδιασμός ποικίλει στα φτερά και στο μήκος του σώματος, στο πλάτος του σώματος, στη χρήση κολλητικής ταινίας. Κατά τη διάρκεια της μελέτης περίπτωσης πραγματοποιούνται τα 5 στάδια του κύκλου DMAIC. Περιγράφονται διαδικασίες, λαμβάνονται μετρήσεις, αναλύονται δεδομένα, γίνεται προσπάθεια βελτίωσης διαδικασίας καθώς επίσης ελέγχονται διαδικασίες που σχετίζονται με το ελικόπτερο χαρτιού. Είναι μια πλήρης περίπτωση και ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής της μεθοδολογίας 6σ.

Ως τελευταίο κεφάλαιο παρουσιάζεται μια ανακεφαλαίωση της διπλωματικής παραθέτοντας ταυτόχρονα και κάποια συμπεράσματα τα οποία εξάχθηκαν κατά τη διάρκεια μελέτης της μεθοδολογίας 6σ χρησιμοποιώντας την R.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΤΟ ΕΞΙ ΣΙΓΜΑ

2.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό, ο στόχος είναι να δοθεί ένα απαραίτητο υπόβαθρο για το πρόγραμμα 6σ χρησιμοποιώντας ορισμούς που έχουν δοθεί στη βιβλιογραφία. Παράλληλα θα γίνει και μια σύντομη ιστορική αναδρομή. Στη συνέχεια θα παραθέσουμε τον κύκλο ενεργειών DMAIC (Design, Measure, Analyze, Improve, Control), ο οποίος αποτελεί τη βάση της μεθοδολογίας 6σ, και θα δούμε αναλυτικά τα 5 στάδια του κύκλου αυτού. Τέλος θα παρουσιάσουμε συνοπτικά τη λειτουργική δομή του προγράμματος 6σ και μέσα από αυτή θα διαπιστώσουμε το πόσο σημαντικό είναι για τη σωστή εφαρμογή του προγράμματος, να είναι καλά καθορισμένοι οι ρόλοι μέσα στον οργανισμό.

2.2. Ορισμοί

Οι Rath and Strong (2003), έδωσαν τους παρακάτω δύο απλούς ορισμούς για το 6σ:

Ορισμός 1: *Είναι ένα σύνολο εργαλείων και τεχνικών για τη βελτίωση των διαδικασιών ή διεργασιών, καθώς και των προϊόντων και των υπηρεσιών.*

Ορισμός 1: *Είναι μια προσέγγιση για τη βελτίωση των διαδικασιών ή διεργασιών, καθώς και των επιδόσεων των επιχειρήσεων.*

Η έννοια του σίγμα προέρχεται από το γράμμα σ του ελληνικού αλφαβήτου. Το γράμμα αυτό είναι ο συμβολισμός που χρησιμοποιείται παγκοσμίως για να περιγράψει την τυπική απόκλιση μιας διαδικασίας. Ως γνωστό, στη στατιστική και στη θεωρία πιθανοτήτων, η τυπική απόκλιση αποτελεί μέτρο μεταβλητότητας των τιμών ενός συνόλου σε σχέση με τη μέση τιμή του. Το 6σ σημαίνει έξι τυπικές αποκλίσεις, δηλαδή η απόκλιση των τυχαίων μεταβλητών από το μέσο όρο είναι πάρα πολύ μικρή, έτσι ώστε να υπάρχουν μόνο 3,4 ελαττωματικά προϊόντα στο ένα εκατομμύριο παραγόμενα. Πιο συγκεκριμένα, κατά 99,9997% δεν υπάρχει ελαττωματικό. Άρα το 6σ, είναι ο συνδυασμός της μείωσης της μεταβλητότητας και της ταυτόχρονης

αύξησης της ακρίβειας στον στόχο που έχει τεθεί. Σύμφωνα με τους Oakland (1999) και Breyfogle (1999), όσο πιο υψηλό είναι το επίπεδο σίγμα, τόσο λιγότερο πιθανόν να εμφανιστούν ελαττωματικά σε μια διαδικασία.

2.3. Ιστορική Αναδρομή

Οι πρώτες αναφορές του «6σ» ως πρότυπο μέτρησης μπορούν να αναχθούν στον Γερμανό μαθηματικό Carl Frederick Gauss (1777 -1885), ο οποίος το 1809 δημοσίευσε το βιβλίο «*Theoria Motus Corporum Arithmeticae*» εισάγοντας την έννοια της καμπύλης με κωδωνοειδές σχήμα (ή σχήμα «καμπάνας»). Το 1920 το «6σ» ξεκίνησε να είναι ένα σύμβολο για μια μονάδα μέτρησης σε μια μεταβολή της ποιότητας ενός προϊόντος. Η ουσιαστική ανάπτυξη του 6σ χρονολογείται στα μέσα της δεκαετίας του 1980. Το 6σ πιστώνεται στον στατιστικό Mikel Harry, ο οποίος έδωσε και το όνομα αυτό. Ο Harry δούλεψε εκείνη την εποχή για την εταιρεία Motorola και μαζί με τον Bill Smith, ο οποίος θεωρείται ο «πατέρας» του 6σ, ανέπτυξαν μια μεθοδολογία για επίλυση προβλημάτων ακολουθώντας μια πειθαρχημένη προσέγγιση. Έτσι η Motorola στις 15 Ιανουαρίου του 1987, στηρίχθηκε πάνω σε αυτή τη μεθοδολογία και ξεκίνησε ένα νέο πρόγραμμα ποιότητας, το οποίο ονομάστηκε «*The Six Sigma Quality Program*» (Galvin, 1985, *The Six Sigma Quality Program*).

Η μεθοδολογία 6σ γνώρισε τη μεγαλύτερη επιτυχία της κατά τη δεκαετία του 1990, όταν ο Jack Welch, ο οποίος ήταν Πρόεδρος και Διευθύνων Σύμβουλος της εταιρείας General Electric, χρησιμοποίησε τη μεθοδολογία αυτή ως την κύρια δραστηριότητα της εν λόγω εταιρείας. Η στιγμή αυτή σηματοδότησε το γεγονός ότι το 6σ είναι μια φιλοσοφική διαχείρισή βασισμένη στη λήψη αποφάσεων.

2.4. Μεθοδολογία 6σ

Αφού διευκρινίστηκε τι ακριβώς είναι το 6σ, μπορούμε τώρα να εστιάσουμε στη μεθοδολογία 6σ. Οι Cano et al. (2012) υποστήριξαν ότι η μεθοδολογία 6σ, είναι ουσιαστικά η εφαρμογή της επιστημονικής μεθόδου για τη βελτίωση μιας διαδικασίας. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να διευκρινιστεί η έννοια της διαδικασίας. Μια διαδικασία ορίζεται ως μια ομάδα αλληλεξαρτώμενων ενεργειών, που αποσκοπούν στην επίτευξη ενός στόχου. Είναι πιθανό οι ενέργειες αυτές να

αντιστοιχούν σε άλλες μικρότερες (επιμέρους) διαδικασίες. Η μεθοδολογία 6σ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία τέτοιων νέων διαδικασιών. Όταν όμως δεν υπάρχουν τρέχουσες διαδικασίες ούτως ώστε να εφαρμοστεί η μεθοδολογία 6σ, τότε χρησιμοποιείται ένα σύνολο εργαλείων γνωστό και ως «Σχεδιασμός για τη μεθοδολογία 6σ». Συνεπώς όταν χρησιμοποιούμε τη μεθοδολογία 6σ για τη βελτίωση ή τη δημιουργία μιας νέας διαδικασίας, εφαρμόζουμε την επιστημονική μέθοδο για να αποκτήσουμε διαδικασίες υψηλής ποιότητας. Αυτό γίνεται γιατί οι διαδικασίες υψηλής ποιότητας οδηγούν αυτόματα σε υψηλής ποιότητας τελικά αποτελέσματα, που συχνά αναφέρονται ως «προϊόντα». Θα δώσουμε ένα απλό παράδειγμα για να γίνει σαφές τι εννοούμε υψηλής ποιότητας διαδικασία και γιατί είναι σημαντικό να υπάρχει.

Έστω ότι έχουμε τη διοικητική υπηρεσία αυτόματης δημιουργίας πιστοποιητικού μέσα σε ένα συγκεκριμένο οργανισμό. Σε αυτή τη διαδικασία, υπάρχει μια βάση δεδομένων η οποία αποτελείται από τα ονοματεπώνυμα των ανθρώπων που ζητούν πιστοποιητικό, όπως για παράδειγμα οι υπάλληλοι του οργανισμού. Φανταστείτε ότι το επώνυμό σας είναι «Νικολάου» και αποθηκεύεται λανθασμένα σε αυτήν τη βάση δεδομένων ως «Νοκολάου». Αυτό αυτόματα σημαίνει ότι οποτεδήποτε εσείς ζητήσετε πιστοποιητικό, το επώνυμό σας θα εμφανίζεται με το συγκεκριμένο ορθογραφικό λάθος. Βεβαίως αν εσείς υποβάλλεται ένα παράπονο, το λάθος θα διορθωθεί και το πιστοποιητικό θα είναι σωστό. Ο απλούστερος τρόπος για να γίνει αυτή η διόρθωση, είναι μετά την έκδοση του πιστοποιητικού και την υποβολή του παραπόνου σας, η γραμματέας να διορθώσει το επώνυμο σας, από «Νοκολάου» σε «Νικολάου», με τη βοήθεια π.χ. ενός επεξεργαστή κειμένου. Ωστόσο, το πρόβλημα είναι ότι την επόμενη φορά που εσείς θα ζητήσετε εκ νέου πιστοποιητικό, το επώνυμό σας θα είναι και πάλι λάθος.

Για να μπορέσει να λυθεί αυτό το πρόβλημα, πρέπει να δημιουργηθεί μια αυτόματη διαδικασία η οποία, μόλις λάβει ένα παράπονο για λάθος (π.χ. σε ένα επώνυμο) να στέλνει μια ειδοποίηση αναφοράς του εν λόγω προβλήματος. Έτσι, ο διαχειριστής της βάσης δεδομένων θα διορθώσει με αυτόματο τρόπο το λάθος που υπάρχει στο επώνυμο μέσα στη βάση δεδομένων και το πιστοποιητικό θα εκδοθεί ξανά. Με αυτόν τον τρόπο η διαδικασία θα βελτιωθεί και τα αποτελέσματα που προκύπτουν από αυτή τη διαδικασία, θα έχουν την επιθυμητή ποιότητα.

Παρόλο που και τις δύο προαναφερθείσες περιπτώσεις τα τελικά αποτελέσματα που προκύπτουν είναι αποδεκτά, η (σημαντική) διαφορά είναι ότι στη δεύτερη περίπτωση και τα μελλοντικά αποτελέσματα θα είναι το ίδιο καλά, χάρη στη βελτιωμένη αυτοματοποιημένη διαδικασία. Αντίθετα, στην πρώτη περίπτωση, τα τελικά αποτελέσματα θα παρουσιάζουν και πάλι το ίδιο λάθος, και χρειάζεται κάθε φορά να ακολουθείται η παραπάνω διαδικασία για διόρθωση του προβλήματος. Επομένως η δεύτερη περίπτωση δίνει μια διαδικασία υψηλής ποιότητας.

Για να λάβουμε τη δεύτερη λύση του παραπάνω προβλήματος, αυτή που δίνει τη διαδικασία υψηλής ποιότητας, θα πρέπει να ακολουθηθεί μια σειρά ενεργειών:

- 1) Κάντε μια ερώτηση (π.χ. *γιατί είναι λάθος το πιστοποιητικό;*).
- 2) Κάντε κάποια έρευνα στο παρασκήνιο (τα ονόματα προέρχονται από μια βάση δεδομένων).
- 3) Κατασκευάστε μια υπόθεση (εάν τα ονόματα είναι σωστά στη βάση δεδομένων, τότε θα εμφανίζονται και σωστά στο πιστοποιητικό).
- 4) Ελέγξτε την υπόθεση με ένα πείραμα (δημιουργήστε το πιστοποιητικό για δεύτερη φορά).

Δύο επιπρόσθετα βήματα θα ήταν χρήσιμα:

- 5) Αναλύστε τα δεδομένα και εξαγάγετε συμπεράσματα (π.χ. *ελέγξτε εάν τα προηγούμενα λάθη στη βάση δεδομένων δεν έχουν διορθωθεί, και αυτή είναι η αιτία που συνεχίζουν να παραπονιούνται οι αιτούντες*).
- 6) Ανακοινώστε τα αποτελέσματα (κάντε μια αναφορά η οποία θα περιγράφει τη νέα διαδικασία αντιμετώπισης των καταγγελιών).

Αυτά τα βήματα φαίνονται ως ένας απλός τρόπος σκέψης. Πέραν από αυτούς όμως αντιστοιχούν επακριβώς στα βήματα της επιστημονικής μεθόδου, και όπως θα δούμε παρακάτω είναι τα βασικά σημεία της μεθοδολογίας 6σ . Στη γλώσσα του 6σ , τα βήματα αυτά είναι 5, γνωστά και ως Κύκλος DMAIC (DMAIC Cycle), και συγκεκριμένα έχουν τις ονομασίες: Ορίστε (**D**efine), Μετρήστε (**M**easure), Αναλύστε (**A**nalyze), Βελτιώστε (**I**mprove) και Ελέγξτε (**C**ontrol).

Αυτό που είναι το καινούργιο με την 6σ είναι το γεγονός ότι μεταφράζει την επιστημονική γλώσσα σε έναν κατανοητό τρόπο ούτως ώστε να εφαρμοστεί η επιστημονική μέθοδος σε κάθε οργανισμό. Και αυτό ακριβώς είναι το κλειδί της επιτυχίας της. Στην πραγματικότητα, με την 6σ αντιμετωπίζουμε τα προβλήματα και

βελτιώνουμε τις διαδικασίες χρησιμοποιώντας ένα από τα πιο ισχυρά εργαλεία της ανθρώπινης ανάπτυξης: την επιστημονική μέθοδο.

2.5. Ο Κύκλος DMAIC

Ένα σημαντικό γεγονός το οποίο πρέπει να λαμβάνεται πάντα υπόψη όταν θέλουμε να εφαρμόσουμε τη μεθοδολογία 6σ , είναι ότι τα πρότζεκτ στα οποία θα εφαρμοστεί η μεθοδολογία, πρέπει να είναι καθορισμένα με σαφήνεια. Αφού επιλεχθούν τα πρότζεκτ ή οι διαδικασίες που θα εφαρμοστεί η μεθοδολογία 6σ , η στρατηγική για την επίλυσή τους, ακολουθεί τον κύκλο DMAIC. Ουσιαστικά αυτή είναι η βάση της μεθοδολογίας 6σ. Έτσι λοιπόν κρίνεται αναγκαίο να δοθεί μια σύντομη περιγραφή για τα 5 στάδια του κύκλου.

2.5.1. Φάση Ορισμού

Με τη φάση ορισμού ξεκινά ουσιαστικά η επίλυση του προβλήματος. Αρχικά όμως είναι σημαντικό να καθοριστεί αν η μεθοδολογία 6σ είναι όντως κατάλληλη για την επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος. Το βασικό κλειδί για τη συγκεκριμένη φάση του κύκλου DMAIC είναι ο χάρτης προγράμματος (project charter). Ένας χάρτης προγράμματος είναι μια δήλωση του πεδίου εφαρμογής, των στόχων και των συμμετεχόντων σε ένα πρότζεκτ. Πιο συγκεκριμένα καθορίζει τους ρόλους και τις ευθύνες, περιγράφει συνοπτικά τους στόχους του πρότζεκτ, αναγνωρίζει τους κύριους συμμετέχοντες και ορίζει την αρχή του πρότζεκτ.

Οι σημαντικές πτυχές του χάρτη προγράμματος είναι οι εξής τέσσερις:

- Η επιχειρησιακή περίπτωση (δηλαδή μια σύντομη περιγραφή του επιχειρησιακού προβλήματος)
- Η δήλωση του προβλήματος
- Η δήλωση του στόχου
- Το πεδίο εφαρμογής του πρότζεκτ.

Επιπλέον στη φάση ορισμού, η ομάδα που είναι υπεύθυνη για αυτήν, αναπτύσσει μια λίστα με τα κρίσιμα για την ποιότητα (*Critical To Quality*, CTQ) χαρακτηριστικά.

2.5.2. Φάση Μέτρησης

Η φάση μέτρησης είναι το δεύτερο στάδιο του κύκλου DMAIC. Ο σκοπός της είναι η συλλογή όσο το δυνατόν περισσότερων πληροφοριών από την τρέχουσα διαδικασία. Πρώτα όμως πρέπει να αποφασιστεί επακριβώς πως λειτουργεί η διαδικασία. Οι βασικές δουλειές που εκτελούνται στην φάση μέτρησης είναι οι εξής τρεις:

- Η δημιουργία ενός λεπτομερούς χάρτη διαδικασίας
- Η συλλογή βασικών δεδομένων
- Μια περίληψη των δεδομένων που συλλέχθηκαν.

Στα περισσότερα πρότζεκτ, στη φάση μέτρησης αναπτύσσεται ένας βασικός χάρτης διαδικασίας (process map). Ο χάρτης διαδικασίας παρέχει μια οπτική αναπαράσταση της υπό διερεύνησης διαδικασίας. Επιπλέον παρέχει μια πρόσθετη γνώση για τις ανεπάρκειες της διαδικασίας, όπως οι χρόνοι προγράμματος, οι αδυναμίες, ή ο προσδιορισμός των απαιτήσεων της διαδικασίας που δεν προσθέτουν καμία απολύτως αξία στην εν λόγω διαδικασία. Επίσης ο χάρτης διαδικασίας μπορεί να δώσει καινούργιες πληροφορίες σχετικά με την συλλογή δεδομένων.

2.5.3. Φάση Ανάλυσης

Το τρίτο στάδιο του DMAIC κύκλου είναι η φάση ανάλυσης. Η ομάδα που ασχολείται με τη φάση αυτή πρέπει να καθορίσει τις βασικές αιτίες του υπό μελέτη προβλήματος. Η διαφορά της μεθοδολογίας 6σ από άλλες απλούστερες στρατηγικές επίλυσης προβλήματος είναι ότι απαιτεί οι βασικές αιτίες να επιβεβαιώνονται από τα δεδομένα. Έτσι οδηγούμαστε σε αυτό που αποκαλούμε «*αποφάσεις βασισμένες σε γεγονότα*».

Για τον καθορισμό των βασικών αιτιών που απαιτούνται για την συγκεκριμένη φάση του DMAIC κύκλου, χρησιμοποιούνται ο χάρτης διαδικασίας, τα συλλεχθέντα δεδομένα και οποιαδήποτε άλλη γνώση συγκεντρώθηκε από τις φάσεις ορισμού και μέτρησης.

Ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο στη φάση ανάλυσης διαδραματίζει η στατιστική ανάλυση, η οποία διεξάγεται στη φάση αυτή. Η υψηλού επιπέδου ανάλυση που θέτει η 6σ, τη διαφοροποιεί από τις άλλες στρατηγικές επίλυσης προβλημάτων. Οι

στρατηγικές που χρησιμοποιούνται συνήθως για την επικύρωση των βασικών αιτιών, περιλαμβάνουν, μεταξύ άλλων, ανάλυση διακύμανσης, ανάλυση συσχέτισης, διάγραμμα διασποράς (scatterplot) ή ανάλυση χ^2 (Rupert G. & Miller Jr (1997), Ezekiel M. & Fox K.A. (1959) και Priscilla E. Greenwood & Michael S. Nikulin (1996)).

2.5.4. Φάση Βελτίωσης

Ο σκοπός της φάσης βελτίωσης είναι ο καθορισμός μιας προσιτής λύσης στο υπό μελέτη πρόβλημα. Πρέπει λοιπόν να δημιουργηθεί ένα πλήθος πιθανών λύσεων ούτως ώστε να βρεθεί η ιδανικότερη λύση για το πρόβλημα. Είναι σημαντικό στη φάση αυτή να εμπλέκονται άτομα τα οποία μπορούν να εκτελούν τη διαδικασία συχνά. Στην πραγματικότητα η αξία της εμπλοκής αυτών των ατόμων είναι ανεκτίμητη, καθώς σε ορισμένες περιπτώσεις μπορούν να παρέχουν τις καλύτερες δυνατές ιδέες για λύση του προβλήματος, εξαιτίας της γνώσης τους για τη διαδικασία. Με άλλα λόγια είναι σαφές ότι ο συνδυασμός της εμπειρίας με την επιστημονική ανάλυση είναι εγγύηση για την επιτυχία.

Επιπλέον, πρέπει να καταστεί σαφές, ότι, ο όρος «καλύτερο» δεν σημαίνει το ίδιο για όλους τους ανθρώπους. Έτσι η ομάδα πρέπει να προσπαθήσει να βρει την καλύτερη συνολική λύση. Μια λίστα κριτηρίων λύσεων είναι ένα χρήσιμο εργαλείο για την επιλογή της καλύτερης δυνατής λύσης.

Είναι σημαντικό, προτού δοθεί η προτεινόμενη ιδανική λύση, να ελεγχθεί από την ομάδα αν όντως λειτουργεί πραγματικά. Αυτό μπορεί να γίνει μέσω πιλοτικών προγραμμάτων, προσομοιώσεων υπολογιστών ή τμηματικών εφαρμογών. Επιπλέον η ομάδα πρέπει να δημιουργήσει και ένα μελλοντικό καταστατικό χάρτη διαδικασίας (state process map). Αυτό είναι χρήσιμο καθώς η διαδικασία είναι απαραίτητο να εκτελεστεί όσες φορές απαιτούνται ούτως ώστε να εξασφαλιστεί η σωστή εφαρμογή της λύσης.

2.5.5. Φάση Ελέγχου

Το τελευταίο στάδιο του κύκλου DMAIC είναι η φάση ελέγχου. Σκοπός της είναι να διατηρήσει τα κέρδη τα οποία προέκυψαν από τη φάση βελτίωσης. Είναι απαραίτητο να αναπτυχθεί ένα σχέδιο το οποίο θα περιγράφει λεπτομερώς τα

βήματα που πρέπει να ληφθούν κατά τη διάρκεια της φάσης ελέγχου, καθώς επίσης και συζήτηση πιθανών νέων ιδεών. Η έννοια του ελέγχου στη μεθοδολογία 6σ διαφέρει από τις άλλες παραδοσιακές λειτουργίες. Ο τρόπος εξασφάλισης της ποιότητας στα CTQ χαρακτηριστικά είναι μέσω του ελέγχου των βασικών μεταβλητών καταχώρησης (input variables), ο οποίος διαφέρει από την παραδοσιακή (και συνήθως μη-προστιθέμενης αξίας) τελική επιθεώρηση διαδικασίας.

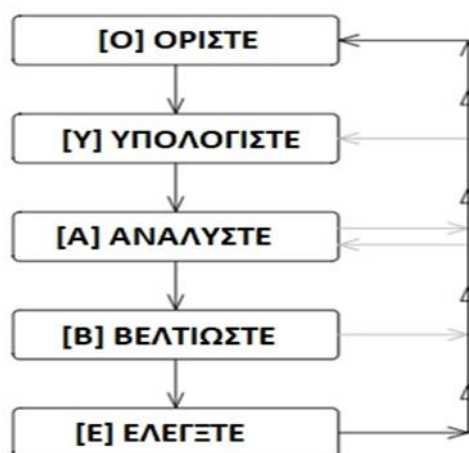
Για να ολοκληρωθεί η συνοπτική περιγραφή του κύκλου DMAIC παραθέτουμε το Σχήμα 2.1 το οποίο παρουσιάζει την σύνδεση του κύκλου DMAIC με την επιστημονική μέθοδο. Είναι εμφανής η αντιστοιχία μεταξύ των φάσεων του κύκλου DMAIC και των βημάτων της επιστημονικής μεθόδου. Επιπλέον παραθέτουμε το Σχήμα 2.2 το οποίο παρουσιάζει τις αλληλεπιδράσεις που υπάρχουν μεταξύ των διάφορων φάσεων του κύκλου. Είναι επίσης εμφανής η ανατροφοδότηση μεταξύ των διακριτών φάσεων.

DMAIC Κύκλος	Επιστημονική μέθοδος
Ορίστε	Κάντε μια ερώτηση
	Κάντε κάποια έρευνα στο παρασκήνιο
Υπολογίστε	
Αναλύστε	Κατασκευάστε μια υπόθεση
	Εξετάστε την υπόθεση με ένα πείραμα
Βελτιώστε	Αναλύστε τα δεδομένα και εξάγετε συμπεράσματα
Ελέγξτε	Ανακοινώστε τα αποτελέσματα

Σχήμα 2.1: Σχέση μεταξύ του κύκλου DMAIC και της επιστημονικής μεθόδου.

Υπάρχει ένα είδος αντιστοιχίας μεταξύ των φάσεων του DMAIC κύκλου (5 φάσεις) και των βημάτων της επιστημονικής μεθόδου (6 βήματα). Ουσιαστικά στη Φάση Ορισμού του Κύκλου, εξετάζεται αρχικά αν η μεθοδολογία είναι κατάλληλη για την

επίλυση του συγκεκριμένου προβλήματος (*Κάντε μια ερώτηση*). Επίσης καθορίζει τους ρόλους και τις ευθύνες, περιγράφει συνοπτικά τους στόχους του πρότζεκτ, αναγνωρίζει τους κύριους συμμετέχοντες (*Κάντε μια έρευνα στο παρασκήνιο*). Στη Φάση Μέτρησης σκοπός είναι η συλλογή όσο το δυνατόν περισσότερων πληροφοριών από την τρέχουσα διαδικασία (*Κάντε μια έρευνα στο παρασκήνιο*). Στη Φάση Ανάλυσης του κύκλου, καθορίζονται οι βασικές αιτίες του προβλήματος (*Κατασκευάστε μια υπόθεση*) καθώς και επίσης αυτές επικυρώνονται μέσω διαφόρων στρατηγικών (*Εξετάστε την υπόθεση με ένα πείραμα*). Στη Φάση Βελτίωσης, σκοπός είναι να καθοριστεί μια προσιτή λύση στο πρόβλημα. Για να γίνει αυτό πρέπει να δημιουργηθεί ένα πλήθος πιθανών λύσεων ούτως ώστε να βρεθεί η ιδανικότερη (*Εξετάστε την υπόθεση με ένα πείραμα*). Επιπλέον προτού δοθεί η προτεινόμενη ιδανική λύση πρέπει να ελεγχθεί αν όντως λειτουργεί πραγματικά (*Αναλύστε τα δεδομένα και εξάγετε συμπεράσματα*). Τέλος στη Φάση Ελέγχου του κύκλου DMAIC, σκοπός είναι να διατηρηθούν τα κέρδη από τη φάση βελτίωσης. Αναπτύσσεται ένα σχέδιο το οποίο περιγράφει λεπτομερώς τα βήματα που πρέπει να ληφθούν κατά τη διάρκεια της φάσης ελέγχου. Ολοκληρώνοντας τη φάση αυτή εξάγονται συμπεράσματα (*Ανακοινώστε τα αποτελέσματα*).



Σχήμα 2.2: Χάρτης πορείας του κύκλου DMAIC.

2.6.Λειτουργική δομή της μεθοδολογίας 6σ

Η μεθοδολογία 6σ δεν απαιτεί ειδικές αλλαγές στην ιεραρχική δομή ενός οργανισμού, παρά μόνο λειτουργικές προσαρμογές. Το γεγονός αυτό είναι ένα

πλεονέκτημα της 6σ έναντι άλλων στρατηγικών. Η τυπική δομή εργασιών της μεθοδολογίας 6σ, δίδεται από τους ακόλουθους βασικούς ρόλους: Πρωταθλητής, Κάτοχος Κύριας Μαύρης Ζώνης (MBB), Κάτοχος Μαύρης Ζώνης (BB), Ιδιοκτήτης Διαδικασίας, και τέλος Κάτοχος Πράσινης Ζώνης (GB)¹.

Ο **Πρωταθλητής** είναι ο υπεύθυνος για ένα συγκεκριμένο τμήμα του οργανισμού. Είναι δηλαδή ο άνθρωπος ο οποίος έχει υπό την ευθύνη του όλο το τμήμα και ελέγχει τους υφιστάμενούς του. Τα κύρια τμήματα του οργανισμού πρέπει να διαθέτουν Πρωταθλητή. Ενδεικτικά, καίρια τμήματα τα οποία τον χρειάζονται είναι η υπηρεσία ανθρώπινου δυναμικού και η χρηματοδότηση. Στην πραγματικότητα, ο Πρωταθλητής θα ηγηθεί του προγράμματος βελτίωσης μέσα στο τμήμα του, και ως εκ τούτου θα επιλέξει τα πρότζεκτ τα οποία έχουν τις καλύτερες ευκαιρίες βελτίωσης. Βέβαια καλό θα ήταν για τον οργανισμό να συντονίζει τις ενέργειές του και με τους υπόλοιπους πρωταθλητές.

Ο **Κάτοχος Κύριας Μαύρης Ζώνης (MBB)** πρέπει να κατέχει πλήρη γνώση των στατιστικών τεχνικών, των τεχνικών σχεδιασμού και των τεχνικών διαχείρισης. Ιεραρχικά, θα αναφέρεται κατευθείαν στο διοικητικό συμβούλιο του οργανισμού. Πρέπει να ενημερώνει το διοικητικό συμβούλιο σχετικά με τη γενική στρατηγική του προγράμματος βελτίωσης και αντίστοιχα τους Πρωταθλητές σχετικά με την επιλογή των πρότζεκτ που χρήζουν βελτίωσης. Ο κάτοχος Κύριας Μαύρης Ζώνης πρέπει να είναι σεβαστό πρόσωπο μέσα στον οργανισμό, πλήρως αφοσιωμένο στο πρόγραμμα βελτίωσης.

Ο **Κάτοχος Μαύρης Ζώνης (BB)** είναι υπεύθυνος για την ομάδα βελτίωσης που δημιουργήθηκε από τον πρωταθλητή για ένα συγκεκριμένο πρότζεκτ. Είναι σημαντικό να είναι επαρκώς αυτόνομος στην καθοδήγηση ενός πρότζεκτ. Επιπλέον, ο κάτοχος BB πρέπει να έχει καλή γνώση των διάφορων στατιστικών τεχνικών (ένα επίπεδο πιο κάτω από το άτομο στην MBB), αφήνοντας έτσι τις τεχνικές λεπτομέρειες στην MBB. Τέλος, φροντίζει ούτως ώστε ο κύκλος DMAIC, που περιγράψαμε πιο πάνω, να ακολουθείται πιστά.

Ο **Ιδιοκτήτης Διαδικασίας** είναι ο υπεύθυνος ενός συγκεκριμένου πρότζεκτ και δίνει αναφορά απευθείας στον πρωταθλητή του τμήματός του. Ως ο συνδεδετικός

¹ Οι ονομασίες αυτές φαίνονται παράξενες και πρωτότυπες ταυτόχρονα. Οφείλονται όμως στο ενδιαφέρον που έδειξε ο Mikel Harry για τις πολεμικές τέχνες.

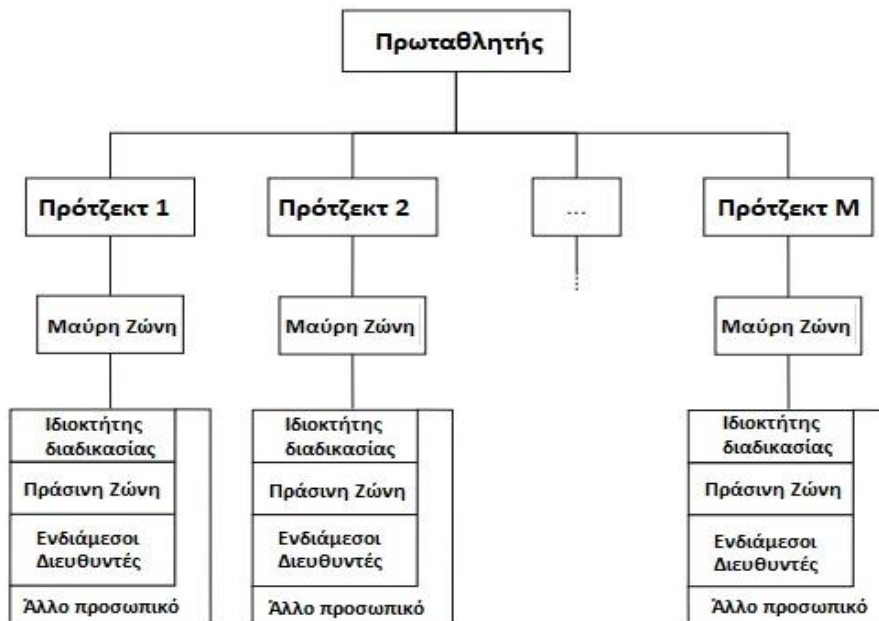
κρίκος με τους υπεύθυνους για την ολική στρατηγική βελτίωσης, και ειδικότερα με τον πρωταθλητή, είναι επιφορτισμένος με τον έλεγχο της διαδικασίας την οποία διαχειρίζεται. Εάν είναι εφικτό μέσα στον οργανισμό, ο ιδιοκτήτης διαδικασίας πρέπει να είναι το άτομο με την υψηλότερη κατάρτιση σχετικά με το πρότζεκτ ή με τη διαδικασία.

Τέλος ο **Κάτοχος Πράσινης Ζώνης (GB)** είναι κάποιος με τη στοιχειώδη στατιστική γνώση που μπορεί να καθοδηγήσει ένα απλό πρότζεκτ βελτίωσης. Η GB είναι το ιδανικό επίπεδο για τους ιδιοκτήτες διαδικασίας και τους ενδιάμεσους διευθυντές.

Η ιεραρχική σχέση μεταξύ των παραπάνω ρόλων φαίνονται στα Σχήματα 2.3 και 2.4. Παρατηρήστε ότι η λειτουργική δομή είναι ισοδύναμη με μια εσωτερική παροχή συμβουλευτικών υπηρεσιών μέσα στον οργανισμό. Το Σχήμα 2.3 αφορά τα στρατηγικά επίπεδα (παρατηρήστε πως ο πρωταθλητής είναι η σύνδεση μεταξύ στρατηγικών και λειτουργικών ρόλων και πώς δημιουργεί τις ομάδες βελτίωσης.) και το Σχήμα 2.4 αφορά τα λειτουργικά επίπεδα. Αξίζει να παρατηρήσεις κανείς ότι η μαύρη ζώνη είναι ο πυρήνας της δομής 6σ ενώ οι ιδιοκτήτες διαδικασίας είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτίωση.



Σχήμα 2.3: Στρατηγικοί ρόλοι 6σ .



Σχήμα 2.4: Λειτουργικοί ρόλοι6σ.

2.7. Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάσαμε ουσιαστικά μια επισκόπηση της μεθοδολογίας 6σ από την προέλευσή της, καθώς επίσης και μια σύντομη ιστορική αναδρομή. Το πιο σημαντικό κομμάτι που παρουσιάσαμε που είναι και το βασικό σημείο της μεθοδολογίας, είναι ο κύκλος DMAIC και τα διάφορα στάδιά του. Περισσότερες λεπτομέρειες για καθεμία από τις φάσεις θα δοθούν στη συνέχεια της διπλωματικής εργασίας. Το Κεφάλαιο ολοκληρώθηκε με μια συνοπτική περιγραφή των λειτουργικών ρόλων του 6σ μέσα σε έναν οργανισμό.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

Η ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ R ΓΙΑ ΤΗ ΦΑΣΗ ΟΡΙΣΜΟΥ

3.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα εισάγουμε κάποια χρήσιμα εργαλεία κατά τη διάρκεια της φάσης ορισμού. Είναι σημαντικό στη φάση αυτή να δηλώνονται οι ανάγκες των πελατών, καθώς επίσης να προσδιορίζονται οι διαδικασίες και τα προϊόντα που χρήζουν βελτίωση. Δύο από τα πιο αντιπροσωπευτικά εργαλεία της φάσης αυτής, είναι η χαρτογράφηση διαδικασίας και η συνάρτηση απώλειας. Σε αυτά τα δύο θα εστιάσουμε παρακάτω. Αξίζει να σημειωθεί ότι σημαντικό ρόλο για την εφαρμογή των εργαλείων αυτών στην πράξη, παίζει η χρήση κατάλληλου λογισμικού. Στην παρούσα διπλωματική εργασία, εκτός από την παρουσίαση της φιλοσοφίας και των διαδικασιών της *6σ*, δίνεται έμφαση στη χρήση της R (www.r-project.org) για την πρακτική τους εφαρμογή. Για περισσότερες λεπτομέρειες για την εφαρμογή της *6σ* με χρήση της R, δείτε E.L.Cano et al. (2012).

Σε ότι αφορά το συγκεκριμένο Κεφάλαιο, θα δώσουμε μια σκιαγράφιση της χαρτογράφησης διαδικασίας, παραθέτοντας αρχικά μια σύντομη εισαγωγή. Έπειτα θα παρουσιάσουμε μια μέθοδο κατασκευής χάρτη διαδικασίας και πως αυτή μπορεί να υλοποιηθεί με τη βοήθεια της R. Θα δοθούν κάποιες απόψεις και διαγράμματα που θα προκύψουν, και επιπλέον κάποιες αναφορές για τη χαρτογράφηση διαδικασίας και τα διαγράμματα της R.

3.2. Χαρτογράφηση Διαδικασίας

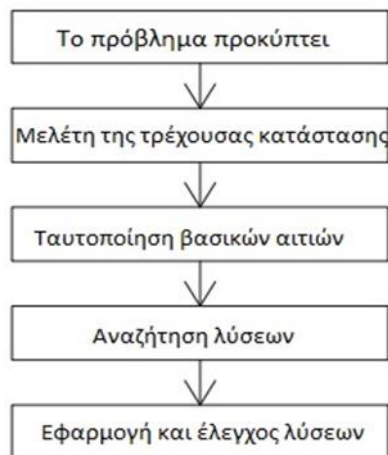
Η χαρτογράφηση διαδικασίας (process mapping) είναι ένα εργαλείο το οποίο είναι χρήσιμο στην ανάκτηση πληροφορίας για μια διαδικασία. Η πληροφορία αυτή θα χρησιμοποιηθεί αργότερα στις φάσεις της μεθοδολογίας *6σ* και πολλές από τις μετρήσεις, αναλύσεις και συμπεράσματα που θα εξαχθούν θα είναι στηριγμένα σε αυτήν την πληροφορία. Το αποτέλεσμα της χαρτογράφησης διαδικασίας είναι ένας *χάρτης διαδικασίας* (process map). Αυτός ο χάρτης προέρχεται από τον χάρτη προγράμματος και θα πρέπει να τροποποιηθεί κατά την εξέλιξη του πρότζεκτ.

Η χαρτογράφηση διαδικασίας ουσιαστικά ξεκινά με ένα χάρτη ανώτατου επιπέδου, προσδιορίζοντας όμως τις καταχωρήσεις και τα αποτελέσματα της διαδικασίας. Έπειτα η διαδικασία αναλύεται σε απλούστερα βήματα, όπου εκεί αναγνωρίζονται πλέον οι παράμετροι και τα χαρακτηριστικά της εν λόγω διαδικασίας. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η μελέτη και η ταξινόμηση των παραμέτρων θα είναι ο οδηγός για τη μεταγενέστερη ανάλυση της σχέσης μεταξύ των παραμέτρων και των χαρακτηριστικών CTQ.

3.2.1. Η Χαρτογράφηση Διαδικασίας ως Μέθοδος Επίλυσης Προβλημάτων

Η χαρτογράφηση διαδικασίας μπορεί να θεωρηθεί ως μια τεχνική επίλυσης προβλημάτων. Ένας χάρτης διαδικασίας βοηθά στη μεταγενέστερη εφαρμογή αναλυτικών μεθόδων για την επίλυση προβλημάτων.

Πριν προχωρήσουμε, είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τη βασική ροή επίλυσης προβλημάτων, η οποία αποτελεί μια συστηματική μέθοδο για να απαλλαγούμε από τα αίτια του προβλήματος. Μια τέτοια παρουσιάζεται στο Σχήμα 3.1, απ' όπου βλέπουμε ότι η χαρτογράφηση διαδικασίας περιλαμβάνει κυρίως τα τρία πρώτα στάδια, και σε ορισμένες περιπτώσεις και μέρος του τέταρτου σταδίου. Αρχικά πρέπει να καθοριστεί το πρόβλημα. Έπειτα η τρέχουσα κατάσταση μπορεί εύκολα να περιγράψει με τον χάρτη διαδικασίας, ο οποίος είναι ζωτικής σημασίας στον εντοπισμό των βασικών αιτιών. Επιπλέον είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι, κατά τη δημιουργία του χάρτη διαδικασίας, έχουμε τη δυνατότητα να προσδιορίσουμε που θα λάβουν χώρα οι μετρήσεις για επικείμενες αναλύσεις και πως θα προκύψουν κάποιες πιθανές λύσεις. Τέλος μπορεί να γίνει εφαρμογή και έλεγχος των λύσεων που προέκυψαν.



Σχήμα 3.1.: Ροή Επίλυσης Προβλημάτων.

Οι κατευθυντήριες γραμμές για την κατασκευή του χάρτη διαδικασίας προέρχονται άμεσα από τη φάση ορισμού και συγκεκριμένα από τον χάρτη προγράμματος (Κεφάλαιο 2, Ενότητα 2.4.1). Ωστόσο ο χάρτης διαδικασίας πρέπει να είναι ενεργός και συνεπώς πρέπει να αναθεωρείται και να ενημερώνεται όταν είναι απαραίτητο. Για την απόκτηση των δεδομένων από τον χάρτη διαδικασίας, υπάρχουν αρκετές τεχνικές οι οποίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν. Ένα παράδειγμα τέτοιων τεχνικών είναι η άμεση παρατήρηση και ο έλεγχος των τεκμηρίων που έχουμε (π.χ. εγχειρίδια, άρθρα). όμως, άλλα συλλογικά εργαλεία είναι πιο χρήσιμα για κάτι τέτοιο όπως, π.χ. ο καταιγισμός ιδεών (brainstorming), οι συσκέψεις, οι έρευνες και τα διάφορα σεμινάρια. Συνήθως οι πληροφορίες που δίνονται από τον ειδικό (π.χ. ο ιδιοκτήτης, έμπειρο προσωπικό) είναι το πιο ενδιαφέρον και πολύτιμο υλικό.

3.2.2. Στρατηγικές για Χαρτογράφηση Διαδικασίας

Είναι σημαντικό να γνωρίζουμε ότι κάθε γράφημα που αντιπροσωπεύει τη ροή μιας διαδικασίας είναι ένας χάρτης διαδικασίας. Επομένως, ένα 6σ πρότζεκτ είναι πιθανό να έχει διαφορετικούς χάρτες διαδικασίας. Έτσι λοιπόν, στη φάση ορισμού, έχουμε συνήθως έναν *ανώτατου επιπέδου* χάρτη («όπως είναι», «as is»). Από την άλλη στη φάση βελτίωσης έχουμε έναν τελικό χάρτη διαδικασίας. Αυτός ο τελικός χάρτης θα πρέπει να είναι παρόμοιος με τον ιδανικό χάρτη διαδικασίας («να είναι», «to be»), που αναπτύχθηκε στη φάση βελτίωσης.

Στη μεθοδολογία 6σ , χρησιμοποιούνται κυρίως δύο τύποι χαρτών διαδικασίας. Αυτοί είναι οι SIPOC (Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers) και VSM(Value, Stream Map). Ο πρώτος, SIPOC αντιπροσωπεύει τη ροή μιας διαδικασίας από τον προμηθευτή (S), στον πελάτη (C). Τα εσωτερικά γράμματα της λέξης αντιστοιχούν στις καταχωρήσεις (I), τη διαδικασία (P) και τα αποτελέσματα (O) αντίστοιχα (Σχήμα 3.2). Ο δεύτερος τύπος, VSM, δεν αντιπροσωπεύει απλώς τη ροή της διαδικασίας, αλλά επιπρόσθετα προσδιορίζει και ποια βήματα προσθέτουν αξία στο τελικό προϊόν/υπηρεσία.



Σχήμα 3.2: SIPOC ροή.

Φυσικά μπορούμε να κάνουμε το Σχήμα 3.2. πιο περίπλοκο, με την τοποθέτηση των κουτιών σε γραμμές, κάτι που αντιπροσωπεύει τους εμπλεκόμενους φορείς στη διαδικασία, ή ακόμη και την τοποθέτηση των κουτιών σε στήλες, που θα αντιστοιχούσαν στο χρόνο ροής της διαδικασίας, με τα βέλη να ενώνουν τα διάφορα βήματα. Κάτι τέτοιο, αφήνεται στον ενδιαφερόμενο αναγνώστη.

Στην παρούσα διπλωματική δε θα μπορούμε σε περαιτέρω λεπτομέρειες για τους τύπους χαρτών διαδικασίας SIPOC και VSM. Το μόνο που θα κάνουμε είναι να περιγράψουμε μια απλή στρατηγική χαρτογράφησης διαδικασίας δύο σταδίων, η οποία είναι κοινή σε όλους τους χάρτες διαδικασίας.

3.2.2.1. Χαρτογράφηση Διαδικασίας Δύο Σταδίων

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος κατασκευής χάρτη διαδικασίας είναι μέσω δύο σταδίων. Πιο συγκεκριμένα στο πρώτο στάδιο, καθορίζεται ένας ανώτατου επιπέδου χάρτης και στο δεύτερο στάδιο η διαδικασία αναλύεται σε απλούστερα βήματα.

Όταν καθοριστεί ο ανώτατου επιπέδου χάρτης ξεκινάμε την κατασκευή του χάρτη διαδικασίας χρησιμοποιώντας αυτόν τον χάρτη. Ο χάρτης ανώτατου επιπέδου, περιέχει μόνο τις καταχωρήσεις και τα αποτελέσματα της διαδικασίας. Είναι

σημαντικό να αναφέρουμε ότι στο στάδιο αυτό, η διαδικασία είναι σαν ένα μαύρο κουτί (*black box*). Δηλαδή δε μας ενδιαφέρει η διαδικασία αυτή καθ' αυτή, αλλά στην ουσία, εστιάζουμε στο να βρούμε τα πιο σημαντικά αποτελέσματα, τα οποία είναι τα βασικά χαρακτηριστικά της διαδικασίας (προϊόν ή υπηρεσία), τα οποία είναι γνωστά ως χαρακτηριστικά CTQ. Τα αποτελέσματα συμβολίζονται με το γράμμα Y και συχνά αναφέρονται ως «Ys» της διαδικασίας.

Κατά τη διάρκεια του προσδιορισμού των καταχωρήσεων, θα πρέπει να λάβουμε υπόψη τα παρακάτω, τα οποία είναι γνωστά ως Έξι Ms. Αυτά είναι οι μηχανές (*Machines*), οι μέθοδοι (*Methods*), τα υλικά (*Materials*), οι μετρήσεις (*Measurements*), η μητέρα φύση - περιβάλλον (*Mother nature*) και το ανθρώπινο δυναμικό (*Manpower*). Ο στόχος είναι να συμπεράνουμε ποιες καταχωρήσεις επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά CTQ. Οι καταχωρήσεις συμβολίζονται με το γράμμα X και συχνά αναφέρονται ως «Xs» της διαδικασίας. Στη συνέχεια θα δώσουμε ένα παράδειγμα χρησιμοποιώντας την R, ούτως ώστε να γίνει πιο κατανοητή η χαρτογράφηση διαδικασίας δύο σταδίων.

Παράδειγμα 3.1. (Ιταλικό εστιατόριο):

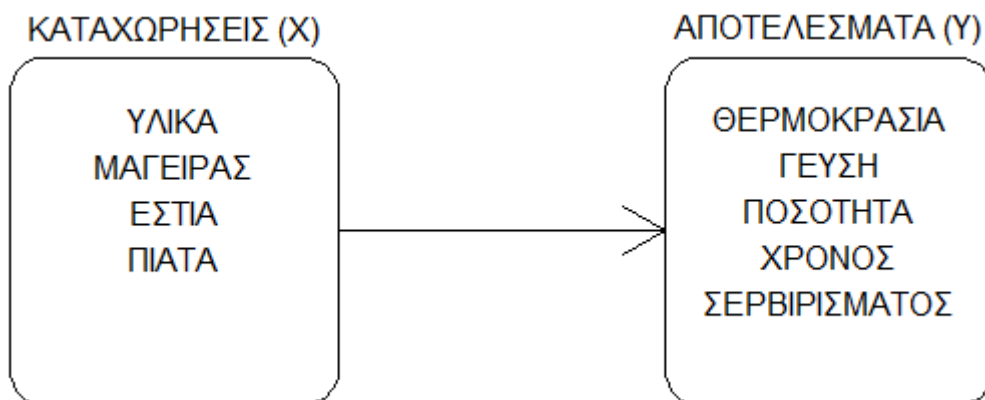
Ο ιδιοκτήτης ενός ιταλικού εστιατορίου ενδιαφέρεται να μελετήσει τη διαδικασία παρασκευής και σερβιρίσματος μιας μακαρονάδας. Αρχικά χρειάζεται να κατασκευάσει έναν ανώτατου επιπέδου χάρτη. Αφού γίνει αυτό ο ιδιοκτήτης συλλέγει δεδομένα από το προσωπικό του εστιατορίου και μετά ορίζει ότι οι καταχωρήσεις της διαδικασίας θα είναι τα **υλικά, ο μάγειρας, η εστία και τα πιάτα**. Ορίζει επίσης ότι τα αποτελέσματα θα είναι η **θερμοκρασία, η γεύση, η ποσότητα και ο χρόνος σερβιρίσματος**. Έτσι λοιπόν τα αποτελέσματα αυτά είναι τα κύρια χαρακτηριστικά της μακαρονάδας, δηλαδή τα κρίσιμα ως προς την ποιότητα χαρακτηριστικά (CTQ). Το παράδειγμα αυτό μπορεί να δημιουργηθεί με τη βοήθεια της R. Για να τρέξουν οι παρακάτω εντολές, χρειάζεται η εγκατάσταση του πακέτου *grid.graphics*. Ο κώδικας (σε μορφή script) δίνεται παρακάτω:

```

grid.roundrect(width = .25,height = unit(1.8, "inches"),x = 0.25)
grid.text("ΚΑΤΑΧΩΡΗΣΕΙΣ (X)\n\nΥΛΙΚΑ\nΜΑΓΕΙΡΑΣ\nΕΣΤΙΑ\nΠΙΑΤΑ",x = 0.25,
  y = 0.61,
  just = "center")
grid.roundrect(width = .25,height = unit(1.8, "inches"),x = 0.75)
grid.text("ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ(Υ)\n\nΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ\nΓΕΥΣΗ\nΠΟΣΟΤΗΤΑ\nΧΡΟΝΟΣ\nΣερβιρίσματος",
  x = 0.75
  y = 0.77
  just = "top")
grid.lines(x = c(0.375, 0.625),
  y = c(0.5, 0.5),
  arrow = arrow())

```

Όταν τρέξουμε τον παραπάνω κώδικα παίρνουμε το παρακάτω σχήμα, το οποίο ουσιαστικά είναι ένα απλό διάγραμμα του ανώτατου επιπέδου χάρτη. Οι καταχωρήσεις και τα αποτελέσματα προσδιορίζονται εκτός της διαδικασίας ενώ η διαδικασία είναι ένα μαύρο κουτί το οποίο θα αναλυθεί αργότερα.



Σχήμα 3.3: Χάρτης Διαδικασίας Ανώτατου Επιπέδου για το Παράδειγμα 3.1.

Όπως είδαμε, η κατασκευή ενός χάρτη διαδικασίας χωρίζεται σε δύο στάδια. Το δεύτερο στάδιο είναι η διάσπαση της διαδικασίας σε απλούστερα βήματα. Αν και η διάσπαση του χάρτη διαδικασίας μοιάζει εύκολη, τα πράγματα δεν είναι τόσο απλά καθώς υπάρχουν πολλά εμπόδια τα οποία πρέπει να ξεπεραστούν. Η πρώτη πρόκληση για τον κάτοχο της Μαύρης Ζώνης είναι να επιλέξει την καλύτερη

στρατηγική, ούτως ώστε να κινήσει το ενδιαφέρον του προσωπικού για την απόκτηση πιο λεπτομερών πληροφοριών για τη διαδικασία.

Η διάσπαση μπορεί να γίνει διαδοχικά, δηλαδή, χωρίζοντας τη διαδικασία σε απλούστερα βήματα. Το κάθε βήμα (δουλειά, δραστηριότητα) ονομάζεται και περιγράφεται. Τα βήματα έχουν τις δικές τους καταχωρήσεις και αποτελέσματα. Οι καταχωρήσεις του πρώτου βήματος συμβολίζονται με X και τα αποτελέσματα του τελευταίου βήματος συμβολίζονται με Y . Στα ενδιάμεσα βήματα, τα αποτελέσματα του ενός βήματος, είναι οι καταχωρήσεις του ακριβώς επόμενου βήματος.

Αφού διασπάσουμε τη διαδικασία, μπορούμε να επικεντρωθούμε σε κάθε βήμα ξεχωριστά. Πρέπει να προσδιορίσουμε τις παραμέτρους της διαδικασίας σε κάθε συγκεκριμένο βήμα. Οι παράμετροι καλούνται x (προσοχή, δεν είναι τα ίδια με τα Xs που ορίσαμε προηγουμένως) και αντιπροσωπεύουν όλους τους παράγοντες ή τις μεταβλητές οι οποίες μπορούν να επηρεάσουν τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα του προϊόντος στα αποτελέσματα της διαδικασίας. Είναι σημαντικό να αναφέρουμε ότι τα *χαρακτηριστικά γνωρίσματα* του βήματος είναι τα χαρακτηριστικά τα οποία καθορίζουν την ποιότητά του. Καλούνται ως τα y s της διαδικασίας (προσοχή, δεν είναι τα ίδια με τα Ys που ορίσαμε προηγουμένως). Για να μην υπάρχει σύγχυση μεταξύ των δύο, καλό είναι να διευκρινίσουμε ότι τα κεφαλαία γράμματα (X και Y) αντιστοιχούν στις καταχωρήσεις και τα αποτελέσματα της διαδικασίας, ενώ αντίστοιχα τα μικρά γράμματα (x και y) αντιστοιχούν στις καταχωρήσεις και τα αποτελέσματα των ενδιάμεσων βημάτων μέσα στη διαδικασία.

Γενικά υποθέτουμε ότι υπάρχει μια (συναρτησιακή) σχέση η οποία συνδέει τις παραμέτρους με τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα. Η σχέση αυτή είναι $y = f(x)$ (το πως δηλαδή οι παράμετροι επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα) και είναι η βάση για τα επόμενα στάδια του κύκλου DMAIC. Όταν υπολογίσουμε τα x και y , θα τα σχεδιάσουμε και θα τα αναλύσουμε, ούτως ώστε να κατασκευάσουμε πειράματα, ελέγχους υποθέσεων και να εξάγουμε αποτελέσματα για τις βελτιώσεις. Επομένως, αυτή είναι μια πάρα πολύ σημαντική δουλειά που πρέπει να γίνεται σε ένα 6σ πρότζεκτ.

3.2.3. Η Βήμα προς Βήμα Χαρτογράφηση της Διαδικασίας

Για να οριστεί ένας χάρτης διαδικασίας ακολουθούνται 5 συγκεκριμένα βήματα τα οποία θα αναλύσουμε ξεχωριστά στη συνέχεια. Τα 5 αυτά βήματα είναι:

- i). Προσδιορισμός καταχωρήσεων και αποτελεσμάτων.
- ii). Λίστα με τα βήματα του πρότζεκτ.
- iii). Προσδιορισμός των αποτελεσμάτων κάθε βήματος.
- iv). Προσδιορισμός των παραμέτρων κάθε βήματος .
- v). Ταξινόμηση των παραμέτρων.

Προσδιορισμός καταχωρήσεων και αποτελεσμάτων

Όπως ήδη αναφέραμε, οι καταχωρήσεις της διαδικασίας είναι τα Xs. Εκτός από τα έξι Ms που πρέπει να λάβουμε υπόψη κατά τη διάρκεια του προσδιορισμού των καταχωρήσεων, μπορούμε να εντοπίσουμε και άλλα, όπως π.χ. η ενέργεια, οι κανονισμοί κλπ. Όσον αφορά τα αποτελέσματα, πρόκειται ουσιαστικά για προϊόν ή υπηρεσία. Σημειώνεται ότι τα χαρακτηριστικά CTQ των αποτελεσμάτων είναι τα Ys της διαδικασίας. Στο στάδιο αυτό τα χαρακτηριστικά CTQ πρέπει να έχουν ήδη προσδιοριστεί.

Λίστα με τα βήματα του πρότζεκτ

Η καταχώρηση των βημάτων του πρότζεκτ μπορεί να εκτελεστεί διαδοχικά. Όσο πιο λεπτομερής είναι η διάσπαση της διαδικασίας, τόσο ακριβέστερη θα είναι η μεταγενέστερη ανάλυση. Στο σημείο αυτό μπορούμε να ταξινομήσουμε τα βήματα σε δύο ομάδες: σε αυτά που προσθέτουν αξία στο προϊόν και σε αυτά που δεν προσθέτουν αξία στο προϊόν, όπως είναι για παράδειγμα η μεταφορά, η αποθήκευση και η επιθεώρηση.

Προσδιορισμός των αποτελεσμάτων κάθε βήματος

Σε κάθε βήμα παράγεται ένα αποτέλεσμα, το οποίο μπορεί να είναι ένα προϊόν, ένα υλικό, δεδομένα κ.λπ. ή μπορεί να είναι χαρακτηριστικά γνωρίσματα του τελικού προϊόντος, που μπορεί να αλλάξουν από βήμα σε βήμα. Θυμίζουμε ότι αυτά τα ενδιάμεσα αποτελέσματα/χαρακτηριστικά είναι τα ys της διαδικασίας.

Προσδιορισμός των παραμέτρων κάθε βήματος

Οι παράμετροι που επηρεάζουν τη διαδικασία σε ένα συγκεκριμένο βήμα είναι γνωστοί ως τα *x*s του συγκεκριμένου βήματος. Σαφώς και οι παράμετροι αυτοί, επηρεάζουν τα αποτελέσματα / χαρακτηριστικά του προϊόντος. Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι η επιρροή αυτή μπορεί να έχει άμεση σχέση με την ποιότητα, το κόστος, ή άλλες σημαντικές πλευρές που αφορούν την εταιρεία. Για να εντοπίσουμε τα *x*s ενός συγκεκριμένου βήματος μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις τεχνικές που αναφέραμε στην ενότητα 3.2.1.

Ταξινόμηση των παραμέτρων

Το τελευταίο από τα 5 βήματα για τον ορισμό ενός χάρτη διαδικασίας είναι η ταξινόμηση των παραμέτρων. Πιο συγκεκριμένα, αφού εντοπίσουμε τις παραμέτρους ενός βήματος της διαδικασίας, κρίνεται απαραίτητο να αξιολογήσουμε την επιρροή τους στα χαρακτηριστικά, καθώς επίσης και πως προκαλείται αυτή η επιρροή. Για να γίνει αυτό οι παράμετροι πρέπει να ταξινομηθούν σε μια από τις ακόλουθες ομάδες:

Ομάδα	Περιγραφή
Θόρυβος - (N – Noise):	Μη ελεγχόμενοι παράγοντες
Ελεγχόμενοι παράγοντες - (C - Controllable factors):	Μπορεί να μεταβληθούν κατά τη διάρκεια της διαδικασίας
Διαδικασία - (P – Procedure):	Ελεγχόμενοι παράγοντες μέσω μιας τυπικής διαδικασίας
Κρίσιμα - (Cr – Critical):	Όσοι έχουν τη μεγαλύτερη επιρροή στη διαδικασία

Παράδειγμα 3.2.: (Συνέχεια ιταλικού εστιατορίου)

Η διαδικασία κατασκευής και σερβιρίσματος μιας μακαρονάδας μπορεί να αναλυθεί στα παρακάτω βήματα:

- Παρασκευή ζύμης για τα μακαρόνια
- Προσθήκη έξτρα υλικών

- Σιγοψήστε την μακαρονάδα
- Παράδοση μακαρονάδας στον πελάτη

Υποθέτουμε ότι οι καταχωρήσεις κάθε βήματος, είναι τα αποτελέσματα του προηγούμενου βήματος. Οι καταχωρήσεις για το πρώτο στάδιο είναι τα xs που ορίστηκαν προηγουμένως στο παράδειγμα 3.1. (υλικά, μάγειρας, εστία, πιάτα). Στη συνέχεια, περιγράφουμε λεπτομερώς τις παραμέτρους και τα αποτελέσματα που αντιστοιχούν σε κάθε βήμα (με την ταξινόμηση των παραμέτρων σε παρενθέσεις).

Πρώτο βήμα: Ζύμη για μακαρόνια

- Παράμετροι: μάγειρας (C), είδος αλευριού (C), αυγά (P), ποσοστό νερού (P).
- Αποτελέσματα: ζύμη (πυκνότητα, υφή)

Δεύτερο βήμα: Έξτρα υλικά

- Παράμετροι: μάγειρας (C), μάρκα των υλικών (Cr), ποσότητα των υλικών (P), χρόνος προετοιμασίας (Cr).
- Αποτελέσματα: Ωμή μακαρονάδα (πυκνότητα, ποσότητα)

Τρίτο βήμα: Ψήσιμο

- Παράμετροι: μάγειρας (C), εστία (N), χρόνος ψησίματος (Cr).
- Αποτελέσματα: έτοιμη μακαρονάδα (θερμοκρασία, γεύση)

Τέταρτο βήμα: Παράδοση στον πελάτη

- Παράμετροι: σερβιτόρος (C), ουρά (N).
- Αποτελέσματα: μακαρονάδα στο τραπέζι (θερμοκρασία, γεύση, ποσότητα, χρόνος)

Στη συνέχεια αποθηκεύουμε τις καταχωρήσεις, τα αποτελέσματα και τα βήματα της διαδικασίας σε αντικείμενα στην R. Αυτό μπορεί να γίνει με τις παρακάτω εντολές:

```
inputs <- c ("Υλικά", "Μάγειρας", "Εστία", "Πιάτα")
outputs <- c ("Θερμοκρασία", "Γεύση", "Ποσότητα", "Χρόνος")
steps <- c ("Ζύμη μακαρονιών", "Έξτρα υλικά", "Ψήσιμο", "Παράδοση στον πελάτη")
```

Έπειτα αποθηκεύουμε τα ονόματα των αποτελεσμάτων κάθε βήματος σε λίστες (πρώτα πρέπει να δημιουργήσουμε το αντικείμενο της λίστας). Τα αποτελέσματα ενός βήματος είναι οι καταχωρήσεις του επόμενος ως εξής:

```
io <-list ()
io[[1]]<- list ("X's")
io[[2]]<- list("Ζύμη", "Υλικά", "Μάγειρας")
io[[3]]<- list("Ωμή μακαρονάδα", "Μάγειρας", "Εστία", "Πιάτα")
io[[4]]<- list("Έτοιμη μακαρονάδα", "Πιάτα")
```

Τέλος αποθηκεύουμε τα ονόματα, τους τύπους των παραμέτρων και τα χαρακτηριστικά με τη βοήθεια των παρακάτω εντολών:

```
param <-list()
param[[1]] <-list(c("Μάγειρας", "C"),
                 c("είδος αλευριού", "C"),
                 c("αυγά", "P"),
                 c("ποσοστό νερού", "P"))
param[[2]] <-list(c("Μάγειρας", "C"),
                 c("μάρκα υλικών", "Cr"),
                 c("ποσότητα υλικών", "P"),
                 c("χρόνος προετοιμασίας", "Cr"))
param[[3]] <-list(c("Μάγειρας", "C"),
                 c("εστία", "N"),
                 c("χρόνος ψησίματος", "Cr"))
param[[4]] <-list(c("Σερβιτόρος", "C"),
                 c("ουρά", "N"))

feat <-list()
feat[[1]] <-list("πυκνότητα", "υφή")
feat[[2]] <-list("πυκνότητα", "ποσότητα")
feat[[3]] <-list("θερμοκρασία", "γεύση")
feat[[4]] <-list("θερμοκρασία", "γεύση", "ποσότητα", "χρόνος")
```

Με την ολοκλήρωση της παραπάνω διαδικασίας έχουμε όλα τα δεδομένα αποθηκευμένα σε μεταβλητές. Πριν προχωρήσουμε, δίνουμε τον παρακάτω Πίνακα 3.1 στον οποίο παρουσιάζονται λεπτομέρειες σχετικά με τις εντολές της R που χρησιμοποιήσαμε για το συγκεκριμένο παράδειγμα.

Πίνακας 3.1.:Ορίσματα της συνάρτησης `ss.pMap`

Όρισμα	Περιγραφή
<code>steps</code>	Διάνυσμα χαρακτήρων με τα ονόματα των “n” βημάτων.
<code>inputs.overall</code>	Διάνυσμα χαρακτήρων με τα ονόματα των συνολικών καταχωρήσεων.
<code>outputs.overall</code>	Διάνυσμα χαρακτήρων με τα ονόματα των συνολικών αποτελεσμάτων.
<code>input.output</code>	Διάνυσμα καταλόγων με τα ονόματα των καταχωρήσεων του i- βήματος, τα οποία θα είναι τα αποτελέσματα του (i-1) – βήματος.
<code>x.parameters</code>	Διάνυσμα καταλόγων των λιστών των x παραμέτρων της διαδικασίας: η παράμετρος είναι ένα διάνυσμα με δύο τιμές, όνομα και τύπο
<code>y.features</code>	Διάνυσμα καταλόγων των λιστών των γ χαρακτηριστικών του βήματος: το χαρακτηριστικό είναι ένα διάνυσμα με δύο τιμές, όνομα και τύπο
<code>main</code>	Κύριος τίτλος του χάρτη διαδικασίας
<code>sub</code>	Υπότιτλος του χάρτη διαδικασίας
<code>ss.col</code>	Κατάλογος χρωμάτων για τις γραμμές του χάρτη διαδικασίας

3.2.4. Σχεδιασμός Χάρτη Διαδικασίας με Χρήση του Πακέτου `SixSigma`

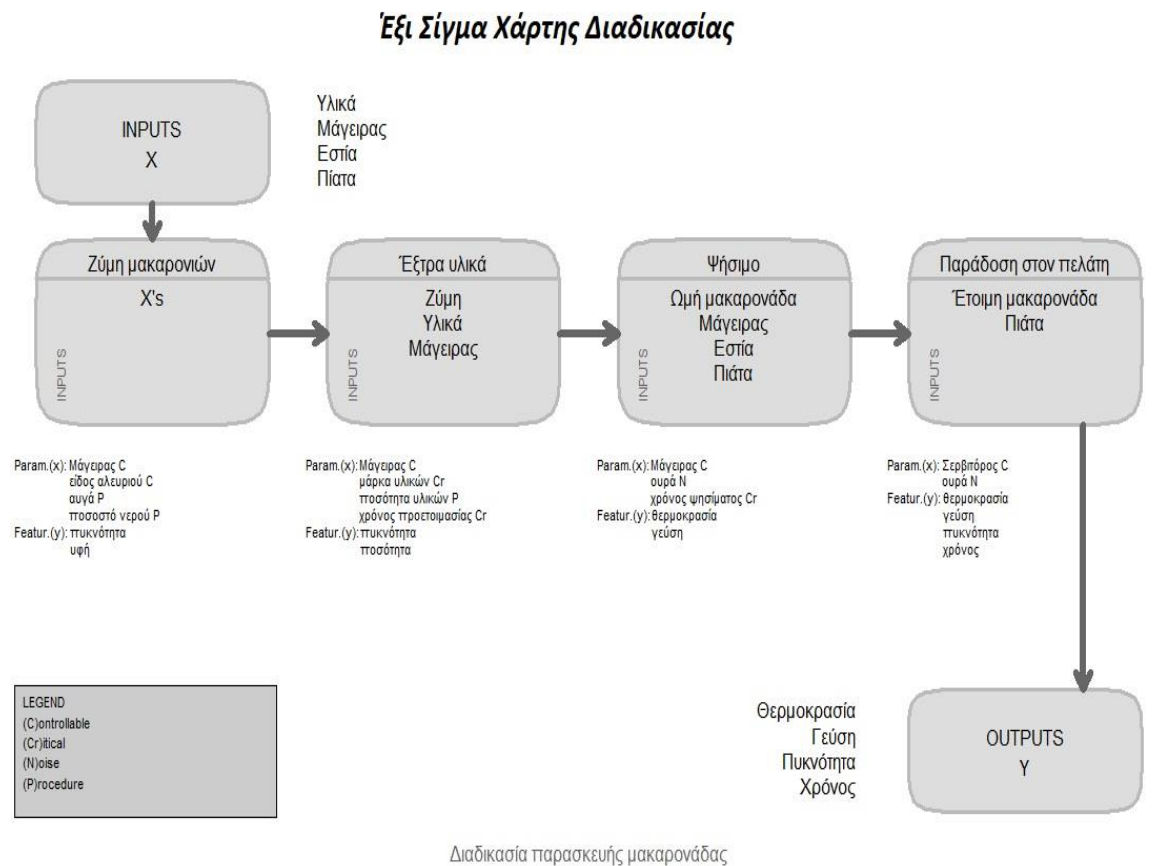
Για τον σχεδιασμό χάρτη διαδικασίας μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το πακέτο `SixSigma` το οποίο περιέχει μια συνάρτηση η οποία ονομάζεται `ss.pMap`. Η συνάρτηση αυτή χρησιμοποιεί (ως ορίσματα) τα αντικείμενα που δόθηκαν στον Πίνακα 3.1. Για να δούμε και πρακτικά πως μπορεί να γίνει κάτι τέτοιο θα χρησιμοποιήσουμε το παράδειγμα του ιταλικού εστιατορίου.

Παράδειγμα 3.3.: (Ιταλικό Εστιατόριο, συνέχεια)

Αφού έχουμε πλέον όλα τα δεδομένα σε μεταβλητές, θα προχωρήσουμε στο σχεδιασμό του χάρτη διαδικασίας για το παράδειγμα με τα μακαρόνια. Έτσι λοιπόν καλούμε τη συνάρτηση `ss.pMap` (αφού αρχικά εγκαταστήσουμε και φορτώσουμε το πακέτο `SixSigma`) για να σχεδιάσουμε τον χάρτη διαδικασίας. Ο κώδικας στην R είναι:

```
ss.pMap(steps, inputs, outputs, io, param, feat, sub="Διαδικασία παρασκευής μακαρονάδας")
```

Το αποτέλεσμα που προκύπτει μετά από αυτή τη διαδικασία φαίνεται στο Σχήμα 3.4, όπου η χρήση της συνάρτησης `ss.pMap` βοήθησε στην αναπαράσταση της όλης διαδικασίας.



Σχήμα 3.4.: Χάρτης Διαδικασίας για το Παράδειγμα 3.3.

Το σχήμα ξεκινά με τις καταχωρήσεις (Inputs) οι οποίες φαίνονται στο πλάι του ορθογώνιου αυτού. Έπειτα το καθένα από τα 4 ορθογώνια που ενώνονται με βέλη, έχει ως τίτλο το κάθε βήμα της διαδικασίας. Στο πρώτο ορθογώνιο οι καταχωρήσεις

είναι οι αρχικές καταχωρήσεις της διαδικασίας και συμβολίζονται με X_s . Κάτω από το ορθογώνιο βλέπουμε τις παραμέτρους και τους τύπους των παραμέτρων του 1^{ου} βήματος. Στο δεύτερο ορθογώνιο υπάρχει το αποτέλεσμα του 1^{ου} βήματος (ζύμη) και οι 2 πρώτες αρχικές καταχωρήσεις της διαδικασίας. Κάτω από το ορθογώνιο βλέπουμε τις παραμέτρους και τους τύπους των παραμέτρων του 2^{ου} βήματος. Στο τρίτο ορθογώνιο υπάρχει το αποτέλεσμα του 2^{ου} βήματος (ωμή μακαρονάδα), η τελευταία καταχώρηση του προηγούμενου βήματος (μάγειρας) και οι 2 τελευταίες αρχικές καταχωρήσεις. Κάτω από το συγκεκριμένο ορθογώνιο υπάρχουν οι παράμετροι και οι τύποι των παραμέτρων του 3^{ου} βήματος. Τέλος στο τελευταίο ορθογώνιο υπάρχει το αποτέλεσμα του 3^{ου} βήματος (έτοιμη μακαρονάδα) και η τελευταία καταχώρηση του προηγούμενου βήματος. Κάτω από το ορθογώνιο υπάρχουν και πάλι οι παράμετροι και οι τύποι των παραμέτρων του 4^{ου} βήματος. Στο κάτω δεξιό μέρος του σχήματος υπάρχει το τελικό ορθογώνιο με τα τελικά αποτελέσματα της διαδικασίας που είναι η θερμοκρασία, η γεύση, η πυκνότητα και ο χρόνος σερβιρίσματος.

Πριν κλείσουμε την παρούσα ενότητα αξίζει να αναφέρουμε ότι υπάρχει η πεποίθηση ότι είναι πολύ πιο εύκολο να σχεδιάζουμε διαγράμματα με το ποντίκι χρησιμοποιώντας οποιοδήποτε πρόγραμμα σχεδίασης (π.χ. Microsoft Visio). Όμως στην προκειμένη περίπτωση και σύμφωνα με το πρότυπο GUI, κάθε φορά πρέπει να ανοίγουμε το πρόγραμμα σχεδίασης, να το τροποποιούμε, να ελέγχουμε την εμφάνιση, να εξάγουμε την εικόνα, να την εισάγουμε στην αναφορά και να ελέγχουμε το περίγραμμα. Τα βήματα αυτά πρέπει να επαναλαμβάνονται κάθε φορά που επιθυμούμε να δημιουργήσουμε ή να αλλάξουμε ένα διάγραμμα.

Το κύριο πλεονέκτημα που έχουμε όταν επιλέξουμε να κάνουμε το διάγραμμα με την R είναι ότι το διάγραμμα μπορεί να αναπαραχθεί, δηλαδή κάθε φορά που το παράγουμε, θα έχει ακριβώς την ίδια εμφάνιση. Το πλεονέκτημα αυτό που προσφέρει η R, είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν χρησιμοποιούμε τεχνικές αναπαραγωγισιμότητας (reproducibility techniques). Έτσι, αν π.χ., έχουμε ένα κώδικα μέσα σε μια αναφορά ενός πρότζεκτ και κάνουμε μια αλλαγή στον κώδικα, τότε το διάγραμμα θα αποτυπωθεί ξανά και θα ενημερωθεί αυτόματα στην αναφορά. Για το λόγο αυτό, τα διαγράμματα στην παρούσα διπλωματική εργασία έχουν γίνει με

χρήση της R (ώστε να είναι δυνατή και η αναπαραγωγιμότητάς τους από τον ενδιαφερόμενο αναγνώστη).

3.2.5. Σύνοψη

Όπως είδαμε η χαρτογράφηση διαδικασίας είναι ένα πολύ σημαντικό εργαλείο στη φάση ορισμού του κύκλου DMAIC. Η πηγή για την κατασκευή του είναι ο χάρτης προγράμματος και περιλαμβάνει την περιγραφή των βημάτων που απαιτεί η διαδικασία, καθώς επίσης και την αναγνώριση των καταχωρήσεων, αποτελεσμάτων, των παραμέτρων και των χαρακτηριστικών. Είναι σημαντικό το γεγονός ότι η σχέση μεταξύ των παραμέτρων και των χαρακτηριστικών της διαδικασίας θα είναι το κύριο νήμα στις επόμενες φάσεις ενός 6σ πρότζεκτ. Ως εκ τούτου, η συλλογή αυτών των πληροφοριών δεν είναι ασήμαντο θέμα.

Εκτός από τη χαρτογράφηση της διαδικασίας, στο κεφάλαιο αυτό αναφερθήκαμε σε στρατηγικές χαρτογράφησης διαδικασίας όπως οι SIPOC και VSM ενώ παρουσιάστηκε συνοπτικά και μια δισταδιακή μέθοδος για την κατασκευή χαρτών διαδικασίας, μέσω της διάσπασης της διαδικασίας σε απλούστερα βήματα. Τέλος, παρουσιάστηκε ο τρόπος ταξινόμησης των παραμέτρων ανάλογα με τον επηρεασμό και τη φύση τους, χρησιμοποιώντας ένα αληθοφανές παράδειγμα. Ουσιαστικά το παράδειγμα αυτό χρησιμοποιήθηκε για να σχεδιάσουμε Χάρτες Διαδικασίας λεπτομερείς και ανώτατου επιπέδου.

3.3. Συνάρτηση απώλειας με χρήση της R

Τα περισσότερα χαρακτηριστικά γνωρίσματα που καθορίζουν ένα προϊόν, συνήθως δεν είναι και τόσο σημαντικά για τον πελάτη. Μόνο μερικά από αυτά είναι κρίσιμα για την ποιότητα (CTQ), και είναι αυτά που καθορίζουν τις προσδοκίες του πελάτη. Για να μπορέσουν να ικανοποιηθούν αυτές οι προσδοκίες, πρέπει οι διαδικασίες που εμπλέκονται στην ανάπτυξη του τελικού προϊόντος να είναι σωστές. Για να γίνει αυτό ακολουθούμε τη φιλοσοφία του 6σ, δηλαδή, *υψηλής ποιότητας διαδικασίες οδηγούν αυτόματα σε υψηλής ποιότητας προϊόντα*.

Αυτό είναι άρρηκτα συνδεδεμένο, με την έννοια του κόστους ποιότητας (*Cost of Quality*, COQ), το οποίο είναι ουσιαστικά το κόστος που προκύπτει από την ύπαρξη ενός προϊόντος χαμηλής ποιότητας προϊόν (από την οπτική του πελάτη). Βέβαια, ορισμένοι μάνατζερ, εξακολουθούν να πιστεύουν ότι η έννοια του κόστους ποιότητας, είναι ισοδύναμη με το συνολικό κόστος ποιότητας (Cano et. al, (2012)). Όμως αυτό δεν ισχύει καθώς, το συνολικό κόστος ποιότητας αντιστοιχεί στο χρηματικό ποσό που δαπανήθηκε για την εφαρμογή μεθοδολογιών ποιότητας και βελτίωσης διαδικασιών. Για να αποφευχθεί η οποιαδήποτε σύγχυση, ως COQ θα αναφέρουμε το κόστος κακής ποιότητας. Το κόστος κακής ποιότητας θα έχει ως αποτέλεσμα μια μετρήσιμη απώλεια για τον οργανισμό αλλά και για την κοινωνία γενικότερα. Αυτή η απώλεια μπορεί να μοντελοποιηθεί από μία συνάρτηση. Στην 6σ η συνάρτηση αυτή είναι βασισμένη στη μεταβλητότητα της διαδικασίας.

Στο Κεφάλαιο αυτό θα αναλύσουμε τη συνάρτηση απώλειας ποιότητας που εισήγαγε ο Taguchi (Taguchi ,(2005)) και θα εξηγήσουμε πως μπορούμε να την χρησιμοποιήσουμε για να υπολογίσουμε τη μέση απώλεια μιας διαδικασίας. Επίσης, θα παρουσιαστεί η χρήση του πακέτου SixSigma για μια απλή συνάρτηση απώλειας. Το πιο απλό μοντέλο είναι το «*nominal – the – better*» (Taguchi G., Chowdhury S. & Wu Y. (2005)), ενώ πιο σύνθετα μοντέλα συνοψίζονται στην Ενότητα 3.2.7.

3.3.1. Κόστος κακής ποιότητας

Στη βιβλιογραφία για τη διαχείριση ποιότητας, υπάρχουν πολλοί ορισμοί για την ποιότητα. Δείτε π.χ. Ishikawa K.(1990), Dale B.G. (1999), Evans J. & Lindsay W. (2008). Σε πολλούς από αυτούς, η έννοια της *επάρκειας στις ανάγκες του πελάτη* είναι

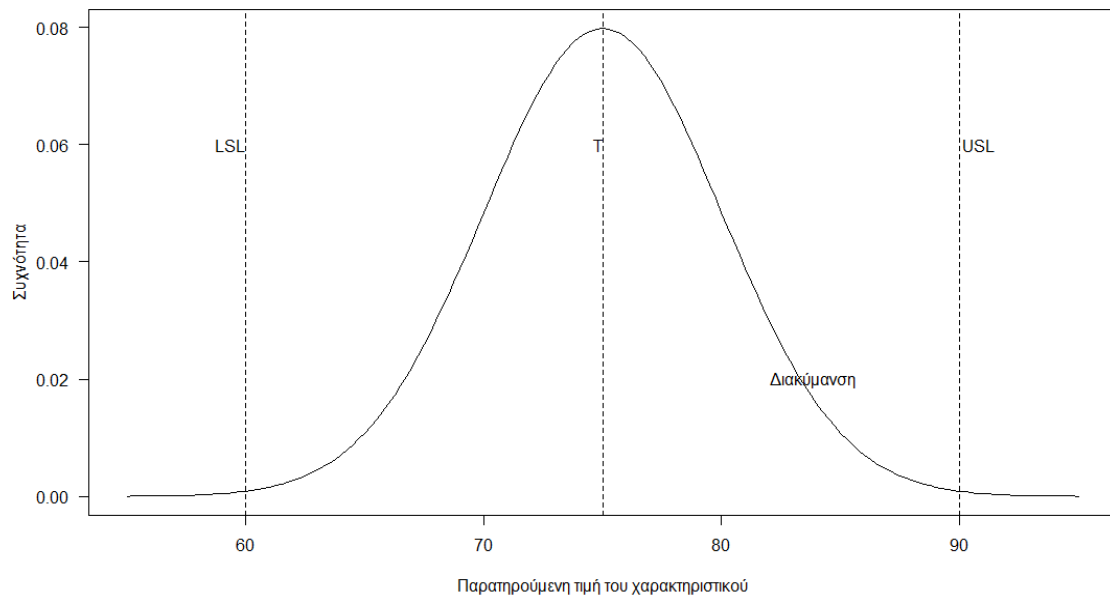
ανεξάρτητη από τη διατύπωση του όποιου ορισμού. Η κύρια πηγή ενός επίσημου ορισμού είναι τα πρότυπα ISO (ISO 9000:2008 Standard). Εκεί μπορούμε να βρούμε τον ακόλουθο ορισμό για την ποιότητα:

Ορισμός: Ως Ποιότητα ορίζεται ο βαθμός στον οποίο ένα σύνολο έμφυτων χαρακτηριστικών ικανοποιεί τις απαιτήσεις.

Οι απαιτήσεις ή οι ανάγκες των πελατών πρέπει να αποτελούν ένα χαρακτηριστικό του προϊόντος (ή της υπηρεσίας) και είναι αναγκαίο να μπορούν να μετρηθούν.

Πιο συγκεκριμένα, οι απαιτήσεις είναι συνήθως μια τιμή στόχος και μια ανοχή γύρω από την τιμή στόχο. Μπορούν να εκφραστούν ως το διάστημα μεταξύ του κατώτερου ορίου προδιαγραφών (τιμή στόχος μείον ανοχή) και του ανώτερου ορίου προδιαγραφών (τιμή στόχος συν ανοχή). Το κατώτερο όριο προδιαγραφών συμβολίζεται με *LSL* (*lower specification limit*) και το ανώτερο όριο προδιαγραφών συμβολίζεται με *USL* (*upper specification limit*). Η τιμή στόχος συμβολίζεται ως *T* (*Target* ή *Target Value*).

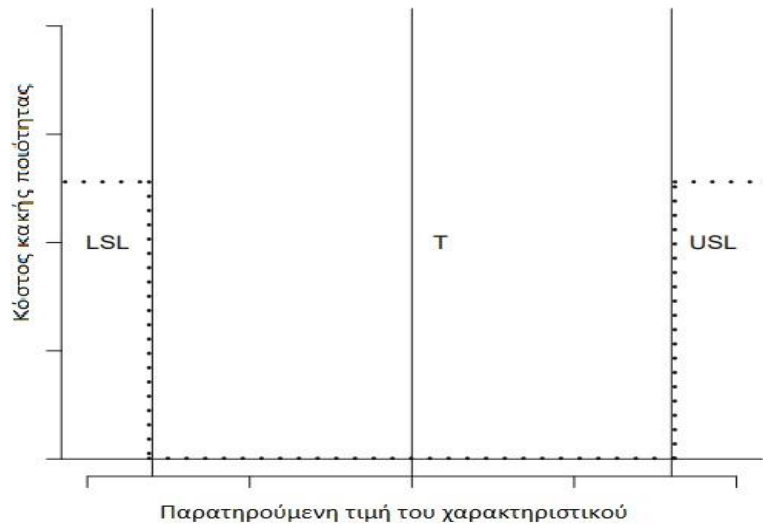
Το χαρακτηριστικό που χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό της ποιότητας λαμβάνοντας υπόψη τις απαιτήσεις ονομάζεται CTQ. Στην πραγματικότητα όμως υπάρχει μια διακύμανση στη διαδικασία και ουσιαστικά αυτό που έχουμε είναι ένα δείγμα μετρήσεων μέσα σε ένα χρονικό διάστημα ή από μια παρτίδα αντικειμένων. Οι τιμές του χαρακτηριστικού στο δείγμα αποτελούν τιμές μιας τυχαίας μεταβλητής από μια κατανομή πιθανότητας. Όπως παρατηρούμε και στο Σχήμα 3.5, αν η διαδικασία κατανέμεται κανονικά (δηλ. οι τιμές του χαρακτηριστικού προέρχονται από Κανονική Κατανομή), οι πραγματικές τιμές του CTQ χαρακτηριστικού συμπεριφέρονται συμμετρικά γύρω από τον μέσο της διαδικασίας (τιμή στόχος), με κάποια διακύμανση. Μακριά από τον μέσο είναι οι μικρότερες συχνότητες.



Σχήμα 3.5.: Κατανομή Τιμών του Χαρακτηριστικού και Όρια Προδιαγραφών.

Όταν το CTQ χαρακτηριστικό βρίσκεται εκτός των ορίων προδιαγραφών, δηλαδή η ποιότητα είναι κακή, η εταιρεία επιβαρύνεται με ένα κόστος το οποίο προφανώς και πρέπει να υπολογιστεί. Το κόστος αυτό μπορεί να προκύψει τόσο από μετρήσιμες απώλειες (π.χ. διάσπαση, ανακύκλωση, σπατάλη, στέρση) όσο και από μη μετρήσιμες απώλειες (π.χ. κακή φήμη, δυσαρεστημένο προσωπικό). Η πρώτη περίπτωση από την οποία μπορεί να προκύψει το κόστος, μπορεί να υπολογιστεί άμεσα, αλλά η δεύτερη περίπτωση πρέπει να εκτιμηθεί με κάποιο τρόπο.

Σύμφωνα με την κλασική προσέγγιση της ποιότητας (Σχήμα 3.6.) μπορούμε να πολλαπλασιάσουμε τον αριθμό των ελαττωματικών αντικειμένων (δηλ. αυτά που είναι εκτός των ορίων προδιαγραφών) με το κόστος κακής ποιότητας για μια περίοδο και να πάρουμε το αποτέλεσμα αυτό ως το κόστος κακής ποιότητας. Η διακεκομμένη γραμμή αντιπροσωπεύει το κόστος κακής ποιότητας, όταν η παρατηρούμενη τιμή του CTQ χαρακτηριστικού μεταβάλλεται. Σε αυτό το παράδειγμα, το κόστος παράγεται μόνο όταν το CTQ χαρακτηριστικό βρίσκεται εκτός των ορίων προδιαγραφών. Όταν το CTQ χαρακτηριστικό είναι εντός των ορίων προδιαγραφών το κόστος είναι μηδενικό. Όμως κάτι τέτοιο απέχει πολύ από την επιστημονική και κατ' επέκταση από την προσέγγιση της 6σ για την ποιότητα. Έτσι χρειαζόμαστε ένα καλύτερο εργαλείο το οποίο είναι η συνάρτηση απώλειας Taguchi (*Taguchi Loss Function*) που περιγράφεται στις επόμενες ενότητες.



Σχήμα 3.6.: Κόστος Κακής Ποιότητας σύμφωνα με την Κλασική Προσέγγιση.

3.3.2. Μοντελοποίηση της Συνάρτησης Απώλειας

Αρχικά, θα ορίσουμε μερικά από τα σύμβολα που θα χρησιμοποιήσουμε στη συνέχεια. Το CTQ χαρακτηριστικό θα συμβολίζεται με το γράμμα Y . Η συνάρτηση απώλειας μας δίνει έναν αριθμό ο οποίος θα υποδεικνύει την αξία του κόστους σε νομισματικές μονάδες (π.χ. σε δολάρια ή σε ευρώ). Το κόστος αυτό εξαρτάται άμεσα από την αξία του CTQ χαρακτηριστικού, το οποίο συνεπάγεται ότι για κάθε τιμή του CTQ χαρακτηριστικού, έχουμε μόνο μια τιμή της απώλειας (κόστος). Η τιμή στόχος του CTQ χαρακτηριστικού υποδηλώνεται με το Y_0 και η ανοχή με το γράμμα Δ .

Έστω ότι το κόστος κακής ποιότητας στο $Y = Y_0 + \Delta$ είναι L_0 . Τότε το L_0 είναι τιμή της L στο $Y = Y_0 + \Delta$ και δίνεται από την σχέση:

$$L_0 = L(Y_0 + \Delta) \quad (3.1)$$

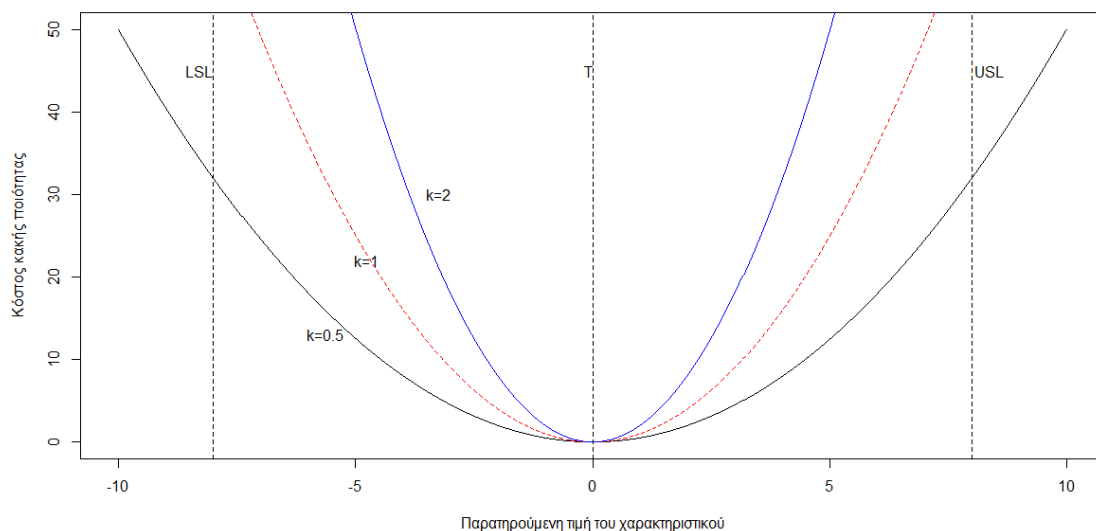
3.3.3. Η Συνάρτηση Απώλειας του Taguchi

Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, δεν αρκεί μόνο το CTQ χαρακτηριστικό να είναι εντός των ορίων προδιαγραφών. Στην πραγματικότητα, σύμφωνα με την προσέγγιση 6σ η ποιότητα πρέπει να προσεγγίζει το στόχο με όσο το δυνατόν μικρότερη διακύμανση. Επιπλέον η συνάρτηση απώλειας πρέπει να σχετίζεται με την απόσταση από την τιμή στόχο. Σύμφωνα με τους Taguchi et al. (2005), η συνάρτηση απώλειας (γνωστή και ως συνάρτηση απώλειας Taguchi) ορίστηκε ως:

$$L(Y) = k(Y - Y_0)^2 \quad (3.2.)$$

Η συνάρτηση αυτή έχει τις παρακάτω ιδιότητες:

- Η απώλεια είναι ίση με το μηδέν, όταν η παρατηρούμενη τιμή είναι ίση με την τιμή στόχο.
- Η απώλεια αυξάνεται (υψηλότερο είναι το κόστος κακής ποιότητας), όταν η παρατηρούμενη τιμή απομακρύνεται από την τιμή στόχο.
- Η σταθερά k είναι ενδεικτική του κινδύνου ύπαρξης μεγαλύτερης διακύμανσης, δηλαδή μας δείχνει πόσο γρήγορα αυξάνεται το κόστος καθώς η απόσταση από την τιμή στόχο αυξάνεται (δείτε Σχήμα 3.7.)



Σχήμα 3.7: Η Συνάρτηση Απώλειας του Taguchi

Μόλις αξιολογήσουμε το κόστος κακής ποιότητας για ένα μεμονωμένο αντικείμενο (όπως περιγράφεται στην Ενότητα 3.2.1.) μπορούμε να υπολογίσουμε την τιμή της σταθεράς k , αντικαθιστώντας την τιμή στόχο Y_0 με την τιμή της στον τύπο (3.2.). λαμβάνοντας υπόψη το κόστος στο L_0 (δείτε (3.1)). Έχουμε λοιπόν:

$$L(Y) = k(Y - Y_0)^2 \Rightarrow L(Y_0 + \Delta) = k((Y_0 + \Delta) - Y_0) \Rightarrow L_0$$

$$k \times \Delta = L_0 \Rightarrow k = \frac{L_0}{\Delta}$$

Ο τύπος (μορφή) της συνάρτησης απώλειας είναι πάντα ο ίδιος και άρα μπορούμε να μοντελοποιήσουμε την συνάρτηση απώλειας γνωρίζοντας την ανοχή (Δ) και το κόστος κακής ποιότητας ενός μεμονωμένου στοιχείου (L_0).

Παράδειγμα 3.4.:(Ποσότητα γάλακτος σε μπουκάλια)

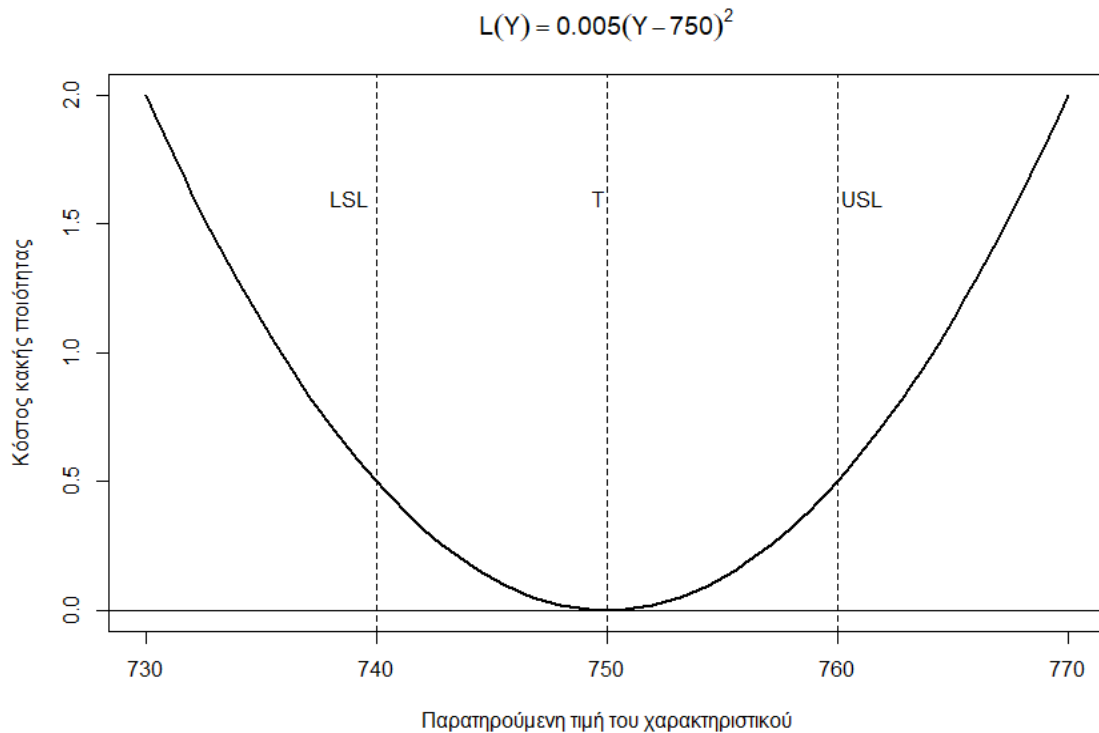
Μια γαλακτοβιομηχανία γεμίζει με γάλα τα μπουκάλια. Το CTQ χαρακτηριστικό είναι η ποσότητα του γάλακτος που μπαίνει σε κάθε μπουκάλι. Υποθέτουμε ότι ο κάτοχος της Κύριας Μαύρης Ζώνης θέλει να αξιολογήσει τη διαδικασία γεμίσματος των μπουκαλιών. Η τιμή στόχος είναι 750ml. Τα παρακάτω δεδομένα είναι γνωστά για τη γαλακτοβιομηχανία:

- Ο πελάτης θα αποδεχθεί τα μπουκάλια αν η ποσότητα γάλακτος είναι μεταξύ 740ml και 760 ml.
- Όταν η ποσότητα γάλακτος δεν πληροί τις απαιτήσεις, απορρίπτεται και εκτιμάται ότι το κόστος είναι 0,05 ευρώ.

Επομένως έχουμε ότι η τιμή στόχος είναι $Y_0 = 750$, η ανοχή της διαδικασίας είναι $\Delta = 10\text{ml}$ και το κόστος στο $Y_0 + \Delta$ είναι $L_0 = L(Y_0 + \Delta) = 0.05$. Άρα, η τιμή του k είναι $k = 0.05/10 = 0.005$

Επομένως η συνάρτηση απώλειας για τη διαδικασία γεμίσματος μπουκαλιών είναι $L(Y) = 0.005(Y - 750)^2$ και μπορούμε λοιπόν να κατασκευάσουμε τη γραφική παράσταση της συνάρτησης απώλειας του Taguchi με χρήση της R. Αυτό γίνεται με τις παρακάτω εντολές:

```
curve(0.005*(x-750)^2,730,770,  
      lty = 1,  
      lwd = 2,  
      ylab = "Κόστος κακής ποιότητας",  
      xlab = "Παρατηρούμενη τιμή του χαρακτηριστικού",  
      main = expression (L(Y) == 0.005(Y-750)^2))  
abline (v=740, lty=2)  
abline (v=760, lty=2)  
abline (v=750, lty=2)  
abline (h=0)  
text(750, 1.6, "T", adj=1.2)  
text(740, 1.6, "LSL", adj=1.2)  
text(760, 1.6, "USL", adj=-0.1)
```



Σχήμα 3.8.: Συνάρτηση Απώλειας του Taguchi για το Παράδειγμα 3.4.

Παρατηρούμε ότι όταν η παρατηρούμενη τιμή του χαρακτηριστικού είναι ακριβώς η τιμή στόχος τότε το κόστος κακής ποιότητας είναι ίσο με το μηδέν. Όσο απομακρυνόμαστε από την τιμή στόχο, αλλά βρισκόμαστε μέσα στα όρια προδιαγραφών το κόστος κακής ποιότητας κυμαίνεται από το 0 μέχρι το 0.5. Όταν όμως βρεθούμε εκτός των ορίων προδιαγραφών, είτε κάτω από τα 740ml είτε πάνω από τα 760ml, τότε το κόστος κακής ποιότητας αυξάνεται και μπορεί να φτάσει το 2 (σε χρηματικές μονάδες).

3.3.4. Συνάρτηση Μέσης Απώλειας

Στην προηγούμενη ενότητα εισαγάγαμε την έννοια της συνάρτησης απώλειας, σε ότι αφορά την ποιότητα για ένα αντικείμενο. Ο σκοπός της συνάρτησης απώλειας είναι ο υπολογισμός του κόστους κακής ποιότητας για μια διαδικασία σε μια χρονική περίοδο.

Όταν έχουμε ένα πλήθος n στοιχείων σε μια περίοδο ή ακόμα ένα σύνολο από αντικείμενα, τότε μιλάμε για τη μέση απώλεια ανά μονάδα (L), η οποία λαμβάνεται από το μέσο όρο των μεμονωμένων απωλειών. Δηλαδή,

$$L = \frac{\sum_{i=0}^n k(Y_i - Y_0)^2}{n} = k \times \frac{\sum_{i=0}^n (Y_i - Y_0)^2}{n}.$$

Παρατηρούμε ότι ο δεύτερος όρος είναι η μέση τετραγωνική διαφορά (*Mean Squared Difference*, MSD) από την τιμή στόχο. Έτσι λοιπόν η μέση απώλεια ανά μονάδα σε ένα δεδομένο δείγμα (ή χρονική περίοδο) μπορεί να εκφραστεί απλά ως:

$$L = k(MSD) \quad (3.3.)$$

Παράδειγμα 3.5.: (Ποσότητα γάλακτος σε μπουκάλια, συνέχεια):

Για να υπολογίσουμε τη μέση συνάρτηση απώλειας για τη γαλακτοβιομηχανία θα χρησιμοποιήσουμε ένα δείγμα 20 μπουκαλιών. Οι ποσότητες γάλακτος που περιέχονται σε κάθε μπουκάλι φαίνονται στον Πίνακα 3.2.. Για να μπορέσουμε να πάρουμε αυτά τα δεδομένα χρειαστήκαμε την εντολή `ss.data.ca` του πακέτου `SixSigma`.

Πίνακας 3.2.: Δεδομένα για το παράδειγμα των μπουκαλιών γάλακτος.

755,81	748,38	747,16	750,46
750,54	748,11	747,53	749,27
751,05	753,07	749,22	750,33
749,52	749,56	746,76	750,26
749,21	750,08	747,64	751,29

Επομένως πληκτρολογώντας την ακόλουθη εντολή, μπορούμε να λάβουμε τη μοναδιαία μέση απώλεια, η οποία ισούται με 0.02131332.

```
0.005*(sum((ss.data.ca$Volume-750)^2))/length(ss.data.ca$Volume)
[1] 0.02131332
```

3.3.5. Χρήση της Συνάρτησης Απώλειας μέσα στον Κύκλο DMAIC

Η συνάρτηση απώλειας χρησιμοποιείται στη φάση μέτρησης για την απόκτηση της αναμενόμενης απώλειας (κατά μέσο όρο) μιας ομάδας αντικειμένων (π.χ. σε μια περίοδο, μια παρτίδα, μια περιοχή κλπ.). Για να προκύψει αυτή η αναμενόμενη απώλεια πολλαπλασιάζουμε τον αριθμό των αντικειμένων της ομάδας με την

αναμενόμενη απώλεια ανά αντικείμενο. Θα το δούμε αυτό στο παράδειγμα με την ποσότητα γάλακτος στα μπουκάλια.

Παράδειγμα 3.6.: (Ποσότητα γάλακτος σε μπουκάλια – συνέχεια):

Η γαλακτοβιομηχανία γεμίζει 500.000 μπουκάλια με γάλα ανά μήνα. Επομένως η αναμενόμενη απώλεια σε ένα μήνα δίνεται με χρήση της παρακάτω εντολής. Η απάντηση είναι: 10656.66.

```
500000*0.005*(sum((ss.data.ca$Volume-750)^2))/length(ss.data.ca$Volume)
[1]10656.66
```

Σε αυτό το σημείο είναι αναγκαίο να επισημάνουμε ότι η συνάρτηση απώλειας δεν αποτελεί ένα μεμονωμένο εργαλείο. Η συνάρτηση απώλειας είναι χρήσιμη και για άλλα πράγματα, όπως για παράδειγμα ο ορισμός των ορίων ανοχής τόσο για τους πελάτες όσο και για τους προμηθευτές, χρησιμοποιώντας τις γνώσεις που υπάρχουν για τις αντιλήψεις των πελατών σχετικά με τις προδιαγραφές. Τελικά, αυτό οδηγεί στον σχεδιασμό του πλάνου δειγματοληψίας αποδοχής. Για περισσότερες λεπτομέρειες περί πλάνων δειγματοληψίας αποδοχής, δείτε Kiermeier A. (2008).

Επιπλέον στη φάση βελτίωσης, η συνάρτηση απώλειας ποιότητας χρησιμοποιείται για να εξακριβωθεί το οικονομικό αντίκτυπο μιας νέας μεθόδου, ή ενός νέου υλικού. Με άλλα λόγια, αντιπροσωπεύει ένα τρόπο αξιολόγησης (κυρίως κόστους) των βελτιωτικών ενεργειών σε μια διαδικασία.

3.3.6. Συνάρτησης Απώλειας με Χρήση του Πακέτου SixSigma

Στο πακέτο SixSigma που διαθέτει η R υπάρχει μια συνάρτηση η οποία ονομάζεται `ss.lfa` και εκτελεί την συνάρτηση απώλειας. Για να μπορέσουμε να δούμε την χρησιμότητα αυτής της συνάρτησης θα χρησιμοποιήσουμε τα δεδομένα που περιγράψαμε στις προηγούμενες ενότητες του κεφαλαίου.

Η `ss.lfa` χρησιμοποιεί τα ορίσματα που δίνονται στον Πίνακα 3.3 και επιστρέφει μια λίστα με στοιχεία, τα οποία φαίνονται στον Πίνακα 3.4.

Πίνακας 3.3: Ορίσματα της Συνάρτησης ss.lfa

Ορίσματα	Περιγραφή
lfa.data	Πλαίσιο δεδομένων με δεδομένα δείγματος
lfa.ctq	Όνομα πεδίου στο πλαίσιο δεδομένων που περιέχει δεδομένα
lfa.Delta	Ανοχή διαδικασίας
lfa.Yo	Στόχος διαδικασίας
lfa.Lo	Κόστος κακής ποιότητας στο όριο ανοχής
lfa.size	Αριθμός αντικειμένων για τον υπολογισμό της συνολικής απώλειας σε μια ομάδα
lfa.output	Σειρά με τύπο αποτελέσματος : «text», «plot», «both»
lfa.sub	Υπότιτλος γραφικής παράστασης

Πίνακας 3.4: Τιμές που επιστρέφει η Συνάρτηση ss.lfa

Τιμές	Περιγραφή
lfa.k	Σταθερά k για την συνάρτηση απώλειας
lfa.lf	Έκφραση της συνάρτησης απώλειας
lfa.MSD	Μέσες τετραγωνικές διαφορές από τον στόχο
lfa.avLoss	Μέση απώλεια ανά μονάδα της διαδικασίας
lfa.Loss	Συνολική απώλεια διαδικασίας (αν δίνεται μέγεθος)

Εάν χρησιμοποιηθούν οι επιλογές «both» ή «plot» στο όρισμα lfa.output, τότε εκτός από τα δεδομένα και τους υπολογισμούς, δημιουργείται μια γραφική παράσταση με την αλγεβρική έκφραση της συνάρτησης και του γραφήματός της.

Για την αξιολόγηση της συνάρτησης απώλειας σε μια συγκεκριμένη τιμή του Y (το CTQ χαρακτηριστικό), χρησιμοποιείται η συνάρτηση ss.lf. Η συνάρτηση αυτή επιβάλλει ένα κόστος σε μια παρατηρούμενη τιμή η οποία είναι μακριά από την τιμή στόχο. Χρησιμοποιείται ως: ss.lf(lfa.Y1, lfa.Delta, lfa.Y0, lfa.L0). Τα ορίσματα της ss.lf δίνονται στον παρακάτω Πίνακα 3.5..

Πίνακας 3.5.: Ορίσματα της Συνάρτησης ss.lfa

Ορίσματα	Περιγραφή
lfa.Y1	Η παρατηρούμενη τιμή του CTQ χαρακτηριστικού (κρίσιμη για την ποιότητα) η οποία θα αξιολογηθεί
lfa.Delta	Η ανοχή για το CTQ
lfa.Y0	Η τιμή στόχος για το CTQ
lfa.Lo	Το κόστος κακής ποιότητας όταν το χαρακτηριστικό είναι $Y_0 + \Delta$

Παράδειγμα .3.7.: (Ποσότητα γάλακτος σε μπουκάλια, συνέχεια)

Με την ακόλουθη συνάρτηση μπορούμε να λάβουμε τα αποτελέσματα που θέλουμε για την συνάρτηση απώλειας.

```
ss.lfa(ss.data.ca, "Volume", 10, 750, 0.05,  
      lfa.size=500000, lfa.output= "both",  
      lfa.sub="750ml.Ca Project")
```

Με την εντολή αυτή παίρνουμε αποτελέσματα για την τιμή της σταθερά k , την έκφραση της συνάρτησης απώλειας, την τιμή των μέσων τετραγωνικών διαφορών από τον στόχο, τη μέση απώλεια ανά μονάδα της διαδικασίας και την συνολική απώλεια της διαδικασίας. Αυτά λαμβάνονται καθώς ως όρισμα της lfa.output δώσαμε την εντολή both. Επιπλέον λαμβάνουμε και τη γραφική παράσταση (Σχήμα 3.9.).

\$lfa.k

[1] $5e^{-04}$

\$lfa.lf

Expression(**L == $5e^{-04}$ %.(Y-750)^2**)

\$lfa.MSD

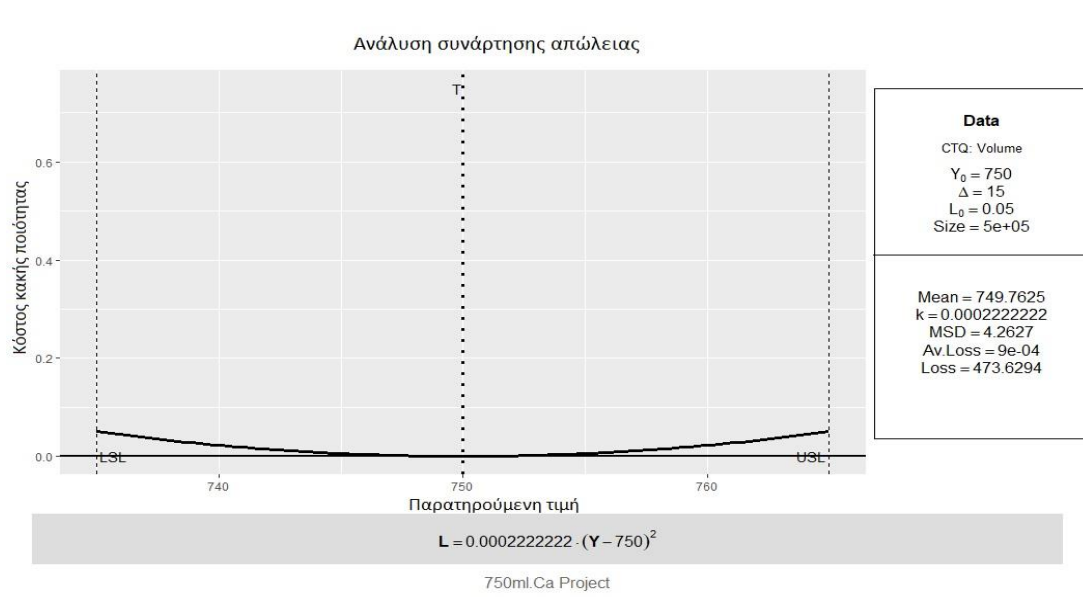
[1] 4.262665

\$lfa.avLoss

[1] 0.002131332

\$lfa.Loss

[1] 1065.666



Σχήμα 3.9.: Γραφική παράσταση της συνάρτησης απώλειας

Στο παραπάνω σχήμα ουσιαστικά βλέπουμε την συνάρτηση απώλεια για το παράδειγμα με την ποσότητα γάλακτος στα μπουκάλια. Τα όρια προδιαγραφών και η τιμή στόχος παρουσιάζονται στο γράφημα ως οι 3 κάθετες διακεκομμένες γραμμές. Κάτω από το γράφημα φαίνεται η αλγεβρική έκφραση της συνάρτησης. Στα δεξιά του γραφήματος έχουμε τις καταχωρήσεις των δεδομένων (το CTQ χαρακτηριστικό, την τιμή στόχο, την ανοχή, το κόστος κακής ποιότητας και το μέγεθος της παραγωγής). Στο δεύτερο πίνακάκι στα δεξιά του γραφήματος υπάρχουν τα υπολογιζόμενα

αποτελέσματα (μέση τιμή, σταθερά k , MSD , μέση απώλεια ανά μονάδα και η συνολική απώλεια).

3.3.7. Άλλα μοντέλα

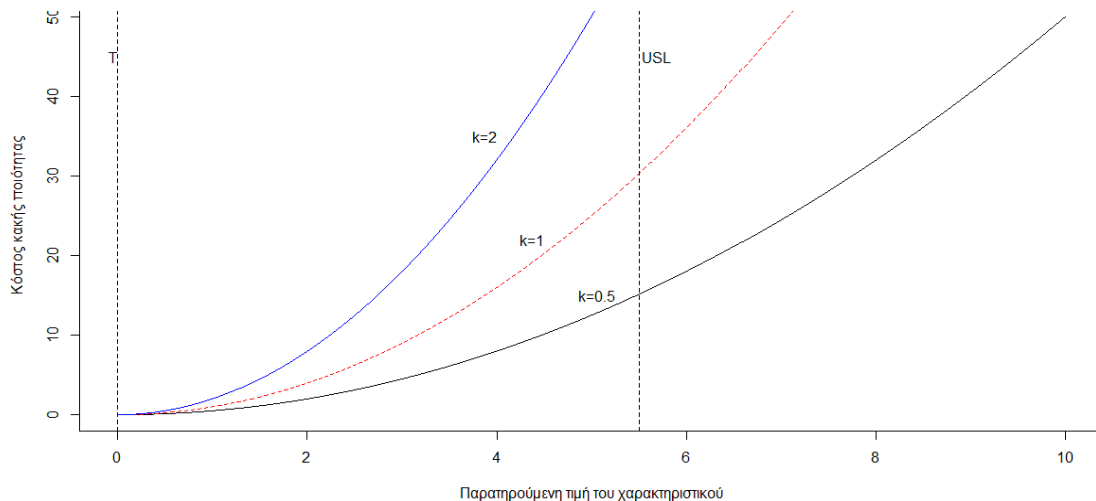
Σε όλα τα προηγούμενα παραδείγματα αυτού του κεφαλαίου υποθέταμε ότι υπήρχαν και τα δύο όρια προδιαγραφών (άνω και κάτω όριο). Το μοντέλο αυτό είναι γνωστό ως «nominal-the better», δηλαδή θέλουμε να είναι η τιμή του χαρακτηριστικού όσο πιο κοντά γίνεται στην τιμή στόχο. Όμως στην πραγματικότητα δεν είναι όλες οι διαδικασίες έτσι. Υπάρχουν και αυτές που έχουν μόνο το ένα από τα δύο όρια προδιαγραφών. Στη συνέχεια θα περιγράψουμε τις δύο πιο γνωστές. Για περισσότερες λεπτομέρειες, δείτε . Taguchi G., Chowdhury S. & Wu Y. (2005).

Χαρακτηριστικό *Smaller – the better*

Ένα smaller - the better χαρακτηριστικό έχει μόνο ένα άνω όριο προδιαγραφών (USL). Δηλαδή πάνω από αυτήν την τιμή το προϊόν δεν πληροί τις απαιτήσεις του πελάτη. Επομένως η ιδανική τιμή στόχος είναι το μηδέν. Παράδειγμα τέτοιου χαρακτηριστικού είναι η ώρα εξυπηρέτησης ενός πελάτη. Η συνάρτηση απώλειας σε αυτή την περίπτωση είναι:

$$L = kY^2.$$

Αυτό σημαίνει ότι η απώλεια ελαχιστοποιείται καθώς η παρατηρούμενη τιμή του χαρακτηριστικού μειώνεται. Επιπλέον, όσο υψηλότερη είναι η παρατηρούμενη τιμή, τόσο μεγαλύτερο είναι το κόστος κακής ποιότητας.



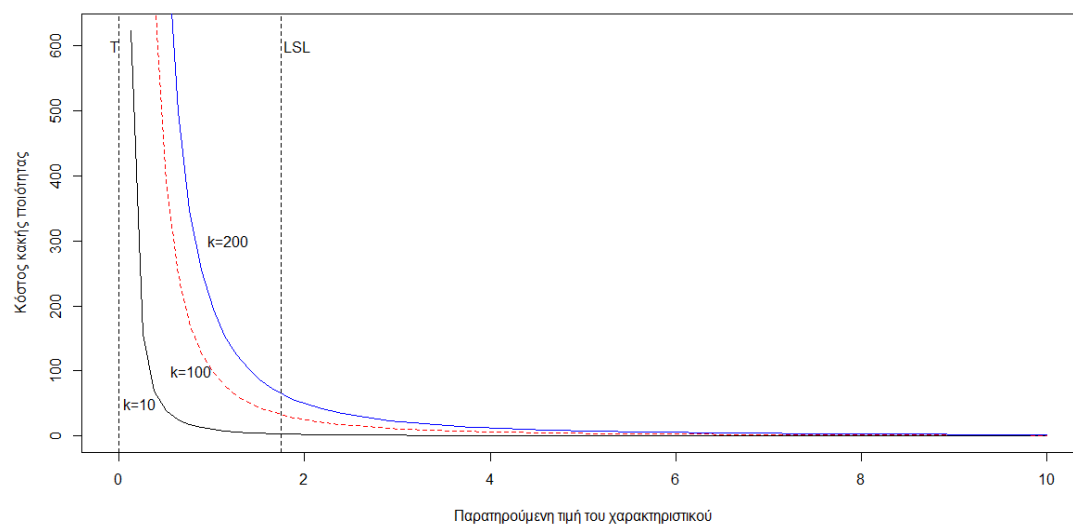
Σχήμα 3.10.: Smaller -the better Συνάρτηση Απώλειας.

Χαρακτηριστικό Larger – the better

Το larger – the better χαρακτηριστικό αντιστοιχεί στην περίπτωση μόνο ενός κάτω ορίου προδιαγραφών (*LSL*). Στην προκειμένη περίπτωση, η αρχική τιμή στόχος είναι το άπειρο (πρακτικά, μια πολύ μεγάλη θετική πραγματική τιμή). Τυπικό παράδειγμα ενός τέτοιου χαρακτηριστικού είναι η αντοχή ενός υλικού. Η εξίσωση της συνάρτησης απώλειας για αυτό το μοντέλο είναι η

$$L = \frac{k}{\gamma^2}.$$

Παρατηρούμε ότι η απώλεια ελαχιστοποιείται καθώς αυξάνεται η παρατηρούμενη τιμή του χαρακτηριστικού. Όσο μικρότερη είναι η παρατηρούμενη τιμή του χαρακτηριστικού, τόσο μεγαλύτερο είναι το κόστος κακής ποιότητας.



Σχήμα 3.11.: Larger -the better Συνάρτηση Απώλειας.

Οι υπολογισμοί για την συνάρτηση απώλειας για τα χαρακτηριστικά smaller – the better και larger – the better γίνονται με παρόμοιο τρόπο με αυτόν που περιγράψαμε για το nominal – the better μοντέλο.

3.2.8. Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό παρουσιάστηκε η έννοια της κατά Taguchi συνάρτησης απώλειας. Παρουσιάστηκε επίσης και η έννοια του κόστους ποιότητας (CQQ) και μοντελοποιήσαμε τη συνάρτηση του κόστους. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με χρήση της R και το πακέτο SixSigma, για το «nominal – the better» μοντέλο. Παρουσιάστηκε επίσης και μια πρακτική εφαρμογή. Τέλος, έγινε και μια σύντομη αναφορά στα μοντέλα για χαρακτηριστικά «smaller – the better» και «larger – the better».

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ R ΓΙΑ ΤΗ ΦΑΣΗ ΜΕΤΡΗΣΗΣ

4.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα αναφερθούμε σε χρήσιμα εργαλεία κατά τη φάση μέτρησης (Measure) του κύκλου DMAIC. Στη φάση αυτή κρίνεται απαραίτητο, να προσδιοριστεί η απόδοση των βασικών γραμμών και στόχων της διαδικασίας και να οριστούν οι μεταβλητές καταχώρηση / αποτέλεσμα της διαδικασίας. Επιπλέον τα μετρητικά συστήματα πρέπει να επικυρώνονται. Στην παρούσα διπλωματική θα παρουσιάσουμε τα τρία πιο αντιπροσωπευτικά εργαλεία τα οποία είναι η ανάλυση μετρητικού συστήματος, η ανάλυση Pareto και η ανάλυση ικανότητας διεργασίας.

4.2 Ανάλυση Μετρητικού Συστήματος

Η ανάλυση μετρητικού συστήματος (Measurement System Analysis, MSA), γνωστή και ως R&R μελέτη διαμετρημάτων (gauges), προσδιορίζει και ποσοτικοποιεί τις πηγές της διακύμανσης που επηρεάζουν το μετρητικό σύστημα. Το R&R σημαίνει επαναληψιμότητα (*Repeatability*) και αναπαραγωγιμότητα (*Reproducibility*). Η μεταβλητότητα του μετρητικού συστήματος (και οι συνιστώσες αυτή) είναι εξαιρετικά σημαντική στη μεθοδολογία 6σ αφού αν η μεταβλητότητα του μετρητικού συστήματος δεν ελέγχεται, τότε η διαδικασία δεν μπορεί να βελτιωθεί. Αν κάποιος θέλει να εκτελέσει μια μελέτη R&R μπορεί να χρησιμοποιήσει αρκετά από τα επιμέρους εργαλεία που περιγράφονται στην συνέχεια, όπως π.χ. τα διαγράμματα ελέγχου και η ανάλυση διακύμανσης (ANOVA).

Υπάρχουν δύο κύριοι τύποι μελετών: Οι διασταυρούμενες μελέτες (crossed studies) και οι εδραιωμένες μελέτες (nested studies). Στη συνέχεια, θα παρουσιάσουμε τον τρόπο με τον οποίο τα εργαλεία που αναφέραμε προηγουμένως, μπορούν να χρησιμοποιηθούν με χρήση της R στα πλαίσια της εφαρμογής ενός προγράμματος 6σ. Επιπλέον θα δοθεί μια ερμηνεία των αποτελεσμάτων που θα προκύψουν από το πακέτο SixSigma της R για την περίπτωση των διασταυρούμενων μελετών. Θα χρησιμοποιηθούν οι διασταυρούμενες μελέτες καθώς στο παράδειγμα

που χρησιμοποιούμε έχουμε δύο παράγοντες οι οποίοι διασταυρώνονται. Δηλαδή υπάρχει τουλάχιστον μία παρατήρηση σε κάθε συνδυασμό κατηγοριών για τους δύο παράγοντες. Επιπλέον μπορούμε να υπολογίσουμε και την αλληλεπίδρασή τους. Αντίθετα, εδραιωμένες έχουμε όταν έχουμε 2 παράγοντες και κάθε κατηγορία του πρώτου παράγοντα συνυπάρχει μόνο με μία κατηγορία του άλλου παράγοντα. Επιπλέον στην προκειμένη περίπτωση δεν έχουμε αλληλεπίδραση καθώς δε μπορούμε να έχουμε κάθε συνδυασμό ενός παράγοντα μαζί με κάθε συνδυασμό του άλλου παράγοντα.

Αρχικά, θα δώσουμε κάποιους ορισμούς σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα ενώ στη συνέχεια θα εξηγήσουμε τον τρόπο με τον οποίο μπορούμε να συλλέξουμε δεδομένα για μια MSA, χρησιμοποιώντας ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα. Θα ολοκληρώσουμε το Κεφάλαιο μια αριθμητική και γραφική ανάλυση, με ταυτόχρονη εξήγηση των αποτελεσμάτων.

4.2.1. Ορισμοί

Η ανάλυση μετρητικού συστήματος (MSA) είναι η σημαντικότερη δραστηριότητα που πραγματοποιείται στη φάση μέτρησης, καθώς κρίνεται αναγκαίο να υπάρχει ένα έγκυρο μετρητικό σύστημα. Αυτό δεν είναι το ίδιο με το «ακριβές»: πάντοτε υπάρχει μια μεταβλητότητα στη διαδικασία. Στην πραγματικότητα ένα καλό μετρητικό σύστημα έχει μόνο τυχαία μεταβλητότητα, λόγω βέβαια της έμφυτης διακύμανσης του μετρηθέντος στοιχείου. Αυτό σημαίνει ότι δεν πρέπει να έχει σημαντική μεταβλητότητα από τους ελεγκτές (π.χ. χειριστές, μηχανές), τα μέρη, το χρόνο ή άλλους παράγοντες.

Θα ορίσουμε μερικές από τις έννοιες που εμπλέκονται στην MSA. Οι ορισμοί αυτοί προέρχονται από το ISO 3534 -1 (2006), (Statistics).

Ακρίβεια: η εγγύτητα της συμφωνίας μεταξύ ενός αποτελέσματος δοκιμής και της αποδεκτής αναφερόμενης τιμής.

Ορθότητα: η εγγύτητα της συμφωνίας μεταξύ της μέσης τιμής που προκύπτει από μια μεγάλη σειρά αποτελεσμάτων δοκιμών και της αποδεκτής αναφερόμενης τιμής.

Πιστότητα: η εγγύτητα της συμφωνίας μεταξύ ανεξάρτητων αποτελεσμάτων δοκιμών που προκύπτουν υπό καθορισμένες συνθήκες.

Επαναληψιμότητα: ακρίβεια υπό συνθήκες επανάληψης (όπου τα ανεξάρτητα αποτελέσματα των δοκιμών προκύπτουν με την ίδια μέθοδο σε όμοια αντικείμενα ελέγχου, στο ίδιο εργαστήριο με τον ίδιο χειριστή χρησιμοποιώντας τον ίδιο εξοπλισμό σε σύντομα χρονικά διαστήματα).

Αναπαραγωγισιμότητα: ακρίβεια υπό συνθήκες αναπαραγωγισιμότητας (όπου τα αποτελέσματα των δοκιμών προκύπτουν με την ίδια μέθοδο σε όμοια αντικείμενα ελέγχου, σε διαφορετικά εργαστήρια με διαφορετικούς χειριστές χρησιμοποιώντας διαφορετικό εξοπλισμό).

Συνοπτικά, η επαναληψιμότητα μπορεί να οριστεί ως η έμφυτη μεταβλητότητα του μετρητικού συστήματος (υπό παρόμοιες συνθήκες) και η αναπαραγωγισιμότητα ως η μεταβλητότητα του μετρητικού συστήματος υπό διαφορετικές συνθήκες (ομάδες), όπως για παράδειγμα χειριστές, μηχανές, ή μέρα της εβδομάδας.

4.2.2. ΑΝΑΛΥΣΗ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

4.2.2.1. Συλλογή δεδομένων

Όπως σε όλη την στατιστική έρευνα, έτσι και στην βσ, η τυχαιότητα είναι πολύ σημαντική. Κατά συνέπεια πρέπει να επιλέξουμε με τυχαίο τρόπο τα μέρη (πρότυπο, κομμάτι, μηχανικά αντικείμενα, δραστηριότητες υπηρεσιών) και να τα αναθέσουμε στους ελεγκτές (μηχανές, μετρητές, χειριστές) και πάλι με τυχαίο τρόπο.

Στο παράδειγμα που ακολουθεί, θα θεωρήσουμε ότι έχουμε n μετρήσεις από κάθε μέρος ($n \geq 2$) για κάθε ελεγκτή. Έστω ότι a είναι ο αριθμός των μερών (*parts*) και b είναι ο αριθμός των ελεγκτών ($aprg$) και έστω ότι αποθηκεύουμε τα δεδομένα ως πλαίσιο δεδομένων με μια αριθμητική μεταβλητή (το χαρακτηριστικό που μετράμε) και δύο παράγοντες (μέρη και ελεγκτές). Επομένως έχουμε $n \cdot a \cdot b$ παρατηρήσεις.

Παράδειγμα 4.1: (Τάση μπαταριών)

Μια εταιρεία κατασκευής μπαταριών κατασκευάζει διαφορετικούς τύπους μπαταριών για οικιακή χρήση. Ο κάτοχος της μαύρης ζώνης πρέπει να ξεκινήσει ένα βσ πρότζεκτ για να βελτιώσει τη γραμμή παραγωγής μπαταριών 1.5V. Θεωρεί από τη φάση ορισμού ότι η τάση της μπαταρίας είναι το CTQ χαρακτηριστικό της

διαδικασίας. Προτού ξεκινήσουν άλλες αναλύσεις, πρέπει να αξιολογηθεί το μετρητικό σύστημα.

Στην εταιρεία υπάρχουν διαθέσιμα 2 βολτόμετρα. Επιλέγονται τυχαία 3 διαφορετικές μπαταρίες και με χρήση βολτόμετρου, μετριέται η τάση σε κάθε μπαταρία 3 φορές. Τα αποτελέσματα από αυτές τις μετρήσεις φαίνονται στον πίνακα 4.1. . Για να λάβουμε τα δεδομένα αυτά, χρησιμοποιήσαμε την παρακάτω εντολή στην R:

```
ss.data.batteries
```

Πίνακας 4.1.: (Μετρήσεις τάσης μπαταριών)

AA	Βολτόμετρο	Μπαταρία	Επαναλήψεις	Τάση
1	1	1	1	1.4727
2	1	1	2	1.4206
3	1	1	3	1.4754
4	1	2	1	1.5083
5	1	2	2	1.5739
6	1	2	3	1.4341
7	1	3	1	1.5517
8	1	3	2	1.5483
9	1	3	3	1.4614
10	2	1	1	1.3337
11	2	1	2	1.6078
12	2	1	3	1.4767
13	2	2	1	1.4066
14	2	2	2	1.5951
15	2	2	3	1.8419
16	2	3	1	1.7087
17	2	3	2	1.8259
18	2	3	3	1.5444

Έτσι λοιπόν, σε αντιστοιχία με τα όσα αναφέραμε προηγουμένως, τα μέρη είναι οι μπαταρίες ($a = 3$) και οι ελεγκτές είναι τα βολτόμετρα ($b = 2$). Αφού η μέτρηση λαμβάνεται 3 φορές ($n = 3$) έχουμε λοιπόν $3 \cdot 2 \cdot 3 = 18$. Μπορούμε να αποθηκεύσουμε τα δεδομένα σε ένα πλαίσιο δεδομένων με τις παρακάτω εντολές. Τρέχοντας τον παραπάνω κώδικα λαμβάνουμε ένα πλαίσιο δεδομένων (data frame), το οποίο έχουμε ονομάσει batteries.

```

voltemer <- factor(rep(1:2, each = 9))
battery <- factor(rep(rep(1:3, each = 3),2))
run <- factor(rep(1:3, 6))
voltage <- c(1.4727, 1.4206, 1.4757, 1.5083, 1.5739, 1.4341, 1.5517, 1.5483, 1.4614,
             1.3337, 1.6078, 1.4767, 1.4066, 1.5951, 1.8419, 1.7087, 1.8259, 1.5444)
batteries <- data.frame(voltemer, battery, run, voltage)

```

4.2.2.2. Εφαρμογή της Ανάλυσης Διακύμανσης (ANOVA)

Όπως ήδη αναφέραμε, το σημείο κλειδί είναι ο προσδιορισμός των πηγών μεταβλητότητας μέσα στο μετρητικό σύστημα. Αυτό μπορεί να γίνει εφαρμόζοντας την τεχνική της ανάλυσης διακύμανσης (ANOVA).

Ένα ικανοποιητικό (ίσως και ιδεατό) μετρητικό σύστημα πρέπει να έχει τυχαία μεταβλητότητα, εξαιτίας της έμφυτης διακύμανσης του μετρηθέντος στοιχείου και καμία μεταβλητότητα που να προκύπτει από τους ελεγκτές, τα μέρη κ.λπ.. Η R μέσω των στατιστικών συναρτήσεων lm και anova από το πακέτο stats μας δίνει τη δυνατότητα να εκτελέσουμε ανάλυση διακύμανσης. Για να μπορέσουμε να αξιολογήσουμε το μετρητικό σύστημα, κρίνεται αναγκαίο, να διαχωριστεί η μεταβλητότητα στα στοιχεία που παρουσιάζονται στο Σχήμα 4.1..



Σχήμα 4.1.: Διάσπαση Μεταβλητότητας.

Η συνολική μεταβλητότητα μπορεί να χωριστεί στη μεταβλητότητα από την R&R μελέτη διαμετρημάτων και στη μεταβλητότητα από μέρος σε μέρος (*part-to-part variation*). Επίσης, η μεταβλητότητα από την R&R μελέτη διαμετρημάτων οφείλεται στην έμφυτη τυχαιότητα της διαδικασίας και μπορεί να χωριστεί σε επαναληψιμότητα και αναπαραγωγισιμότητα. Η μεταβλητότητα από μέρος σε μέρος είναι αυτή που δεν οφείλεται στο μετρητικό σύστημα. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται το μοντέλο της ανάλυσης διακύμανσης για τις παραπάνω συνιστώσες της μεταβλητότητας. Για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με μοντέλα ανάλυσης διακύμανσης δείτε Hardeo Sahai & Mohammed I. Ageel (2000).

Έστω ότι έχουμε ένα ANOVA πίνακα με δύο παράγοντες A και B. Ο παράγοντας A αντιστοιχεί στα μέρη και ο παράγοντας B αντιστοιχεί στους εκτιμητές. Ο πίνακας ANOVA παρέχει πληροφορίες για τη μεταβλητότητα και των δύο παραγόντων A και B, για την αλληλεπίδραση και για τα αποκαλούμενα κατάλοιπα του μοντέλου. Αυτές οι πληροφορίες για τη μεταβλητότητα αναλύονται στο άθροισμα των τετραγώνων, στο μέσο άθροισμα των τετραγώνων και σε πληροφορίες σχετικά με τα στατιστικά τεστ.

Παράδειγμα 4.2. : (Τάση σε μπαταρίες, συνέχεια)

Με την εντολή που ακολουθεί μπορούμε να λάβουμε έναν πίνακα ANOVA για τις μετρήσεις των μπαταριών, ο οποίος δίνεται παρακάτω:

```
anova(lm(voltage ~ battery + voltmeter + battery * voltmeter, data=batteries))
```

Analysis of Variance Table

Response: voltage

	Df	Sum Sq	Mean Sq	FValue	Pr(>F)
Battery	2	0.063034	0.031517	1.9923	0.1790
Voltmeter	1	0.044412	0.044412	2.8074	0.1197
Battery: voltmeter	2	0.018497	0.009249	0.5846	0.5724
Residuals	12	0.189833	0.015819		

Η επαναληψιμότητα μπορεί να ληφθεί απευθείας από τον πίνακα ANOVA ως το μέσο άθροισμα των τετραγώνων των καταλοίπων. Επομένως στο παράδειγμά μας η διασπορά επαναληψιμότητας είναι 0,015819.

Τα υπόλοιπα στοιχεία της συνολικής μεταβλητότητας που παρουσιάστηκαν στο Σχήμα 4.1. μπορούν να υπολογιστούν ως εξής (δείτε π.χ. Searle, S., Casella, G., & McCulloch, C. (2006)):

$$\begin{aligned}\sigma_{\text{Ελεγκτή}}^2 &= \frac{MSB-MSAB}{a \cdot n}, \quad \sigma_{\text{Αλληλεπίδραση}}^2 = \frac{MSAB-MSE}{n}, \\ \sigma_{\text{Αναπαραγωγισιμότητα}}^2 &= \sigma_{\text{Ελεγκτής}}^2 + \sigma_{\text{Αλληλεπίδραση}}^2, \\ \sigma_{\text{R\&R μελέτη διαμετρημάτων}}^2 &= \sigma_{\text{Επαναληψιμότητα}}^2 + \sigma_{\text{Αναπαραγωγισιμότητα}}^2, \\ \sigma_{\text{Μέρος σε Μέρος}}^2 &= \frac{MSA-MSAB}{b \cdot n}, \quad \sigma_{\text{Ολική}}^2 = \sigma_{\text{R\&R μελέτη διαμετρημάτων}}^2 + \\ &\quad \sigma_{\text{Μέρος σε Μέρος}}^2.\end{aligned}$$

Σημειώνουμε ότι a και b είναι ο αριθμός των επιπέδων κάθε παράγοντα, το n είναι ο αριθμός των επαναλαμβανόμενων μετρήσεων, MSA και MSB είναι το μέσο άθροισμα τετραγώνων του A και το μέσο άθροισμα τετραγώνων του B παράγοντα αντίστοιχα. Επίσης, $MSAB$ είναι το μέσο άθροισμα τετραγώνων της αλληλεπίδρασης μεταξύ των παραγόντων (AB) και MSE είναι το μέσο άθροισμα τετραγώνων των καταλοίπων. Σύμφωνα με τους Searle et al. (2006), αν οποιοδήποτε στοιχείο είναι αρνητικό, θεωρείται ως μηδέν.

Παράδειγμα 4.3.: (Τάση σε μπαταρίες, συνέχεια)

Η επαναληψιμότητα μπορεί να μετρηθεί απευθείας από το μέσο άθροισμα των καταλοίπων στον πίνακα ANOVA. Έτσι τροποποιώντας λίγο τον παραπάνω κώδικα μπορούμε να πάρουμε μόνο την τιμή που αντιστοιχεί στο μέσο άθροισμα τετραγώνων των καταλοίπων ως εξής:

```
anova(lm(voltage ~ battery + voltemer + battery * voltemer, data=batteries)) [3] [4,1]
[1] 0,01581939
```

Το αποτέλεσμα προφανώς είναι το ίδιο με το αποτέλεσμα που δίνει ο πίνακας ANOVA για το μέσο άθροισμα τετραγώνων των καταλοίπων στην στήλη 3 και γραμμή 4. Επομένως, η διασπορά επαναληψιμότητας είναι

$$\sigma_{\text{Επαναληψιμότητα}}^2 = MSE = 0,01581939.$$

Η μεταβλητότητα του ελεγκτή (βολτόμετρο) είναι:

$$\sigma_{\text{Ελεγκτή}}^2 = \frac{MSB-MSAB}{a \cdot n} = \frac{0,0444-0,0092}{3 \cdot 3} = 0,003911111.$$

Η μεταβλητότητα που οφείλεται στην αλληλεπίδραση του βολτόμετρου με την μπαταρία είναι:

$$\sigma_{\text{Αλληλεπίδραση}}^2 = \frac{MSAB-MSE}{n} = \frac{0,0092-0,0158}{3} = -0,0022,$$

η οποία θεωρούμε ότι είναι ίση με το μηδέν (δηλ. $\sigma_{\text{Αλληλεπίδραση}}^2 = 0$) αφού όπως αναφέραμε προηγουμένως, η τιμή αυτή δε μπορεί να είναι αρνητική.

Αφού υπολογίσαμε την μεταβλητότητα που οφείλεται στην αλληλεπίδραση των παραγόντων, τώρα μπορούμε να υπολογίσουμε τη μεταβλητότητα (διασπορά) της αναπαραγωγισιμότητας. Επομένως,

$$\sigma_{\text{Αναπαραγωγισιμότητα}}^2 = \sigma_{\text{Ελεγκτής}}^2 + \sigma_{\text{Αλληλεπίδραση}}^2 = 0,003911 + 0 = 0,0039,$$

ενώ η μεταβλητότητα που οφείλεται στη R&R μελέτη διαμετρημάτων ισούται με

$$\sigma_{\text{R\&R μελέτη διαμετρημάτων}}^2 = \sigma_{\text{Επαναληψιμότητα}}^2 + \sigma_{\text{Αναπαραγωγισιμότητα}}^2 = 0,0158 + 0,0039 = 0,0197.$$

Επίσης, η από μέρος-σε-μέρος μεταβλητότητα είναι

$$\sigma_{\text{Μέρος σε Μέρος}}^2 = \frac{MSA-MSAB}{b \cdot n} = \frac{0,0315-0,0092}{2 \cdot 3} = 0,003716667.$$

Τέλος η συνολική μεταβλητότητα ισούται με

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{Ολική}}^2 &= \sigma_{\text{R\&R μελέτη διαμετρημάτων}}^2 + \sigma_{\text{Μέρος σε Μέρος}}^2 = 0,0197 + 0,0037 \\ &= 0,0234. \end{aligned}$$

4.2.2.3. Αξιολόγηση του Μετρητικού Συστήματος

Για να θεωρείται ένα μετρητικό σύστημα ακριβές, πρέπει η συμβολή της μεταβλητότητας της R&R μελέτης διαμετρημάτων στην συνολική μεταβλητότητα να είναι μικρότερη από το 10% (Cano et al., 2012). Μπορούμε να αποδεχτούμε μια τιμή η οποία είναι μεταξύ του 10 – 30%, όμως μια τιμή μεγαλύτερη από το 30% σημαίνει ότι το μετρητικό σύστημα είναι μη-αποδεκτό.

Για να αξιολογήσουμε ένα μετρητικό σύστημα, χρησιμοποιούμε τις τετραγωνικές ρίζες των διασπορών, δηλαδή τις τυπικές αποκλίσεις. Η συμβολή κάθε πηγής μεταβλητότητας υπολογίζεται έπειτα επί του συνολικού Study Var.

Πιο συγκεκριμένα, Study Var ορίζουμε την τυπική απόκλιση κάθε πηγής μεταβλητότητας, πολλαπλασιαζόμενης επί 5,15. (5,15 τυπικές αποκλίσεις καλύπτουν το 99% των δεδομένων). Ουσιαστικά καθορίζει τι μεταβλητότητα έχει το μετρητικό σύστημα σε σχέση με τη μεταβλητότητα των δεδομένων (% Μεταβλητότητας R&R μελέτης διαμετρημάτων) και δίνεται από τη σχέση

$$\frac{\sigma_{R\&R \text{ μελέτη διαμετρημάτων}}}{\sigma_{ολική}}$$

Μια άλλη χρήσιμη μέτρηση είναι ο αριθμός των διαφορετικών κατηγοριών, ο οποίος υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον τύπο:

$$N^0 \text{ Κατηγορίες} = \frac{\sigma_{\text{Μέρος σε μέρος}}}{\sigma_{R\&R \text{ μελέτη μετρήσεων}}} \times 1,41,$$

και στρογγυλοποιούμε την τιμή που προκύπτει στον κοντινότερο ακέραιο. Η σταθερά 1,41 είναι ίση με $\sqrt{2}$. Σημειώνεται ότι αν η τιμή είναι μικρότερη από το 1, θεωρείται ότι είναι ίση με το 1. Σύμφωνα με τον Montgomery (2005), ο αριθμός των διαφορετικών κατηγοριών πρέπει να είναι μεγαλύτερος ή ίσος του 4. Ο αριθμός αυτός μετρά την σχέση μεταξύ της μεταβλητότητας που οφείλεται στο μετρητικό σύστημα και της έμφυτης μεταβλητότητας. Εάν ο αριθμός αυτός είναι μικρότερος από 4, αυτό σημαίνει ότι η μεταβλητότητα της R&R μελέτης διαμετρημάτων είναι μεγάλη συγκριτικά με την έμφυτη μεταβλητότητα. Διαφορετικά η σχέση μεταξύ αυτών των δύο μεταβλητοτήτων μπορεί να θεωρηθεί ικανοποιητική.

Επίσης σύμφωνα με το Automotive Industry Action Group (AIAG) (2010), ο αριθμός των διαφορετικών κατηγοριών είναι μια μέτρηση που χρησιμοποιείται στις R&R μελέτες διαμετρημάτων για να προσδιορίσει την ικανότητα του μετρητικού συστήματος να ανιχνεύει μια διαφορά στο μετρούμενο χαρακτηριστικό. Ουσιαστικά, ο αριθμός των διαφορετικών κατηγοριών αντιπροσωπεύει τον αριθμό των μη αλληλεπικαλυπτόμενων διαστημάτων εμπιστοσύνης που καλύπτουν το εύρος της μεταβλητής του προϊόντος. Επίσης ο αριθμός των διαφορετικών κατηγοριών αντιπροσωπεύει τον αριθμό των ομάδων μέσα στα δεδομένα της διαδικασίας που μπορεί να διακρίνει το μετρητικό σύστημα.

Το Automotive Industry Action Group (AIAG) (2010) δημοσίευσε ένα εγχειρίδιο σύμφωνα με το οποίο 5 ή περισσότερες κατηγορίες υποδεικνύουν ένα αποδεκτό μετρητικό σύστημα. Συνήθως όταν ο αριθμός των διαφορετικών κατηγοριών είναι μικρότερος από 2, το μετρητικό σύστημα δεν έχει αξία για τον έλεγχο της διαδικασίας, καθώς δεν μπορεί να κάνει διάκριση ανάμεσα στα μέρη. Όταν ο αριθμός των διαφορετικών κατηγοριών είναι 2, μπορείτε να χωρίσετε τα μέρη μόνο σε δύο ομάδες, όπως υψηλή και χαμηλή. Όταν ο αριθμός των διαφορετικών κατηγοριών είναι 3, τότε μπορείτε να χωρίσετε τα μέρη σε 3 ομάδες, όπως χαμηλή, μεσαία και υψηλή.

Παράδειγμα 4.4.: (Τάση σε μπαταρίες, συνέχεια)

Η συμβολή της μεταβλητότητας της R&R μελέτης διαμετρημάτων στην συνολική μεταβλητότητα της διαδικασίας μπορεί να προκύψει σύμφωνα με την παρακάτω εντολή. Η τιμή αυτή σημαίνει ότι το μεγαλύτερο μέρος της μεταβλητότητας της διαδικασίας οφείλεται στη μεταβλητότητα της R&R μελέτης διαμετρημάτων.

```
(sqrt(0.0197)/sqrt(0.0234)) *100
```

```
[1] 91.75404
```

Επίσης, ο αριθμός των διαφορετικών κατηγοριών υπολογίζεται ως:

```
(0.0037)/sqrt(0.0197)) *1.41
```

```
[1] 0.03716959
```

Αφού η τιμή είναι μικρότερη της μονάδας, σύμφωνα με την σχετική θεωρία που αναφέραμε πιο πάνω θεωρούμε ότι η τιμή αυτή είναι 1. Τα αποτελέσματα αυτά επικυρώνουν την ανεπάρκεια του συγκεκριμένου μετρητικού συστήματος.

4.2.3. Χρησιμοποιώντας το Πακέτο SixSigma

Με τη χρήση της συνάρτησης `ss.r` του πακέτου SixSigma που διαθέτει η R, μπορούμε να έχουμε τις σχετικές γραφικές παραστάσεις και τις αριθμητικές τιμές των απαιτούμενων στατιστικών μέτρων. Η συνάρτηση αυτή συντάσσεται ως `ss.r(var, part, appr, data, main, sub)` ενώ τα ορίσματά της δίνονται στον Πίνακα 4.2.

Πίνακας 4.2.: Ορίσματα της Συνάρτησης `ss.r`

Ορίσματα	Επιχειρήματα
<code>var</code>	Μετρούμενη διακύμανση
<code>part</code>	Παράγοντας για μέρη
<code>appr</code>	Παράγοντας για τους ελεγκτές (χειριστές, μηχανές,...)
<code>data</code>	Πλαίσιο δεδομένων που περιέχει διακυμάνσεις
<code>main</code>	Κύριος τίτλος για το γράφημα
<code>sub</code>	Υπότιτλος για το γράφημα (το όνομα του πρότζεκτ)

Όταν τρέξουμε την συγκεκριμένη εντολή, θα λάβουμε ως αποτέλεσμα έναν πίνακα ANOVA, λεπτομέρειες για τις συνιστώσες της μεταβλητότητας και μερικά γραφήματα. Πιο συγκεκριμένα τα γραφήματα αποτελούνται από:

- Ραβδόγραμμα για το ποσοστό συνεισφοράς της κάθε συνιστώσας της μεταβλητότητας.
- Μετρούμενες τιμές από γράφημα ελεγκτών (οι τιμές που προκύπτουν για τη μετρούμενη διακύμανση μέσω των ελεγκτών)
- Μετρούμενες τιμές από γράφημα μερών (οι τιμές της μετρούμενης διακύμανσης όταν αυτές υπολογίζονται μέσω των μερών)
- Μετρούμενες μέσες τιμές από μέρη και ελεγκτές (οι μέσες τιμές των αλληλεπιδράσεων των μερών με τους ελεγκτές)
- Διάγραμμα ελέγχου μέσης τιμής για την R&R μελέτη διαμετρημάτων
- Διάγραμμα ελέγχου εύρους για την R&R μελέτη διαμετρημάτων

Παράδειγμα 4.5.: (Τάση σε μπαταρίες, συνέχεια)

Το output της ανάλυσης μαζί με τα γραφήματα για τα δεδομένα των μπαταριών, μπορούν να ληφθούν και να αποθηκευτούν σε ένα αντικείμενο της R με την παρακάτω εντολή:

```

my.rr <- ss.rr(var = voltage, part = battery,

  appr = voltmeter, data = batteries,

  main = "6σ R&R μελέτη διαμετρημάτων", sub = "MSA Πρότζεκτ
Μπαταριών")

```

```

Complete model (with interaction):

```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F-value	Pr(>F)
Battery	2	0.06303	0.03152	3.408	0.227
Voltmeter	1	0.04441	0.04441	4.802	0.160
Battery:voltmeter	2	0.01850	0.00925	0.585	0.572
Repeatability	12	0.18983	0.01582		
Total	17	0.31578			

Alpha for removing interaction: 0.05

```

Reduced model (without interaction):

```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F-value	Pr(>F)
Battery	2	0.06303	0.03152	2.118	0.157
Voltmeter	1	0.04441	0.04441	2.985	0.106
Repeatability	14	0.20833	0.01488		
Total	17	0.31578			

```

Gage R&R

```

	VarComp	%Contrib
Total Gage R&R	0.018161960	86.76
Repeatability	0.014880713	71.08
Reproducibility	0.003281247	15.67
Voltmeter	0.003281247	15.67
Part - to part	0.002772732	13.24
Total variation	0.020934692	100.00

```


```

	StdDev	StudyVar	%StudyVar
Total Gage R&R	0.13476632	0.08085979	93.14
Repeatability	0.12198653	0.7319192	84.31
Reproducibility	0.05728217	0.3436930	39.59
Voltmeter	0.05728217	0.3436930	39.59
Part - to part	0.05265674	0.315904	36.39
Total variation	0.14468826	0.8681295	100.00

```

Number of Distinct Categories = 1

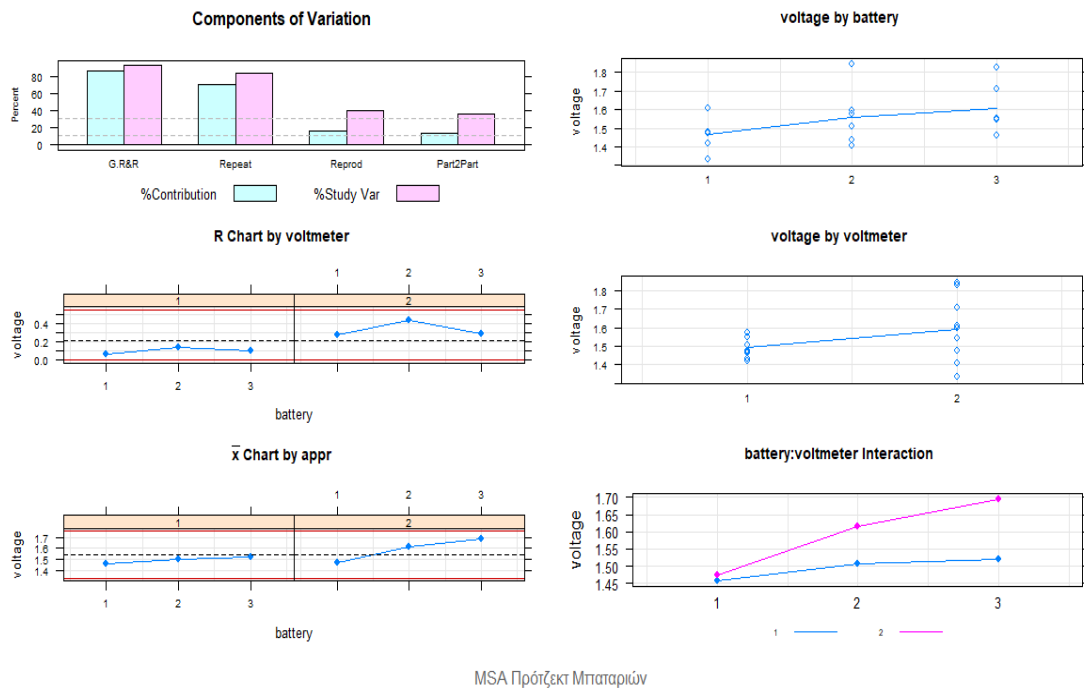
```

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης μετρητικού συστήματος (MSA) δείχνουν ότι το %εύρος ανοχής που οφείλεται στην R&R μελέτη διαμετρημάτων (τελευταίος πίνακας, 1^η γραμμή, τελευταία στήλη) είναι 93.14 %, το οποίο είναι πολύ μεγαλύτερο από το 30%. Επιπλέον ο αριθμός των διαφορετικών κατηγοριών είναι ίσος με 1. Ο συνδυασμός του μικρού αριθμού κατηγοριών και του τόσο μεγάλου ποσοστού μεταβλητότητας, είναι το χειρότερο αποτέλεσμα σε ένα μετρητικό σύστημα.

Για να βρούμε ποιο είναι το πρόβλημα με το μετρητικό σύστημα, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε συγκεκριμένα γραφήματα, τα οποία προκύπτουν άμεσα από την εντολή που δώσαμε στην αρχή του παραδείγματος. Περισσότερες λεπτομέρειες για αυτά θα δοθούν στο κεφάλαιο 5.1. Στο Σχήμα 4.2. δίνονται τα γραφήματα για την ανάλυση μετρητικού συστήματος για το παράδειγμα με τις μπαταρίες. Από το πάνω αριστερά γράφημα (Components of Variation) παρατηρούμε ότι το μετρητικό

σύστημα είναι προβληματικό καθώς το %εύρος ανοχής που οφείλεται στην R&R μελέτη διαμετρημάτων ξεπερνά κατά πολύ το 30%.

Έξι Σίγμα R&R μελέτη μετρήσεων

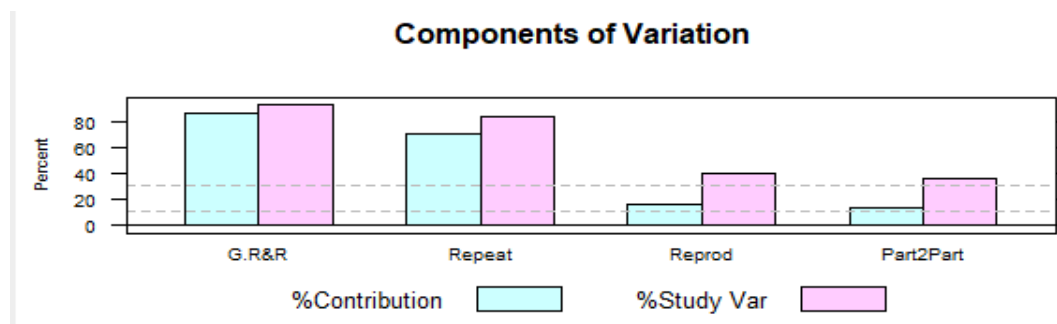


MSA Πρότζεκτ Μπαταριών

Σχήμα 4.2.: Γραφήματα για την ανάλυση μετρητικού συστήματος για το παράδειγμα με τις μπαταρίες.

Ερμηνεία των διαγραμμάτων

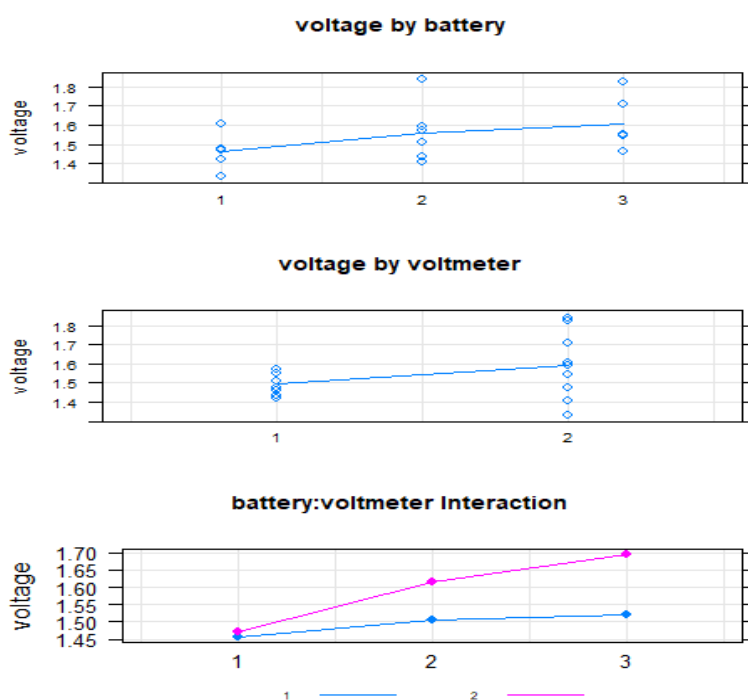
Ένα **ραβδόγραμμα (bar plot)** δημιουργείται για να δούμε την συνεισφορά κάθε στοιχείου στην συνολική διακύμανση. Στόχος είναι η άμεση ανίχνευση του αν τα προβλήματα μέτρησης προέρχονται από την επαναληψιμότητα ή αναπαραγωγιμότητα.



Σχήμα 4.3.: Στοιχεία μεταβλητότητας

Η παραπάνω γραφική παράσταση αποτελεί κομμάτι του σχήματος 4.2.. Είναι ένα ραβδόγραμμα, το οποίο αντιπροσωπεύει την συνεισφορά κάθε συστατικού στην συνολική διακύμανση. Είναι σαφές ότι στην περίπτωση του Παραδείγματος 4.5. η διαδικασία έχει προβλήματα με την επαναληψιμότητα και με τις τιμές της αναπαραγωγισιμότητας, καθώς η συμβολή και των δύο είναι μεγαλύτερη από το 10% και στις δύο περιπτώσεις (%Contribution και %StudyVar, αντίστοιχα). Είναι εμφανές ότι η διασπορά επαναληψιμότητας είναι περίπου διπλάσια από τη διασπορά της αναπαραγωγισιμότητας.

Τα **διαγράμματα λωρίδων (strip plots)** και τα **διαγράμματα γραμμών** αντιπροσωπεύουν τις επιδράσεις. Χρησιμοποιώντας αυτά τα διαγράμματα μπορούμε να δούμε αν το πρόβλημα είναι η διαφορά μεταξύ των ελεγκτών ή αν η αλληλεπίδραση μεταξύ των ελεγκτών και των μερών είναι σημαντική.



Σχήμα 4.4.: Επιδράσεις ελεγκτών, μερών και αλληλεπίδραση

Τα γραφήματα που φαίνονται πιο πάνω είναι τα γραφήματα στη δεξιά στήλη του Σχήματος 4.2. για το παράδειγμα με τις μπαταρίες. Παρουσιάζουν λοιπόν κάθε μέτρηση ως σημείο στη γραφική παράσταση. Στο πρώτο γράφημα ο άξονας X αντιπροσωπεύει τις μπαταρίες και σχεδιάστηκε μια γραμμή η οποία ενώνει τις μέσες τιμές κάθε προτύπου. Στο μεσαίο γράφημα ο άξονας X αντιπροσωπεύει τα βολτόμετρα. Το τελευταίο γράφημα παρουσιάζει την αλληλεπίδραση μεταξύ των

παραγόντων, χειριστές και πρότυπα. Οι μέσες τιμές των ζευγών μπαταρία × βολτόμετρο αντιπροσωπεύονται από σημεία και συνδέονται με γραμμές.

Με άλλα λόγια, με αυτά τα γραφήματα μπορούμε να εντοπίσουμε αν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των χειριστών και των προτύπων (που θα ήταν πρόβλημα) ή διαφορές μεταξύ των χειριστών. Στην προκειμένη περίπτωση παρατηρούμε από το 1^ο γράφημα ότι η πρώτη μπαταρία έχει χαμηλότερη τάση από τις υπόλοιπες, αλλά η μεταβλητότητα της είναι παρόμοια με τις άλλες. Επομένως αυτό δεν είναι πρόβλημα για το μετρητικό σύστημα. Ωστόσο από το γράφημα των ελεγκτών παρατηρούμε εμφανείς διαφορές μεταξύ των βολτόμετρων. Οι μέσες τιμές και οι μεταβλητότητες είναι διαφορετικά και αυτό είναι πρόβλημα για το μετρητικό σύστημα. Τέλος από το τελευταίο γράφημα, παρατηρούμε ότι οι γραμμές δε διασταυρώνουν η μια την άλλη, γεγονός το οποίο υποδεικνύει ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ των παραγόντων δεν είναι στατιστικά σημαντική.

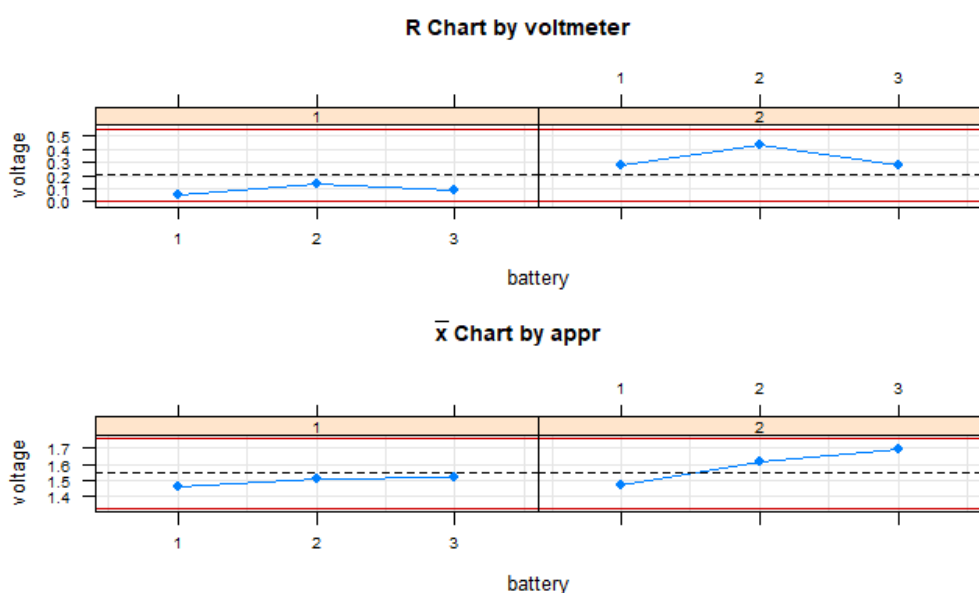
Τέλος τα **διαγράμματα ελέγχου** (δείτε π.χ. Ταγαράς (2001)) μπορούν να σχεδιαστούν από την ομάδα και με τα όρια ελέγχου προσαρμοσμένα στην R&R μελέτη διαμετρημάτων. Για το διάγραμμα ελέγχου για τη μέση τιμή, η κεντρική γραμμή και τα όρια είναι

Άνω Όριο	$\bar{\bar{X}} + \frac{3}{d_2\sqrt{n}} \bar{R}$
Κεντρική Γραμμή	$\bar{\bar{X}}$
Κάτω Όριο	$\bar{\bar{X}} - \frac{3}{d_2\sqrt{n}} \bar{R}$

ενώ για το διάγραμμα ελέγχου για το εύρος, η κεντρική γραμμή και τα όρια είναι

Άνω Όριο	$\bar{R} \cdot \left(1 + \frac{d_3}{d_2}\right)$
Κεντρική Γραμμή	\bar{R}
Κάτω Όριο	$\bar{R} \cdot \left(1 - \frac{d_3}{d_2}\right)$

όπου d_2 και d_3 είναι οι γνωστές σταθερές για την κατασκευή διαγραμμάτων ελέγχου τύπου Shewhart (Montgomery D. (2005)), το $\bar{\bar{X}}$ είναι ο ολικός μέσος (δηλ. ο μέσος όρος των m διαθέσιμων δειγμάτων) και το \bar{R} είναι το ολικό εύρος (δηλ. μέσος όρος των m δειγματικών ευρών). Στο επόμενο Σχήμα δίνονται οι εικόνες των διαγραμμάτων ελέγχου.



Σχήμα 4.5.: R διάγραμμα ελέγχου για βολτόμετρο, και \bar{x} διάγραμμα ελέγχου για εκτιμητή

Μέσα σε μια R&R μελέτη διαμετρημάτων, τα περισσότερα σημεία σε ένα \bar{x} διάγραμμα ελέγχου πρέπει να βρίσκονται εκτός των ορίων ελέγχου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι η γραφική παράσταση αντιπροσωπεύει την από μέρος σε μέρος διακύμανση (ίδιος χειριστής, ίδιο πρότυπο), καθώς τα όρια ισχύουν για τα συνολικά δεδομένα. Διαφορετικά, αν δεν ισχύει αυτό, το μετρητικό σύστημα θεωρείται ανεπαρκές. Από την άλλη, στο διάγραμμα ελέγχου για το εύρος, όλα τα σημεία πρέπει να βρίσκονται εντός των ορίων ελέγχου. Όπως παρατηρούμε στο διάγραμμα ελέγχου για τη μέση τιμή όλα τα σημεία βρίσκονται εντός των ορίων ελέγχου. Στο διάγραμμα ελέγχου για το εύρος τα σημεία βρίσκονται εντός των ορίων ελέγχου. Από το πρώτο γεγονός επιβεβαιώνεται ότι το μετρητικό σύστημα δε λειτουργεί σωστά.

Από όλα όσα είδαμε από τα γραφήματα που προέκυψαν αλλά και από τον πίνακα ANOVA, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το μετρητικό σύστημα δε λειτουργεί

καλά. Το κύριο πρόβλημα είναι τα βολτόμετρα (ελεγκτές). Ως εκ τούτου, προτού προχωρήσουμε με το 6σ πρότζεκτ, ο υπεύθυνος (ο οποίος είναι κάτοχος της κύριας Μαύρης Ζώνης) πρέπει να βαθμονομήσει τα βολτόμετρα, ή να τα αντικαταστήσει αμέσως και να επαναλάβει την ανάλυση μετρητικού συστήματος (MSA), μέχρις ότου το μετρητικό σύστημα να είναι αποδεκτό.

4.2.4.Σύνοψη

Η μέτρηση δεν είναι ένα ασήμαντο ζήτημα για την ποιότητα αφού αν λαμβάνουμε αποφάσεις οι οποίες στηρίζονται σε δεδομένα τα οποία έχουν μετρηθεί λανθασμένα, τότε το πιθανότερο είναι ότι θα καταλήξουμε σε ανεπαρκή αποτελέσματα. Επομένως γίνεται άμεσα αντιληπτό το πόσο σημαντικό είναι να διεξάγεται μια ανάλυση μετρητικού συστήματος (MSA) ως προκαταρκτικό στάδιο σε οποιοδήποτε 6σ πρότζεκτ. Μόνο όταν το μετρητικό σύστημα λειτουργήσει σωστά, θα μπορέσουμε να αναλύσουμε τα δεδομένα και να εξάγουμε έγκυρα αποτελέσματα.

Σε αυτό το κεφάλαιο, εξηγήσαμε πως να εκτελέσουμε μια MSA χρησιμοποιώντας στατιστικά εργαλεία. Δώσαμε ένα παράδειγμα χρήσης της ανάλυσης διακύμανσης και μέσω ενός αριθμητικού παραδείγματος είδαμε πως γίνεται στην πράξη MSA. Τα αποτελέσματα επιβεβαιώθηκαν και με χρήση των συναρτήσεων του πακέτου SixSigma R.

4.3. Ανάλυση Pareto

Η ανάλυση Pareto είναι μια τεχνική η οποία μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε διάφορα στάδια ενός 6σ πρότζεκτ. Η φάση μέτρησης του κύκλου DMAIC, χρησιμοποιείται για να δώσει προτεραιότητα στις πιθανές αιτίες των ελαττωμάτων και έπειτα επικεντρώνεται στις πιο σημαντικές.

Η βάση της ανάλυσης Pareto είναι η αρχή Pareto, η οποία ισχύει σε πολλές διαδικασίες στην πραγματική ζωή. Σε γενικές γραμμές, η αρχή Pareto αναφέρει ότι η πιο πολύ προσπάθεια / όφελος (περίπου το 80%) οφείλεται σε ένα περιορισμένο αριθμό βασικών δράσεων (περίπου 20%). Η αρχή Pareto είναι επίσης γνωστή ως κανόνας 80/20. Μια αναζήτηση αυτών των βασικών δράσεων γίνεται συνήθως χρησιμοποιώντας ένα διάγραμμα Pareto, το οποίο είναι ένα χρήσιμο γραφικό εργαλείο που μας επιτρέπει να δούμε με μια πρώτη ματιά, τα αποτελέσματα της ανάλυσης Pareto.

Ουσιαστικά στο κεφάλαιο αυτό ελέγχουμε τις αρχές της ανάλυσης Pareto στις ενότητες 4.2.1. και 4.2.1.1. Έπειτα στο 4.2.2. θα εφαρμόσουμε την αρχή Pareto για την ανίχνευση σημαντικών ευκαιριών βελτίωσης σε ένα 6σ πρότζεκτ. Στη συνέχεια με τη βοήθεια της R θα σχεδιάσουμε ένα διάγραμμα Pareto και τέλος θα εισάγουμε και άλλες χρήσεις της αρχής Pareto μέσα στα 6σ πρότζεκτ.

4.3.1 Αρχή Pareto

Ο Vilfredo Pareto (1848 – 1923) ήταν ένας Ιταλός οικονομολόγος, του οποίου η πιο διάσημη συνεισφορά του ήταν η αρχή που πήρε και το όνομα του. Ο Pareto ήταν επιπλέον φιλόσοφος, μηχανικός, κοινωνιολόγος και πολιτικός επιστήμονας. Η αρχή του Pareto ήταν αποτέλεσμα των παρατηρήσεων που έκανε ο Pareto σχετικά με την κατανομή του πλούτου τον 19^ο αιώνα. Αξίζει να αναφέρουμε ότι εκείνον τον καιρό ο πλούτος μετριόταν ως η γη που είχε ένας άνθρωπος. Παρατήρησε ότι το 80% του πλούτου άνηκε στο 20% του πληθυσμού². Για αυτόν τον λόγο είναι γνωστή και ως κανόνας 80/20. Εμφανίζεται όπως είπαμε σε πολλές καταστάσεις της πραγματικής ζωής και ως εκ τούτου μερικές φορές θεωρείται ως φυσική αρχή. Για παράδειγμα:

² Αξιοσημείωτο είναι το γεγονός ότι σήμερα σχεδόν 99% του πλούτου αντιστοιχεί στο 1% του πληθυσμού (Oxfam (2015)).

- Το 80% των κερδών προέρχονται από το 20% των πελατών.
- Το 20% των εργαζομένων κάνει το 80% της δουλειάς.
- Το 20% των ασθενών χρησιμοποιεί το 80% των πόρων φροντίδας.
- Το 80% του κόστους ποιότητας παράγεται από το 20% των πηγών σφαλμάτων.

Το τελευταίο παράδειγμα αντιστοιχεί ουσιαστικά στην κύρια εφαρμογή της αρχής Pareto στην βσ.

4.3.1.1. Η Αρχή Pareto ως Τεχνική Επίλυσης Προβλημάτων

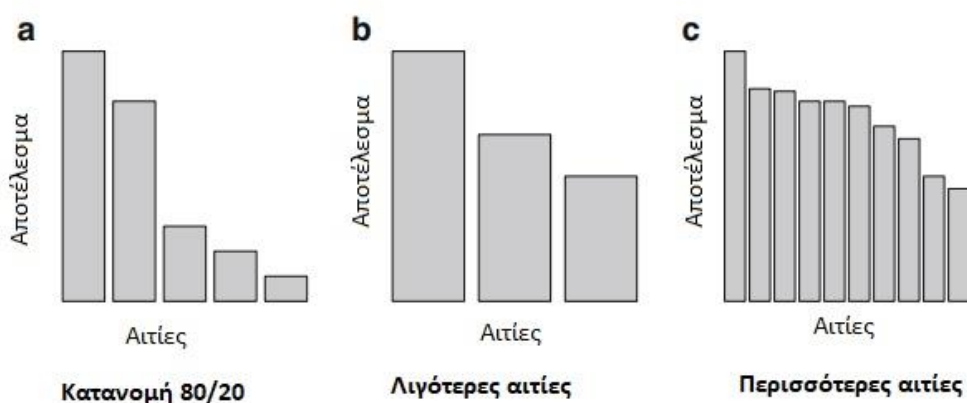
Η αρχή Pareto χρησιμοποιείται για να δώσει προτεραιότητα στις ενέργειες που προέρχονται από μια δεδομένη λίστα επιλογών. Υπό αυτή την έννοια, ένα διάγραμμα Pareto παρέχει τη δυνατότητα να δούμε με μια ματιά πού θα επιτευχθούν τα καλύτερα αποτελέσματα εάν εστιάσουμε στο «ζωτικής σημασίας λίγοι παρά ασήμαντοι πολλοί». Αυτή η έκφραση επινοήθηκε από τον Joseph M. Juran (1989) και παραμένει στη βιβλιογραφία και την ορολογία για την ποιότητα.

Ωστόσο, οι Juran and Defeo (2010) υποστήριξαν ότι οι «πολλοί» μπορεί να μην είναι ασήμαντοι και έτσι προτιμούν την έκφραση «οι ζωτικοί λίγοι και οι χρήσιμοι πολλοί». Επομένως πρέπει να επικεντρωθούμε στους ασήμαντους λίγους, όμως να μην απορρίψουμε τους χρήσιμους πολλούς σε μεταγενέστερες προσεγγίσεις του προβλήματος.

Όπως είδαμε στις μεθόδους επίλυσης προβλημάτων, είναι εξαιρετικά κρίσιμη η αναγνώριση των βασικών αιτιών ενός προβλήματος για την εύρεση δυνατών λύσεων (δείτε για παράδειγμα το Σχήμα 3.1 στο κεφάλαιο 3.1.1.). Για να εντοπίσουμε αυτές τις πιθανές αιτίες, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε διάφορες τεχνικές (π.χ. καταιγισμός ιδεών, *brainstorming*) και εργαλεία (διαγράμματα αιτίου – αποτελέσματος (cause – and – effect diagrams), διαγράμματα προτίμησης (affinity diagrams) κ.α.).

Αφού λοιπόν προσδιοριστούν οι πιθανές αιτίες, η επιλογή των κρίσιμων αιτιών μπορεί να γίνει με διάφορους τρόπους. Ακολουθώντας όμως την αρχή Pareto, το φυσικό αποτέλεσμα θα πρέπει να είναι μια κατανομή των αιτιών 80/20. Εάν δεν επιτύχουμε κατανομή των αιτιών 80/20, τότε θα πρέπει αναδιατάξουμε τα δεδομένα

μας με την ομαδοποίηση ή το διαχωρισμό των αιτιών ανάλογα με την κατανομή που έχουμε βρει πριν. Ενδεικτικό είναι το παρακάτω Σχήμα 4.6.. Η κατανομή (a) στα αριστερά προσεγγίζει μια κατανομή 80/20. Η κεντρική κατανομή (b) πρέπει να διαιρεί τις αιτίες για να επικεντρωθεί στα σημαντικά. Η δεξιά κατανομή (c) πρέπει να ομαδοποιήσει τις αιτίες.



Σχήμα 4.6.: Κατανομή αιτιών σε ανάλυση Pareto.

Ουσιαστικά αυτή είναι και η πρόσκληση της ανάλυσης Pareto. Η επιλογή των κυριότερων χαρακτηριστικών τα οποία οδηγούν στη μέτρηση της συνάφειας ενός προβλήματος. Στην συνέχεια θα παρουσιάσουμε διαφορετικές μεθόδους για την ανάλυση Pareto.

4.3.2. Ανάλυση Pareto σε 6σ

Το διάγραμμα Pareto θεωρείται ένα από τα επτά βασικά εργαλεία για τον έλεγχο ποιότητας (δείτε π.χ. Montgomery (2005)). Τα επτά βασικά εργαλεία είναι:

- Ιστόγραμμα
- Φύλλο ελέγχου
- Διάγραμμα Pareto
- Διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος
- Διάγραμμα συγκέντρωσης σφαλμάτων
- Διάγραμμα διασποράς
- Διάγραμμα ελέγχου

Είναι επίσης γνωστά και ως τα *επτά σπουδαία* εργαλεία του στατιστικού ελέγχου διεργασίας (*statistical process control, SPC*) ή τα επτά QC εργαλεία (*quality control tools*, ποιοτικού ελέγχου). Η ποιότητα αναπτύχθηκε κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα κυρίως στην Ιαπωνία, όπου εκεί ο αριθμός 7 έχει ιδιαίτερη σημασία. Για την ανάλυση Pareto μαζί με το διάγραμμα Pareto θα χρησιμοποιήσουμε ακόμα ένα από τα επτά σπουδαία εργαλεία, το διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος (*cause and effect diagram*).

4.3.2.1. Προσδιορισμός των αιτιών

Είναι πλέον προφανές το γεγονός ότι, εάν θέλουμε να βελτιώσουμε μια διαδικασία, το πρώτο πράγμα που πρέπει να κάνουμε είναι να δούμε από που μπορούμε να τη βελτιώσουμε. Η διαδικασία βελτιώνεται μειώνοντας τη μεταβλητότητά της, καθώς αυτό συνεπάγεται μείωση του αριθμού των ελαττωμάτων και μείωση του κόστους της διαδικασίας.

Μέσα στο πλαίσιο του κύκλου DMAIC έχουμε περιγράψει τη διαδικασία με τον χάρτη διαδικασίας και έχουμε εντοπίσει τις παραμέτρους (x) οι οποίες επηρεάζουν τα χαρακτηριστικά γνωρίσματα της διαδικασίας (y). Αυτές οι παράμετροι μπορούν να παράγουν προβλήματα. Με την υποστήριξη του χάρτη διαδικασίας και άλλων κατάλληλων τεχνικών (καταιγισμός ιδεών, έξι Ms, «Πέντε Γιατί» - *Five Whys*», διαγράμματα προτίμησης κ.α.) μπορούμε να αναγνωρίσουμε τις αιτίες των σφαλμάτων που μπορεί να προκύψουν στη διαδικασία. Έτσι ως αποτέλεσμα, δημιουργείται μια λίστα με τις αιτίες, και μπορούμε να τις ομαδοποιήσουμε σε κατηγορίες διάφορων επιπέδων. Στη συνέχεια οι αιτίες ταξινομούνται σε σχήμα ψαροκόκαλου, με τις αιτίες να καταγράφονται στα κόκκαλα των ψαριών και το αποτέλεσμα (συνήθως το CTQ χαρακτηριστικό) στο κεφάλι του ψαριού. Έτσι αυτό που θα προκύψει θα είναι το γνωστό διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος, ή αλλιώς γνωστό και ως διάγραμμα ψαροκόκαλο ή διάγραμμα Ishikawa χάρη στο δημιουργό του Kaoru Ishikawa.

Παράδειγμα 4.6.: (Κατασκευή δρόμου)

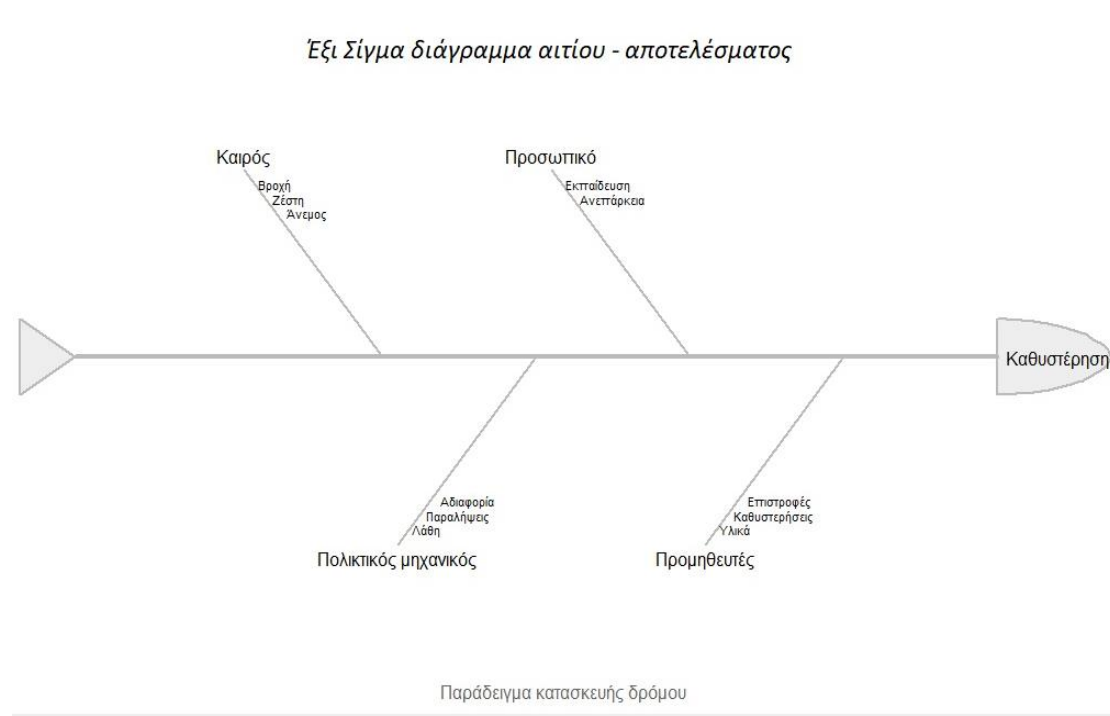
Κατά τη διάρκεια κατασκευής ενός δρόμου, ένα CTQ χαρακτηριστικό είναι προφανές η προθεσμία παράδοσης του δρόμου, καθώς η καθυστέρηση παράδοσης μπορεί να προκαλέσει προβλήματα.

Η ομάδα 6σ χρησιμοποιεί τεχνικές όπως εκείνες που περιγράψαμε προηγουμένως και αναγνωρίζει ότι τα ακόλουθα γεγονότα μπορούν να προκαλέσουν καθυστέρηση στο χρονοδιάγραμμα που υπάρχει. Τα γεγονότα αυτά είναι: καιρικές συνθήκες, καθυστέρηση παραλαβής υλικών, ελαττωματικά υλικά, ανειδίκευτοι υπάλληλοι και άρνηση των οδηγών για παράκαμψη του δρόμου.

Ένα διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος μας επιτρέπει να ταξινομήσουμε τις πληροφορίες με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να καταστεί πιο εύκολη η ερμηνεία τους. Μπορούμε λοιπόν να δημιουργήσουμε ένα διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος χρησιμοποιώντας την συνάρτηση `ss.ceDiag` του πακέτου *SixSigma* της R. Ο κώδικας για να γίνει αυτό δίνεται παρακάτω:

```
b.effect <- ("Καθυστέρηση")
b.groups <- c("Καιρός", "Προσωπικό", "Προμηθευτές", "Πολιτικός μηχανικός")
b.causes <- vector(mode = "list", length = length(b.groups))
b.causes[1] <- list(c("Βροχή", "Ζέστη", "Άνεμος"))
b.causes[2] <- list(c("Εκπαίδευση", "Ανεπάρκεια"))
b.causes[3] <- list(c("Υλικά", "Καθυστερήσεις", "Επιστροφές"))
b.causes[4] <- list(c("Λάθη", "Παραλήψεις", "Αδιαφορία"))
ss.ceDiag (b.effect, b.groups, b.causes, sub = "Παράδειγμα κατασκευής δρόμου")
```

Το διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος που προκύπτει δίνεται στο Σχήμα 4.7. Στο κεφάλι του ψαριού έχουμε το αποτέλεσμα που θέλουμε να ερευνήσουμε. Κάθε κόκκαλο του ψαριού αντιπροσωπεύει μια ομάδα ενώ κάθε μεμονωμένη αιτία προέρχεται από ένα κύριο ψαροκόκαλο.



Σχήμα 4.7.: Διάγραμμα αίτιου – αποτελέσματος για το Παράδειγμα κατασκευής δρόμου.

4.3.2.2. Μέτρηση του αποτελέσματος

Αφού λοιπόν έχουμε εντοπίσει τις πιθανές αιτίες του προβλήματος, χρειάζεται να μετρήσουμε το αποτέλεσμα. Για να γίνει αυτό μια πρώτη προσέγγιση είναι να εξετάσουμε δύο εύκολες και διαισθητικές διαστάσεις του προβλήματος: τον αριθμό των σφαλμάτων και το κόστος των σφαλμάτων. Ανάλογα με τη διαδικασία, τα δεδομένα μπορεί να προέρχονται από ιστορικά δεδομένα, δειγματοληψία ή προσομοίωση.

Είναι προφανές ότι η μέτρηση του αριθμού των σφαλμάτων που προκύπτουν από μια αιτία είναι εύκολη υπόθεση. Όμως δεν αρκεί αυτό, καθώς μπορεί να έχουμε μεγάλο αριθμό ελαττωμάτων τα οποία δεν έχουν καμία σημασία για τους πελάτες ή δεν προκαλούν σημαντική αύξηση του κόστους της διαδικασίας. Έτσι, είναι κατανοητό ότι η επιλογή των μονάδων μέτρησης καθώς και η ίδια η μέτρηση είναι ένα κρίσιμο θέμα στην ανάλυση Pareto.

Παράδειγμα 4.7.: (Κατασκευή δρόμου, συνέχεια)

Η Μαύρη ζώνη της εταιρείας που αναλαμβάνει την κατασκευή των δρόμων, έχει διερευνήσει τον αριθμό των ανεκπλήρωτων προθεσμιών τα τελευταία 3 χρόνια. Επιπλέον έχει υπολογίσει το κόστος που επιφέρουν αυτές οι καθυστερήσεις στην εταιρεία (πρόσθετο εργατικό δυναμικό, πρόσθετες πληρωμές, πρόσθετα υλικά κ.α.).

Θα αποθηκεύσουμε τα δεδομένα σε ένα πλαίσιο δεδομένων με έναν παράγοντα του οποίου τα επίπεδα είναι οι πιθανές αιτίες (χρησιμοποιούμε τη λίστα b.causes που δημιουργήσαμε στο Παράδειγμα 4.6. για την κατασκευή του διαγράμματος αιτίου – αποτελέσματος) και δύο μεταβλητές (τον αριθμό των ανεκπλήρωτων προθεσμιών και το εκτιμώμενο κόστος). Οι εντολές στην R είναι:

```
b.data <- data.frame(cause = factor(unlist(b.causes)),  
                    count = c(5,1,3,1,2,18,20,4,15,2,4),  
                    cost = c(50,150,50,10,20,180,200,10,5,20,150))
```

Τρέχοντας τις εντολές, λαμβάνουμε αποθηκευμένα τα δεδομένα σε ένα πλαίσιο δεδομένων με την παρακάτω μορφή:

	cause	count	cost
1	Βροχή	5	50
2	Ζέστη	1	150
3	Άνεμος	3	50
4	Εκπαίδευση	1	10
5	Ανεπάρκεια	2	20
6	Υλικά	18	180
7	Καθυστερήσεις	20	200
8	Επιστροφές	4	10
9	Λάθη	15	5
10	Παραλήψεις	2	20
11	Αδιαφορία	4	150

4.3.3.Κατασκευή ενός διαγράμματος Pareto

Το διάγραμμα Pareto είναι ουσιαστικά ένα διάγραμμα ράβδων, το οποίο απεικονίζει στον οριζόντιο άξονα (X) τις αιτίες και στον κατακόρυφο άξονα (Y) τα αποτελέσματα. Οι ράβδοι ταξινομούνται κατά φθίνουσα σειρά ανάλογα με την σπουδαιότητα του αποτελέσματος. Για να κατασκευαστεί ένα διάγραμμα το οποίο

θα είναι εύκολο στην ερμηνεία του, χρησιμοποιείται επιπλέον μορφοποίηση στην εικόνα του. Ειδικότερα:

- i). Προστίθεται ένας δευτερεύων άξονας γ στα αριστερά με κλίμακα από το 0 έως το 100, ο οποίος αναπαριστά το αθροιστικό ποσοστό της μέτρησης του αποτελέσματος.
- ii). Προστίθεται ένα διάγραμμα γραμμής το οποίο συνδέει το αθροιστικό ποσοστό κάθε αιτίας.
- iii). Προστίθενται βοηθητικές γραμμές από τον άξονα που προσδιορίζουν τον κανόνα 80/20, δηλαδή ποιες αιτίες είναι υπεύθυνες για το 80% του αποτελέσματος.

Επομένως ας δούμε πως κατασκευάζεται ένα διάγραμμα Pareto βήμα προς βήμα:

- Βήμα 1. Προσδιορίστε τις αιτίες.
- Βήμα 2. Επιλέξτε τις κατάλληλες μονάδες μέτρησης.
- Βήμα 3. Αποκτήστε τα δεδομένα.
- Βήμα 4. Ταξινομήστε με βάση την σπουδαιότητα.
- Βήμα 5. Απεικονίστε το αθροιστικό ποσοστό.
- Βήμα 6. Σχεδιάστε ένα ραβδόγραμμα για τις μετρήσεις.
- Βήμα 7. Σχεδιάστε ένα διάγραμμα γραμμής για τα αθροιστικά αποτελέσματα.
- Βήμα 8. Βρείτε τις αιτίες που ευθύνονται για το 80% του αποτελέσματος.

4.3.4. Διαγράμματα Pareto με χρήση της R

Ουσιαστικά στην ενότητα αυτή θα κατασκευάσουμε ένα διάγραμμα Pareto χρησιμοποιώντας την R. Στη συνέχεια θα επικεντρωθούμε στις ιδιαίτερες αιτίες και θα δείξουμε πως αυτές μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη βελτίωση της διαδικασίας με τη μείωση των σφαλμάτων.

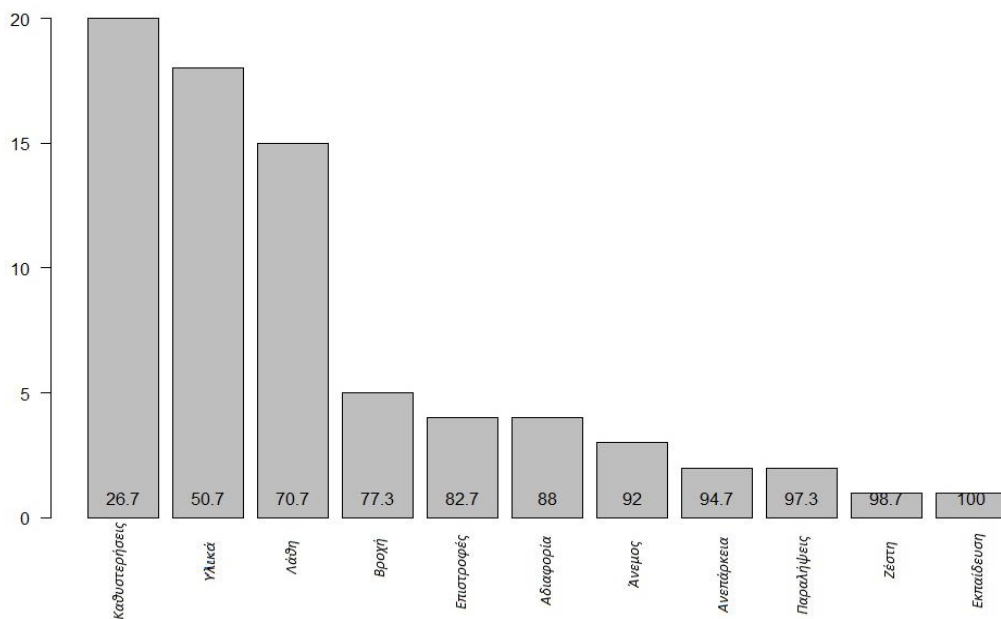
Δεδομένου ότι το διάγραμμα Pareto είναι απλώς ένα ταξινομημένο ραβδόγραμμα, μπορεί εύκολα να κατασκευαστεί με την R χρησιμοποιώντας το πακέτο *graphics*.

Ένας απλός τρόπος για να δημιουργήσουμε ένα διάγραμμα Pareto για 6σ πρότζεκτ είναι χρησιμοποιώντας τις συναρτήσεις στα πακέτα *qcc* και *qualityTools*.

Παράδειγμα 4.8.: (Κατασκευή δρόμου, συνέχεια)

Θα σχεδιάσουμε το διάγραμμα Pareto χρησιμοποιώντας τα δεδομένα του παραδείγματος για την κατασκευή δρόμου. Αρχικά μπορούμε να σχεδιάσουμε ένα απλό ραβδόγραμμα και να συμπεριλάβουμε τα αθροιστικά ποσοστά ως επισημείωση. Η συνάρτηση `barplot` επιστρέφει ένα διάνυσμα με τη θέση των ράβδων στον άξονα Χ. Χρησιμοποιούμε το διάνυσμα αυτό για να τυπώσουμε τις τιμές του αθροιστικού ποσοστού στο κατάλληλο σημείο στο γράφημα. Ο κώδικας για να γίνει αυτό το απλό γράφημα δίνεται παρακάτω. Παρατηρήστε ότι η τάξη των τιμών στο πλαίσιο δεδομένων καθιστά ευκολότερο τον σχεδιασμό ενός Pareto γραφήματος. Οι τιμές που φαίνονται πάνω στις ράβδους είναι τα ποσοστά για κάθε αιτία.

```
pChart <- barplot(rev(sort(b.data$count)),
  names.arg = b.data$cause[order(b.data$count, decreasing = TRUE)],
  las = 2)
text(pChart, rep(0.8,11),
  sort(round(cumsum(100 * (b.data$count / sum(b.data$count))
    [order(b.data$count, decreasing = TRUE)]),1)))
```



Σχήμα 4.8. : Διάγραμμα Pareto για το Παράδειγμα 4.8..

Επιπλέον το πακέτο qcc παρέχει την συνάρτηση `pareto.chart` η οποία μας δίνει τη δυνατότητα να λάβουμε ως αποτέλεσμα ένα πίνακα με δεδομένα, όπως τον Πίνακα 4.3..

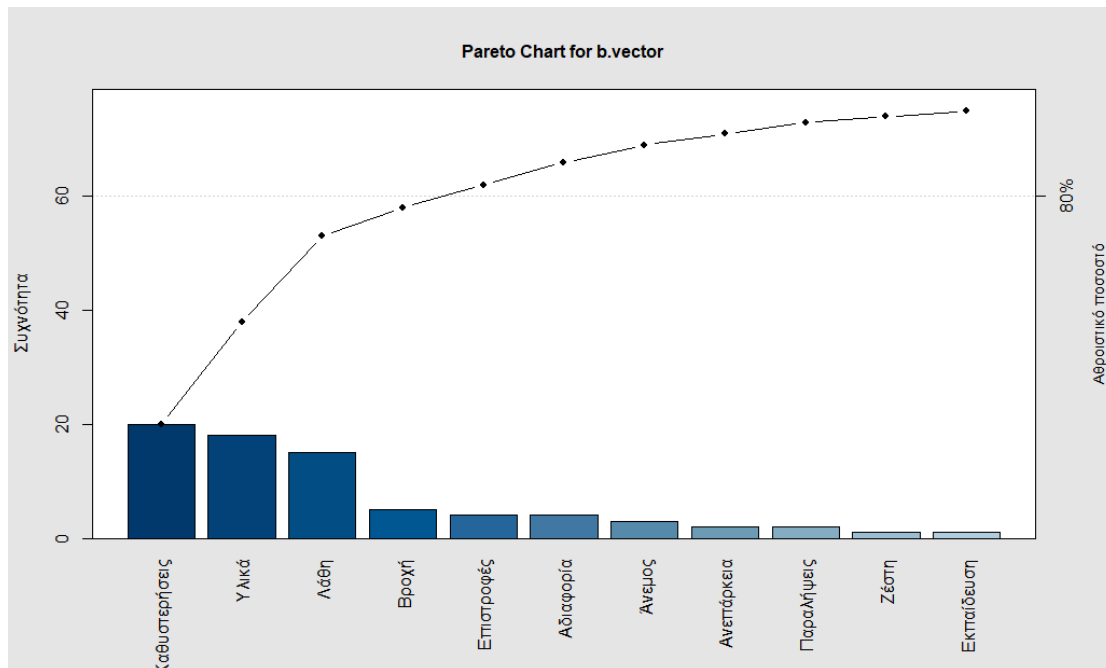
```
library(qcc)
b.vector <- b.data$count
names(b.vector) <- b.data$cause
pareto.chart(b.vector, ylab = "Συχνότητα", ylab2 = "Αθροιστικό ποσοστό",
             cumperc = c(80))
```

Πίνακας 4.3.: Ανάλυση του διαγράμματος Pareto.

	Συχνότητες	Αθροιστικές συχνότητες	Ποσοστά	Αθροιστικά ποσοστά
Καθυστερήσεις	20.00	20.00	26.67%	26.67%
Υλικά	18.00	38.00	24.00%	50.67%
Λάθη	15.00	53.00	20.00%	70.67%
Βροχή	5.00	58.00	6.67%	77.33%
Επιστροφές	4.00	62.00	5.33%	82.67%
Αδιαφορία	4.00	66.00	5.33%	88.00%
Άνεμος	3.00	69.00	4.00%	92.00%
Ανεπάρκεια	2.00	71.00	2.67%	94.67%
Παραλήψεις	2.00	73.00	2.67%	97.33%
Ζέστη	1.00	74.00	1.33%	98.67%
Εκπαίδευση	1.00	75.00	1.33%	100.0%

Παρατηρούμε ότι η στήλη με τις συχνότητες είναι οι συχνότητες κάθε αιτίας ταξινομημένες κατά φθίνουσα σειρά. Οι συχνότητες βρίσκονται στο πλαίσιο δεδομένων που είδαμε παραπάνω. Η πρώτη γραμμή στη στήλη με τις αθροιστικές συχνότητες είναι απλώς η συχνότητα. Από τη δεύτερη γραμμή και έπειτα οι αθροιστικές συχνότητες προκύπτουν από το άθροισμα της αθροιστικής συχνότητας με την αμέσως επόμενη συχνότητα. Η στήλη με τα ποσοστά περιλαμβάνει τις τιμές που φαίνονται στο διάγραμμα Pareto (σχήμα 4.8.). Τέλος τα αθροιστικά ποσοστά από

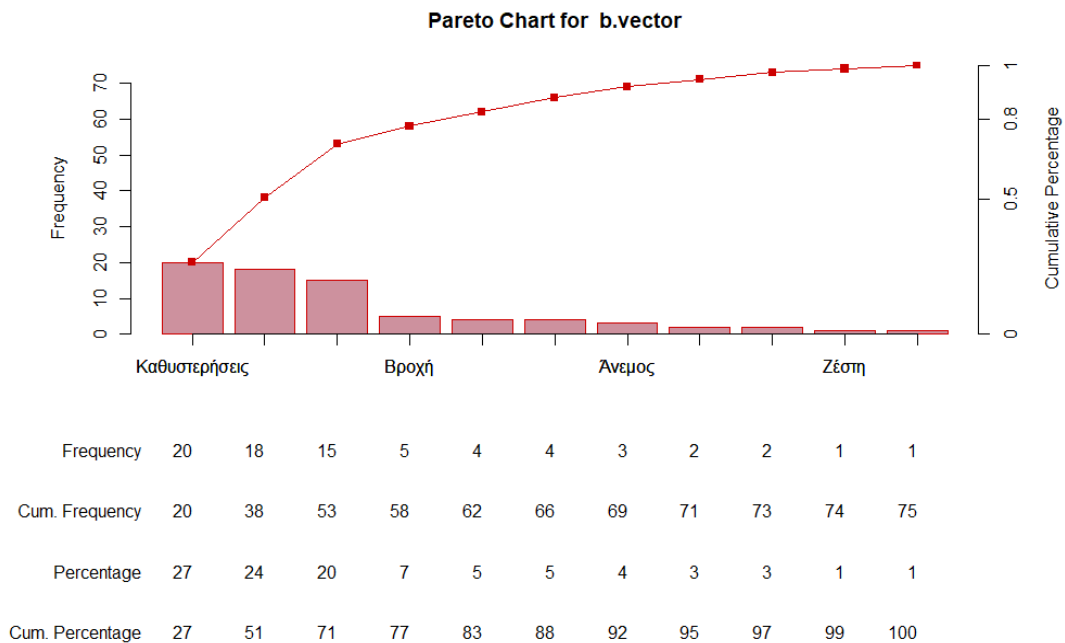
τη δεύτερη γραμμή και έπειτα προκύπτουν ως το άθροισμα του αθροιστικού ποσοστού με το αμέσως επόμενο ποσοστό. Παρατηρούμε ότι από οι 7 από τις 11 αιτίες είναι πάνω από το 80% το αθροιστικό τους ποσοστό.



Σχήμα 4.9.: Διάγραμμα Pareto.

Μπορούμε επίσης να κατασκευάσουμε ένα διάγραμμα Pareto και να πάρουμε ένα πίνακα παρόμοιο με τον πίνακα 4.3. χρησιμοποιώντας την συνάρτηση *paretoChart* που περιλαμβάνει το πακέτο *qualityTools*. Ο κώδικας δίνεται παρακάτω. Προτού τρέξουμε αυτές τις δύο συναρτήσεις πρέπει να έχουμε στα υπόψη μας ότι και οι δύο συναρτήσεις απαιτούν ένα αριθμητικό διάνυσμα με επονομαζόμενα στοιχεία, αντί για ένα πλαίσιο δεδομένων. Παρατηρούμε ότι εκτός από το διάγραμμα, υπάρχουν από κάτω οι συχνότητες, οι αθροιστικές συχνότητες, τα ποσοστά και τα αθροιστικά ποσοστά και των 11 αιτιών. Επίσης, ο πίνακας που προκύπτει είναι ο ίδιος με τον πίνακα 4.3.

```
library(qualityTools)
paretoChart(b.vector, lass = 2,
            percentVec = c(0, 0.5, 0.80, 1))
```



Σχήμα 4.10.: Διάγραμμα Pareto με χρήση του πακέτου qualityTools.

4.3.5. Άλλες χρήσεις του διαγράμματος Pareto

Όπως έχουμε αναφέρει στην ενότητα 4.2.1.1. η αρχή του Pareto είναι ένα εργαλείο για την επίλυση προβλημάτων. Κατά συνέπεια, μπορούμε να εφαρμόσουμε το διάγραμμα Pareto οπουδήποτε μέσα στο πρότζεκτ μας για να βελτιώσουμε τη διαδικασία.

Επίσης ένα διάγραμμα Pareto μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την επιλογή ενός πρότζεκτ. Στα αρχικά στάδια μιας εφαρμογής 6σ, μπορεί να χρειαστεί να επιλέξουμε ένα πρότζεκτ μέσα από ένα κατάλογο διαθέσιμων πρότζεκτ. Είναι αξιοσημείωτο ότι μερικοί συγγραφείς μετασχηματίζουν τον κύκλο DMAIC σε SDMAIC στρατηγική, όπου το S αντιστοιχεί στην επιλογή (Select). Επομένως όλοι καταλαβαίνουμε ότι η επιλογή ενός πρότζεκτ είναι σημαντικός στόχος για τον κάτοχο μιας Κύριας Μαύρης Ζώνης. Στην εφαρμογή του διαγράμματος Pareto πρέπει να έχουμε κατά νου να επιλέξουμε τις κατάλληλες μονάδες μέτρησης (π.χ. αναμενόμενη μείωση του κόστους) και να εστιάσουμε στα λίγα πρότζεκτ ζωτικής σημασίας που θα μας επιτρέψουν να επιτύχουμε το 80% της εξοικονόμησης του κόστους.

Επίσης ένα διάγραμμα Pareto είναι χρήσιμο στη φάση Βελτίωσης, εκεί όπου στα αρχικά στάδια του σχεδιασμού ενός πειράματος, συνήθως μετράμε πολλές πιθανές

αιτίες. Μέσω ενός διαγράμματος Pareto μπορούμε να επιλέξουμε τις σημαντικές αιτίες, όταν δεν έχουμε αρκετά δεδομένα να διαχειριστούμε, όπως για παράδειγμα σε έναν έλεγχο υποθέσεων.

4.3.6. Σύνοψη

Μέσω αυτού του κεφαλαίου, παρουσιάσαμε την αρχή του Pareto και είδαμε σε συντομία κάποιες χρήσεις της στην καθημερινή ζωή. Μια από αυτές αποτελεί ουσιαστικά την κύρια εφαρμογή της ανάλυσης Pareto στη μεθοδολογία 6σ. Εν συνέχεια εισαγάγαμε ένα χρήσιμο εργαλείο για την 6σ, το διάγραμμα Pareto. Ουσιαστικά το διάγραμμα αυτό χρησιμοποιείται όταν χρειάζεται να δώσουμε προτεραιότητα σε έναν κατάλογο με στοιχεία, όπως είναι για παράδειγμα οι αιτίες αποτυχίας μιας διαδικασίας. Αυτό γίνεται για να γίνει μια διάκριση μεταξύ του «ζωτικής σημασίας λίγοι» (20%) και του «χρήσιμοι πολλοί» (80%). Επίσης σε συνδυασμό με το διάγραμμα Pareto χρησιμοποιήσαμε και το διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος ούτως ώστε να προσδιορίσουμε τις πιθανές αιτίες του λάθους.

Μετά τη θεωρητική προσέγγιση του θέματος, δείξαμε πως μπορούμε να κατασκευάσουμε ένα διάγραμμα Pareto με χρήση της R. Είδαμε ότι αυτό μπορεί να γίνει με αρκετούς τρόπους μέσα στην R (π.χ. χρήση πακέτων qcc, qualitytools). Το Κεφάλαιο έκλεισε με την παρουσίαση μερικών ακόμη χρήσεων ενός διαγράμματος Pareto.

4.4. Ανάλυση Ικανότητας Διεργασίας

Η ανάλυση ικανότητας είναι ένα πολύ σημαντικό μέρος στη Φάση Μέτρησης σε ένα 6σ πρότζεκτ. Αποτελεί επίσης και σημαντικό μέρος του κλασικού στατιστικού ελέγχου διεργασιών. Μέσω της ανάλυσης ικανότητας έχουμε τη δυνατότητα να μετρήσουμε κατά πόσο η απόδοση της διαδικασίας συμφωνεί με τις απαιτήσεις των πελατών. Οι απαιτήσεις αυτές πρέπει να μεταφραστούν σε όρια προδιαγραφών για το χαρακτηριστικό που μας ενδιαφέρει. Σημειώνεται ότι τα όρια αυτά μπορούν να είναι μονόπλευρα (μόνο άνω ή κάτω όριο) ή δίπλευρα (άνω και κάτω όριο). Αναφορά έχει ήδη γίνει στο Κεφάλαιο 3.2.

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων ετών, έχουν γίνει πολλές πρόοδοι, ειδικά όσον αφορά τη μη κανονικότητα, μη γραμμικότητα, τις διαδικασίες με πολλαπλά χαρακτηριστικά και άλλα πολλά. Για τη μέτρηση της απόδοσης της διαδικασίας χρησιμοποιούνται τα εξής μέτρα:

- Η διακύμανση (βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη),
- η απόδοση,
- τα ελαττώματα ανά μονάδα (Defects per Unit, DPU),
- τα ελαττώματα ανά ευκαιρία (Defects per Opportunity, DPO), όπου ευκαιρία είναι ο αριθμός των διαφόρων τρόπων με τους οποίους μια παραγόμενη μονάδα μπορεί να αποτύχει να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του πελάτη.
- τα ελαττώματα στο ένα εκατομμύριο ευκαιρίες (Defects per Million Opportunities, DPMO), όπου ευκαιρίες είναι 1000000 τρόποι να αποτύχει η παραγόμενη μονάδα να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του πελάτη.
- τα ελαττωματικά μέρη ανά εκατομμύριο (Defect Parts per Million, DPPM),
- Rolled Throughput Yield (RTY)³, και
- το αποτέλεσμα της διαδικασίας (Z)

³ Το RTY ορίζεται ως $RTY = \prod_{i=1}^n FTY_i = FTY_1 \times FTY_2 \times \dots \times FTY_{n-1} \times FTY_n$. Είναι η πιθανότητα μια ενιαία μονάδα να μπορεί να περάσει από ολόκληρη τη διαδικασία χωρίς ελαττώματα. Μπορείτε να πολλαπλασιάσετε τις πρώτες αποδόσεις των μεμονωμένων διαδικασιών για να αποκτήσετε την συνολική RTY.

Όταν η διαδικασία μας δεν είναι κανονική ή γραμμική ή ακόμη είναι διαδικασία η οποία έχει πολλά χαρακτηριστικά και όχι μόνο ένα, τα παραπάνω συνιστώνται για να μετρήσουν την απόδοση της διαδικασίας.

Στο κεφάλαιο αυτό, θα αναλύσουμε τις προδιαγραφές ενός προϊόντος και την απόδοση της διεργασίας. Θα δούμε τι σχέση υπάρχει ανάμεσα σε αυτά τα δύο και θα αναφερθούμε και στους δείκτες ικανότητας. Πέραν από τη θεωρητική προσέγγιση των πιο πάνω θα παρουσιάσουμε και ένα πρακτικό παράδειγμα που θα συμπεριλαμβάνει αυτές τις έννοιες. Για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τους δείκτες ικανότητας διεργασίας δείτε Kotz and Johnson (1993).

4.4.1. Προδιαγραφές

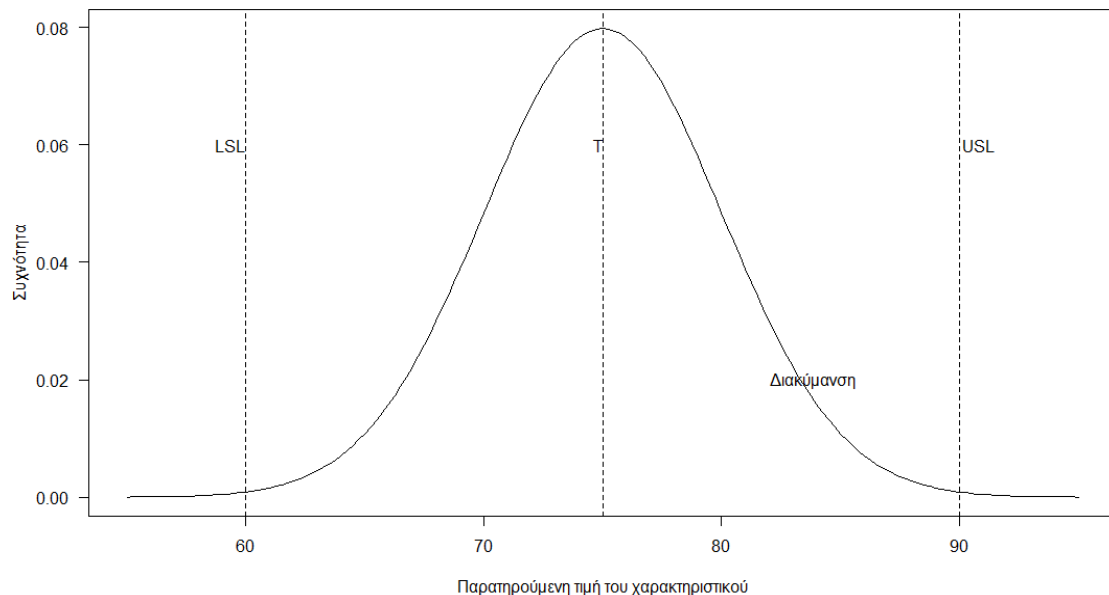
Οι προδιαγραφές είναι ουσιαστικά η φωνή του πελάτη. Σύμφωνα με ένα βσ πρότυπο, η διαδικασία πρέπει να πληροί τις απαιτήσεις του πελάτη, οι οποίες όμως πρέπει να ποσοτικοποιηθούν με κάποιο τρόπο ούτως ώστε να είναι εφικτές. Μερικές φορές οι προδιαγραφές καθορίζονται από τον πελάτη και μερικές φορές όχι. Στη δεύτερη περίπτωση, οι προδιαγραφές εκτιμώνται μέσω μελετών μάρκετινγκ, εξειδικευμένης τεχνογνωσίας ή άλλων μεσών.

Οι απαιτήσεις του πελάτη μπορούν να μεταφραστούν με αριθμητικές εκφράσεις σε αυτό που αποκαλούμε όρια προδιαγραφών. Για παράδειγμα, να απαντήσουμε σε μια τηλεφωνική κλήση πριν από τα 4 χτυπήματα. Εάν έχουμε 5 χτυπήματα τότε η διαδικασία δεν είναι ικανοποιητική και ο πελάτης δε θα μείνει ικανοποιημένος. Σε αυτό το παράδειγμα, το 4 θεωρείται η τιμή στόχος της διαδικασίας. Αυτός ο αριθμός θα ήταν ιδανικός, όμως λόγω των φυσικών διακυμάνσεων που έχει μια διαδικασία, αυτό είναι ακατόρθωτο. Έτσι λοιπόν οι προδιαγραφές συνήθως είναι εύρος με κατώτερο και ανώτερο όριο. Για παράδειγμα το μήκος ενός καρφιού είναι μεταξύ 9,5 και 10,5mm ή ο χρόνος αναμονής σε ένα ταμείο δεν μπορεί να ξεπερνά τα 5 λεπτά.

Τα κάτω και άνω όρια προδιαγραφών συμβολίζονται ως *LSL* και *USL* αντίστοιχα. Πιο συγκεκριμένα κάτω από την τιμή *LSL* η απόδοση της διαδικασίας είναι μη-αποδεκτή (ελαττωματικό προϊόν). Αντίστοιχα και πάνω από την τιμή *USL* η απόδοση της διαδικασίας είναι απαράδεκτη (ελαττωματικό προϊόν). Συνεπώς οι προδιαγραφές πρέπει να είναι ρεαλιστικές. Για την αξιολόγηση της εγκυρότητας των προδιαγραφών στην βσ, υπάρχει η γνωστή μέθοδος RUMBA η οποία σημαίνει:

R	Λογικός (Reasonable)
U	Κατανοητός (Understandable)
M	Μετρήσιμος (Measurable)
B	Αληθοφανής (Believable)
A	Εφικτός (Achievable)

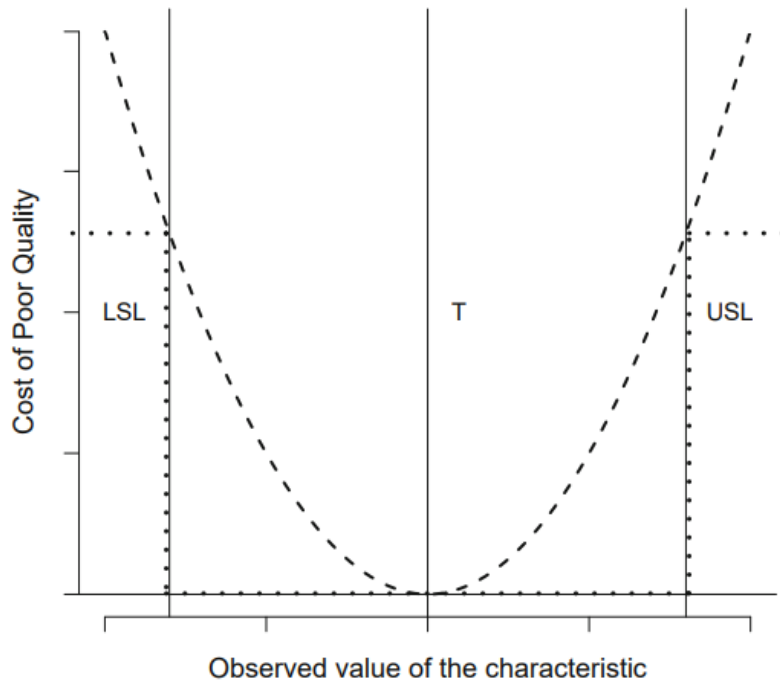
Στο παρακάτω σχήμα δίνεται ένα παράδειγμα της κατανομής του χαρακτηριστικού σε σχέση με τα όρια προδιαγραφών. Η πραγματική τιμή ενός χαρακτηριστικού ποικίλει ανάλογα με την κατανομή πιθανότητας. Το κατώτερο όριο (*LSL*), το ανώτερο όριο (*USL*) και η τιμή στόχος (*T*) χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της ικανότητας της διαδικασίας.



Σχήμα 4.11.: Όρια προδιαγραφών.

4.4.2. Απόδοση της διαδικασίας

Αφού έχουμε καταλάβει τι περιμένουμε να επιτύχει η διαδικασία μας, κρίνεται απαραίτητο να γνωρίζουμε τι πρέπει να γίνει ούτως ώστε η διαδικασία να επιτύχει. Αυτό είναι η λεγόμενη φωνή της διαδικασίας (*Voice of the Process, VOP*). Πιο απλά θα μπορούσαμε να πούμε ότι η διαδικασία είναι σωστή, εάν η τρέχουσα τιμή του χαρακτηριστικού είναι εντός των ορίων προδιαγραφών.



Σχήμα 4.12. Taguchi συνάρτηση απώλειας.

Όμως στη μεθοδολογία 6σ αυτή η προσέγγιση δεν είναι αρκετή. Δεν αρκεί μόνο η τιμή του χαρακτηριστικού να είναι εντός των ορίων προδιαγραφών, αλλά επιπλέον να προσεγγίζουμε τον στόχο με όσο το δυνατό μικρότερη διακύμανση. Αυτό γίνεται εύκολα αντιληπτό αν ανατρέξουμε στην Taguchi συνάρτηση απώλειας που είδαμε στο Κεφάλαιο 3.1.1..

Η γραμμή με τις κουκκίδες είναι το κόστος κακής ποιότητας σύμφωνα με την παραδοσιακή προσέγγιση, ενώ η διακεκομμένη γραμμή με τα μεγάλα κενά είναι το κόστος κακής ποιότητας κάτω από την 6σ προσέγγιση.

Όπως παρατηρούμε και από το Σχήμα 4.12. το κόστος κακής ποιότητας αυξάνεται όσο απομακρυνόμαστε από την τιμή στόχο και συνεπώς η απόδοση της διαδικασίας είναι χειρότερη. Όπως καταλαβαίνουμε λοιπόν η θέση της παρατηρούμενης τιμής του χαρακτηριστικού εντός των ορίων προδιαγραφών είναι πολύ σημαντική.

Μια άλλη σημαντική διαφορά ανάμεσα στην κλασσική προσέγγιση και στην 6σ προσέγγιση είναι η κρυφή έννοια του εργοστασίου. Η απόδοση (Y) μιας διαδικασίας είναι η ποσότητα «καλού υλικού» που παράγεται από τη διαδικασία. Μπορεί να αξιολογηθεί μόλις ολοκληρωθεί η διαδικασία, μετρώντας τα αντικείμενα που ταιριάζουν στις προδιαγραφές:

$$Y = \frac{\text{Συνολικά} - \text{Ελαττωματικά}}{\text{Συνολικά}}$$

Ουσιαστικά στην κλασσική προσέγγιση η απόδοση μιας διαδικασίας είναι το αποτέλεσμα της διαφοράς των συνολικών αντικειμένων μείον τα ελαττωματικά αντικείμενα προς τα συνολικά αντικείμενα.

Στην 6σ, πρέπει να λάβουμε υπόψη μας και την αναθεώρηση στο μέσο της διαδικασίας. Δηλαδή στο μέσο της διαδικασίας, κάποια αντικείμενα αναθεωρούνται. Έτσι ανεξάρτητα από τον αριθμό των σωστών αντικειμένων στο τέλος της διαδικασίας, υπολογίζουμε τα σωστά αντικείμενα ως «πρώτης φοράς» σωστά στοιχεία και υπολογίζουμε την πρώτη απόδοση (FTY):

$$FTY = \frac{\text{Συνολικά} - \text{Επανάληψη} - \text{Ελαττωματικά}}{\text{Συνολικά}}$$

Η διαφορά μεταξύ της απόδοσης (Y) και της πρώτης απόδοσης (FTY) είναι στο τι «παράγει» το κρυφό εργοστάσιο.

Παράδειγμα 4.9.: (Γαλακτοβιομηχανία)

Σε μια γαλακτοβιομηχανία, το κύριο χαρακτηριστικό του προϊόντος είναι η ποσότητα γάλακτος σε ένα μπουκάλι. Η τιμή στόχος είναι τα 750ml. Τα όρια προδιαγραφών για τη διαδικασία είναι $LSL = 740$ και $USL = 760$.

Υποθέτουμε ότι η γαλακτοβιομηχανία σε μια συγκεκριμένη μέρα έχει εμφιαλώσει 1915 μπουκάλια, όπου 5 από αυτά απορρίφθηκαν λίγο πριν την συσκευασία καθώς βρίσκονται εκτός των ορίων προδιαγραφών. Η απόδοση της διαδικασίας σύμφωνα με την κλασσική προσέγγιση είναι:

$$Y = \frac{1915 - 5}{1915} = 0,997389$$

Όμως μετά από μια επιθεώρηση, η Μαύρη Ζώνη της 6σ, διαπίστωσε ότι κατά τη διάρκεια τοποθέτησης των πωμάτων, 12 μπουκάλια χρειάστηκαν ξανά επεξεργασία εξαιτίας υπερβολικής ποσότητας γάλακτος. Συνεπώς η τιμή του FTY είναι

$$FTY = \frac{1915 - 12 - 5}{1915} = 0,9911227,$$

δηλαδή η τιμή FTY είναι μικρότερη από την τελική απόδοση Y (σύμφωνα με την κλασσική προσέγγιση).

Στην περίπτωση όπου μια διαδικασία αποτελείται από αρκετές συνδεδεμένες διαδικασίες, υπολογίζουμε πρώτα την *FTY* κάθε μεμονωμένης διαδικασίας και στην συνέχεια υπολογίζεται η τιμή του μέτρου *RTY* της συνολικής διαδικασίας, πολλαπλασιάζοντας την *FTY* κάθε συνδεδεμένης διαδικασίας όπως φαίνεται στην επόμενη σχέση

$$RTY = \prod_{i=1}^n FTY_i = FTY_1 \times FTY_2 \times \dots \times FTY_{n-1} \times FTY_n,$$

όπου *n* είναι ο αριθμός των μεμονωμένων διαδικασιών.

Παράδειγμα 4.10. : (Γαλακτοβιομηχανία, συνέχεια)

Στη γαλακτοβιομηχανία έχουμε τρεις διαδικασίες στη γραμμή γεμίσματος:

1. Γεμίστε τη φιάλη
2. Εισάγετε το πώμα
3. Ετικέτα φιάλης

Ας υποθέσουμε ότι ο αριθμός των μπουκαλιών που είναι εκτός των ορίων προδιαγραφών σε κάθε μια από τις τρεις διαδικασίες είναι 3, 12 και 5 αντίστοιχα.

Επομένως το *RTY* υπολογίζεται ως (κλασική προσέγγιση):

$$RTY = \frac{1915 - 3}{1915} \cdot \frac{1915 - 12}{1915} \cdot \frac{1915 - 5}{1915} = 0,998433 \times 0,993734 \times 0,997389 \\ = 0,989586$$

Στο κομμάτι που αφορά τα ελαττωματικά, είναι χρήσιμο να αναφέρουμε ότι τα ελαττωματικά είναι συμπληρωματικά της απόδοσης. Η απλούστερη μέτρηση των ελαττωματικών είναι η *DPU* (ελαττώματα ανά μονάδα) και υπολογίζεται ως:

$$DPU = 1 - FTY = \frac{\text{Ελαττωματικά}}{\text{Συνολικά}}$$

Η «μονάδα» μπορεί να είναι κάποιο προϊόν, μια υπηρεσία, μια διαδικασίες/λειτουργία/συναλλαγή κ.λ.π..

Για να μπορέσουμε να κάνουμε συγκρίσεις ανάμεσα σε διαφορετικές διαδικασίες, χρησιμοποιούμε είτε το *DPO* (ελαττώματα ανά ευκαιρία) είτε το *DPMO* (ελαττώματα ανά εκατομμύριο ευκαιρίες). Επομένως, μπορούμε να συγκρίνουμε το κόστος των ελαττωμάτων των διαδικασιών, ανεξάρτητα από το πόσο περίπλοκη είναι μια

διαδικασία, όπως για παράδειγμα, μεταξύ ενός μεγάλου διακομιστή (server) με 100 διαφορετικά εξαρτήματα και ενός απλού προσωπικού υπολογιστή με 50 διαφορετικά εξαρτήματα. Οι τύποι για να προκύψουν οι τιμές για το DPO και DPMO είναι οι εξής:

$$DPO = \frac{\text{Αριθμός ελαττωμάτων}}{\text{Αριθμό ευκαιριών}},$$

$$DPMO = DPO \times 10^6.$$

Παράδειγμα 4.11.: (Γαλακτοβιομηχανία – συνέχεια)

Στην περίπτωση της γαλακτοβιομηχανίας μια μονάδα η οποία πρέπει να ληφθεί υπόψη είναι η παρτίδα. Έστω ότι τα προηγούμενα δεδομένα είναι μια παρτίδα, τότε το DPU είναι:

$$DPU = \frac{20}{1915} = 0.01044386$$

Καθώς κάθε παρτίδα μπορεί να έχει διαφορετικό μέγεθος, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το DPMO για να κάνουμε συγκρίσεις. Το DPMO είναι:

$$DPMO = \frac{3 + 12 + 5}{1915} \times 10^6 = 10438.41$$

Αυτό σημαίνει ότι η εν λόγω διαδικασία, παράγει 10438,41 ελαττώματα ανά εκατομμύριο ευκαιρίες.

Τα παραπάνω μέτρα απόδοσης μπορούν να ληφθούν εύκολα και γρήγορα μέσω της R. Αυτό μπορεί να γίνει με την συνάρτηση `ss.ca.yield` που περιέχει το πακέτο SixSigma. Η συνάρτηση αυτή αποδέχεται τα ορίσματα που φαίνονται στον πίνακα 4.4..

Πίνακας 4.4. Ορίσματα συνάρτησης `ss.ca.yield`

Ορίσματα	Περιγραφή
Defects	Αριθμητικό διάνυσμα με τον αριθμό των ελαττωμάτων σε κάθε αντικείμενο / παρτίδα
Rework	Αριθμητικό διάνυσμα με τον αριθμό των επιθεωρούμενων αντικειμένων σε κάθε αντικείμενο / παρτίδα.
Opportunities	Αριθμητικό διάνυσμα με τον αριθμό των ευκαιριών.

Παράδειγμα 4.12. : (Γαλακτοβιομηχανία – συνέχεια)

Χρησιμοποιούμενα τα ίδια δεδομένα με τα προηγούμενα παραδείγματα που αφορούν τη γαλακτοβιομηχανία, προσθέτοντας επιπλέον ένα διάνυσμα με τον αριθμό των επιθεωρούμενων μπουκαλιών που επεξεργάστηκαν ξανά σε κάθε παρτίδα, 1, 2 και 4 αντίστοιχα. Χρησιμοποιώντας την παρακάτω εντολή μπορούμε να λάβουμε όλα τα μέτρα απόδοσης της διαδικασίας. Το αποτέλεσμα που δίνει η R είναι:

```
ss.ca.yield(c(3,5,12), c(1,2,4), 1915)
```

	Yield	FTY	RTY	DPU	DPMO
1	0.9895561	0.9859008	0.9859563	20	10443.86

4.4.3. Διαδικασία εναντίον Προδιαγραφών

Το αποτέλεσμα σίγμα (*sigma score*) μιας διαδικασίας (Z), ή απλώς το σίγμα, υποδεικνύει πόσες τυπικές αποκλίσεις μπορούν να «χωρέσουν» ανάμεσα στο μέσο όρο και το όριο προδιαγραφών οποιασδήποτε διαδικασίας. Επομένως, δε θα είναι έκπληξη για κανέναν, αν κάποιος ρωτήσει για το σίγμα μιας διαδικασίας. Στην πραγματικότητα, αυτός ο απλός αριθμός εκφράζει πως η διαδικασία μας προσαρμόζεται στις προδιαγραφές του πελάτη. Μια διαδικασία με το σίγμα να ισούται με 6, μπορεί να θεωρηθεί, ως μια «σχεδόν τέλεια» σχεδιασμένη διαδικασία. Η συγκεκριμένη τιμή του σίγμα, υποδηλώνει ότι θα επιτευχθούν λιγότερο από 3,4 DPMO (Cano et al., 2012).

Για να υπολογίσουμε την τιμή σίγμα, χρειαζόμαστε τα όρια προδιαγραφών και ένα δείγμα του βασικού χαρακτηριστικού που αξιολογούμε, ούτως ώστε να υπολογίσουμε τον μέσο \bar{X} . Επίσης πρέπει να γνωρίζουμε είτε την (πληθυσμιακή) τυπική απόκλιση σ είτε να την εκτιμήσουμε μέσω της δειγματικής τυπικής απόκλισης S. Επομένως ο τύπος δίνεται ως εξής:

$$Z = \min \left\{ \frac{(USL - \bar{x})}{\sigma}, \frac{(\bar{x} - LSL)}{\sigma} \right\}$$

Ανάλογα με το είδος της τυπικής απόκλισης που χρησιμοποιούμε, λαμβάνουμε είτε το βραχυπρόθεσμο (*short-term, ST*) είτε το μακροπρόθεσμο (*long-term, LT*)

αποτέλεσμα σίγμα. Συνήθως παίρνουμε το βραχυπρόθεσμο και στην συνέχεια υπολογίζουμε το μακροπρόθεσμο αποτέλεσμα ως (Cano et al. , 2012):

$$Z_{LT} = Z_{ST} - 1.5.$$

Αυτό το μακροπρόθεσμο αποτέλεσμα σίγμα μπορεί να μεταφραστεί άμεσα με DPMO όρους κάνοντας χρήση του Πίνακα 4.5. που ακολουθεί. Η τιμή 1,5 που περιλαμβάνεται στον τύπο, αποτελεί πηγή κριτικής στη βιβλιογραφία, εξαιτίας της αυθαίρετης (εμπειρική) φύση της. Στην αυθεντική επινόηση της 6σ υποτίθεται ότι ακόμη και όταν το 6σ επίπεδο ποιότητας ικανοποιείται από μια διαδικασία, ο μέσος όρος του μπορεί να υποστεί διαταραχές μέχρι και 1,5 τυπικές αποκλίσεις από την τιμή στόχο. Στην πραγματικότητα είναι απλώς ένας τρόπος να δηλώσουμε ότι οι διαδικασίες δεν είναι σταθερές «για πάντα», και αυτή η συμπεριφορά πρέπει να μοντελοποιηθεί με κάποιο τρόπο. Σύμφωνα με τον Montgomery (2005) αυτή η επιλογή «έχει αποδειχθεί ότι είναι ένας χρήσιμος τρόπος για να σκεφτούμε σχετικά με την απόδοση της διαδικασίας». Δεν πρέπει να υποτιμούμε ή να παραβλέπουμε το θέμα αυτό. Όπως έχουμε αναφέρει και στο Κεφάλαιο 2 η σπουδαιότητα της μεθοδολογίας 6σ έγκειται στο γεγονός ότι τα στάδια εφαρμογής της (DMAIC κύκλος) υποστηρίζονται από την επιστημονική μέθοδο.

Πίνακας 4.5.: DPMO βάση αποτελεσμάτων σίγμα

Z_{LT}	DPMO
1	690000
2	308000
3	66800
4	6210
5	233
6	3.4

Παράδειγμα 4.13. : (Γαλακτοβιομηχανία, συνέχεια)

Στη γαλακτοβιομηχανία μας μετρήθηκε ο πραγματικός όγκος σε δείγμα 20 μπουκαλιών μετά τη διαδικασία γεμίσματος. Τα δεδομένα παρουσιάζονται στον πίνακα 4.6. Με τα δεδομένα αυτά θέλουμε να βρούμε πόσο είναι το σίγμα της διαδικασίας.

Πίνακας 4.6. : Δεδομένα για τη γαλακτοβιομηχανία

755,81	748,38	747,16	750,46
750,54	748,11	747,53	749,27
751,05	753,07	749,22	750,33
749,52	749,56	746,76	750,26
749,21	750,08	747,64	751,29

Για τον υπολογισμό του Z της διαδικασίας χρησιμοποιούμε την συνάρτηση `ss.ca.z`. η οποία χρησιμοποιεί τις παραμέτρους που φαίνονται στον πίνακα 4.7..

Πίνακας 4.7. : Ορίσματα για την συνάρτηση `ss.ca.z`.

Ορίσματα	Περιγραφή
X	Διάνυσμα με τα δεδομένα για το βασικό χαρακτηριστικό της διαδικασίας.
LSL	Κατώτερο όριο προδιαγραφών για τη διαδικασία
USL	Ανώτερο όριο προδιαγραφών για τη διαδικασία
LT	Υποδεικνύει αν τα δεδομένα έρχονται από μακροπρόθεσμες αποδόσεις
f.na.rm	Υποδεικνύει αν τα NA πρέπει να αγνοηθούν

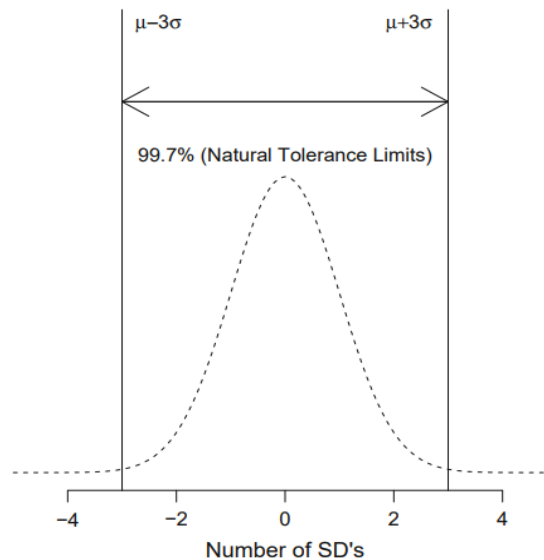
Με τον παρακάτω κώδικα αρχικά αποθηκεύουμε τα δεδομένα μας σε ένα διάνυσμα και στην συνέχεια υπολογίζουμε το Z της διαδικασίας η οποία έχει όρια προδιαγραφών $LSL = 740$ και $USL = 760$. Το αποτέλεσμα είναι 3.139539, δηλαδή το σίγμα είναι περίπου 3.14 (μικρότερο από 66800 DPMO).

```
ss.data.ca
x <- c(755.81, 750.54, 751.05, 749.52, 749.21, 748.38, 748.11, 753.07, 749.56, 750.08,
       747.16, 747.53, 749.22, 746.76, 747.64, 750.46, 749.27, 750.33, 750.26, 751.29)
ss.ca.z(x, 740, 760)
[1] 3.139539
```


4.4.4. Δείκτες ικανότητας

Οι δείκτες ικανότητας (δείτε επίσης Montgomery (2005)) είναι χρήσιμοι στην σύγκριση ανάμεσα στις προδιαγραφές του πελάτη και στην απόδοση της διαδικασίας. Συγκεκριμένα, βασίζονται στο γεγονός ότι τα φυσικά ή τα πραγματικά όρια μιας διαδικασίας είναι αυτά που είναι μεταξύ του μέσου όρου και ± 3 τυπικών αποκλίσεων. Αποδεικνύεται ότι το 99,7% των δεδομένων περιέχεται εντός των ορίων αυτών.

$$\begin{aligned} P(\mu - 3\sigma \leq X \leq \mu + 3\sigma) &= P\left(\frac{\mu - 3\sigma - \mu}{\sigma} \leq \frac{X - \mu}{\sigma} \leq \frac{\mu + 3\sigma - \mu}{\sigma}\right) \\ &= P(-3 \leq Z \leq 3) = \Phi(3) - \Phi(-3) = \Phi(3) - 1 + \Phi(3) = 0.9974 \end{aligned}$$



Σχήμα 4.13.: Φυσικά όρια ανοχής ή αποτελεσματικά όρια.

Η ικανότητα μιας διαδικασίας (C_p) υπολογίζεται χρησιμοποιώντας τον τύπο:

$$C_p = \frac{USL - LSL}{6\sigma_{ST}}$$

Ουσιαστικά η ικανότητα μιας διαδικασίας είναι το αποτέλεσμα της διαφοράς των ορίων προδιαγραφών προς 6 φορές τη βραχυπρόθεσμη τυπική απόκλιση. Όμως ο τύπος αυτός αγνοεί τη θέση στην οποία βρίσκεται το χαρακτηριστικό που μελετάμε σε σχέση με τα όρια προδιαγραφών. Δε μας επιτρέπει να ελέγξουμε αν η διαδικασία είναι κεντραρισμένη στο μέσο όρο. Επιπλέον απαιτεί να υπάρχουν και τα δύο όρια προδιαγραφών ενώ σε πολλές διαδικασίες υπάρχει μόνο το ένα. Έτσι λοιπόν αντί του

C_p μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τον προσαρμοσμένο δείκτη ικανότητας (C_{pk}) ο οποίος δίνεται από τον παρακάτω τύπο:

$$C_{pk} = \min\{C_{pl}, C_{pu}\}$$

όπου,

$$C_{pl} = \frac{(\bar{x} - LSL)}{3 \sigma_{ST}}, \quad C_{pu} = \frac{(USL - \bar{x})}{3 \sigma_{ST}}.$$

Ουσιαστικά ο δείκτης ικανότητας C_{pk} δηλώνει την ικανότητα της διαδικασίας προς τη μια μεριά του ορίου προδιαγραφών το οποίο ευθύνεται για την παραγωγή του μεγαλύτερου ποσοστού των ελαττωματικών προϊόντων. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του τόσο πιο ικανή είναι η διαδικασία.

Σημειώνεται ότι μερικές φορές αντί των βραχυπρόθεσμων δεικτών χρησιμοποιούνται οι μακροπρόθεσμοι. Συμβολίζονται ως P_p και P_{pk} αντίστοιχα.

Όπως και το αποτέλεσμα σίγμα, έτσι και οι δείκτες ικανότητας μας βοηθούν να προσδιορίσουμε πόσο καλά μια διαδικασία πληροί τις προδιαγραφές των πελατών. Σύμφωνα με τον Montgomery (2005), μια τιμή του C_{pk} ίση με 1,33 είναι αποδεκτή και η διεργασία είναι ικανή, αλλά η τιμή 1,67 είναι συνήθως ο στόχος.

Οι δείκτες για τους οποίους αναφερθήκαμε βασίζονται στα διαθέσιμα δείγματα. Ως εκ τούτου, αφού χρησιμοποιούνται οι εκτιμήσεις των μ, σ , έχουν κατανομή (και άρα μεταβλητότητα). Προφανώς η ακρίβεια των εκτιμήσεων εξαρτάται από το μέγεθος του δείγματος. Επομένως θεωρείται προτιμότερο να έχουμε διαστήματα εμπιστοσύνης για τους δείκτες και όχι μια συγκεκριμένη τιμή. Περισσότερες λεπτομέρειες για τους τύπους και τις ερμηνείες των διαστημάτων εμπιστοσύνης για του δείκτης ικανότητας μπορούν να βρεθούν στο βιβλίο του Montgomery (2005).

Παράδειγμα 4.14. : (Γαλακτοβιομηχανία – συνέχεια)

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που έχουμε λάβει από τη γαλακτοβιομηχανία, θα υπολογίσουμε τους δείκτες ικανότητας C_p και C_{pk} καθώς επίσης και τα αντίστοιχα διαστήματα εμπιστοσύνης, για τη διαδικασία γεμίσματος. Για να γίνει αυτό θα χρησιμοποιήσουμε τις συναρτήσεις $ss.ca.p$ και $ss.ca.pk$ και πιο συγκεκριμένα τον ακόλουθο κώδικα:

```
ss.ca.cp (x, 740, 760)
```

```
ss.ca.cpk (x, 740, 760)
```

Οι τιμές που λαμβάνουμε για τους συγκεκριμένους δείκτες ικανότητας είναι:

```
[1] 1.584136
```

```
[1] 1.546513
```

Έτσι μπορούμε να πούμε ότι η διαδικασία είναι αποδεκτή, καθώς η τιμή των δεικτών είναι μεγαλύτερη από το 1,33, όμως χρειάζεται βελτίωση καθώς η τιμή είναι μικρότερη από το 1,67 που είναι η επιθυμητή τιμή.

Για να λάβουμε τα αντίστοιχα διαστήματα εμπιστοσύνης για τους δείκτες ικανότητας, χρησιμοποιούμε τον παρακάτω κώδικα, ο οποίος ουσιαστικά είναι ο παραπάνω με την προσθήκη της παραμέτρου *ci* σε καθεμιά από τις συναρτήσεις:

```
ss.ca.cp(x, 740, 760, ci=TRUE)
```

```
ss.ca.cpk(x, 740, 760, ci=TRUE)
```

Τα διαστήματα εμπιστοσύνης που προκύπτουν είναι:

```
[1] 1.084600 2.083046
```

```
[1] 1.033560 2.059466
```

Η τιμή του δείκτη ικανότητας C_p αναμένουμε ότι θα βρίσκεται μέσα στο διάστημα τιμών [1.084600, 2.083046] και η αντίστοιχη τιμή του δείκτη ικανότητας C_{pk} ότι θα βρίσκεται στο διάστημα τιμών [1.033560, 2.059466].

4.4.5. Μελέτη Ικανότητας με το Πακέτο SixSigma

Η διάδοση των αποτελεσμάτων 6σ, είναι πολύ σημαντική για τους επαγγελματίες, ειδικά για τους κατόχους της Κύριας Μαύρης Ζώνης, προκειμένου να μεταδοθεί η φιλοσοφία της 6σ μέσα στον οργανισμό. Ένας τρόπος για να γίνει αυτό είναι μέσω μιας σύντομης και περιεκτικής αναφοράς σχετικά με την ανάλυση ικανότητας μιας διεργασίας, η οποία γίνεται με τη βοήθεια της R και συγκεκριμένα με τη χρήση της συνάρτησης *ss.study* που διαθέτει το πακέτο *SixSigma*. Η συνάρτηση αυτή αποδέχεται τα επιχειρήματα που παρουσιάζονται στον πίνακα 4.8.

Πίνακας 4.8. : Ορίσματα για τη Συνάρτηση ss.study.

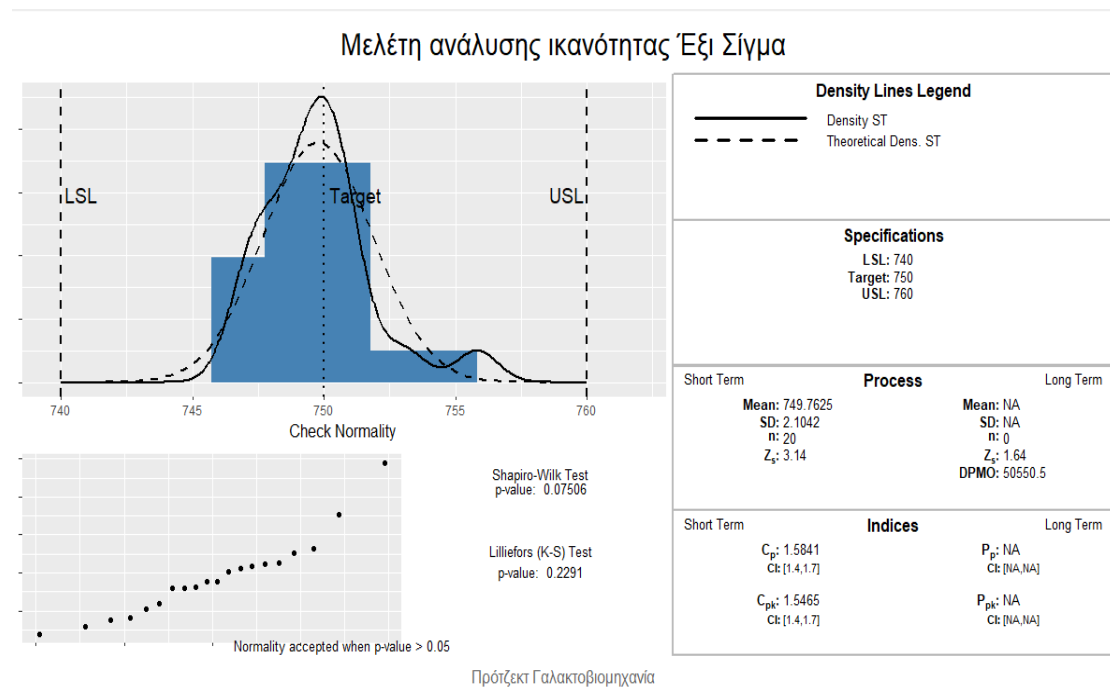
Ορίσματα	Περιγραφή
xST	Δεδομένα του δείγματος (Βραχυπρόθεσμα).
xLT	Δεδομένα για τη μακροπρόθεσμη απόδοση της διαδικασίας.
LSL	Κατώτερο όριο προδιαγραφών
USL	Ανώτερο όριο προδιαγραφών
T	Στόχος
alpha	Σφάλμα τύπου I για διαστήματα εμπιστοσύνης
f.na.rm	Υποδεικνύει αν τα NA πρέπει να αγνοηθούν
f.main	Τίτλος αποτελέσματος
f.sub	Υπότιτλος αποτελέσματος

Παράδειγμα 4.14. : (Γαλακτοβιομηχανία, συνέχεια)

Θα τρέξουμε τη μελέτη ικανότητας για το παράδειγμα της γαλακτοβιομηχανίας. Ο κώδικας είναι:

```
ss.study.ca (x, LSL=740, USL = 760, Target = 750, alpha=0.5,  
            f.main = "Μελέτη ανάλυσης ικανότητας 6σ",  
            f.su = "Πρότζεκτ Γαλακτοβιομηχανία")
```

Το αποτέλεσμα που προκύπτει είναι η γραφική παράσταση που φαίνεται στο Σχήμα 4.14.



Σχήμα 4.14.: Μελέτη Ανάλυσης Ικανότητας

Ουσιαστικά στην παραπάνω γραφική παράσταση βλέπουμε στο άνω αριστερά διάγραμμα, ένα ιστόγραμμα των δειγματοληπτικών δεδομένων, το οποίο περιλαμβάνει την τιμή στόχο (750) και τα όρια προδιαγραφών (740 και 760). Η συνεχόμενη γραμμή αντιστοιχεί στη βραχυπρόθεσμη εμπειρική πυκνότητα και η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στη βραχυπρόθεσμη θεωρητική πυκνότητα.

Το κάτω διάγραμμα είναι ένα Q-Q plot το οποίο χρησιμοποιείται για να διερευνήσουν εάν τα δεδομένα κατανέμονται κανονικά. Η κανονικότητα υπάρχει, όταν τα σημεία είναι περίπου σε μια ευθεία γραμμή. Από το γράφημα έχουμε μια ένδειξη μη – κανονικότητας των δεδομένων. Επιπλέον δίπλα από το Q-Q plot δίνονται τα δύο πιο κοινά στατιστικά tests για την κανονικότητα των δεδομένων. Αυτό των Shapiro – Wilk και των Kolmogorov – Smirnov tests. Η κανονικότητα είναι αποδεκτή όταν η τιμή p είναι μεγαλύτερη από το 0.05 (αν π.χ. το ε.σ. στο οποίο διεξάγεται το test είναι στο 5%) Αφού και τα δύο αυτά tests δίνουν τιμές μεγαλύτερες από το 0,05 (0,07506 και 0,2291) δεν απορριπτούμε τη μηδενική υποθήση και επομένως μπορούμε να δεχτούμε την κανονικότητα των δεδομένων μας.

Στη δεξιά πλευρά του Σχήματος 4.14. έχουμε τα δεδομένα της ανάλυσης. Πιο συγκεκριμένα, δίνονται τα όρια προδιαγραφών και η τιμή στόχος που εισαγάγαμε στον τύπο της συνάρτησης. Στο κουτί που γράφει Process δίνονται ο μέσος όρος, η

τυπική απόκλιση, το μέγεθος του δείγματος και η απόδοση της διαδικασίας βραχυπρόθεσμα. Η απόδοση της διαδικασίας δίνεται και μακροπρόθεσμα. Επιπρόσθετα δίνεται και η τιμή για τα DPMO. Παρατηρούμε διαφορά ανάμεσα στη βραχυπρόθεσμη απόδοση και τη μακροπρόθεσμη απόδοση. Τέλος στο τελευταίο ορθογώνιο παρουσιάζονται οι βραχυπρόθεσμοι δείκτες ικανότητας καθώς επίσης και τα αντίστοιχα διαστήματα εμπιστοσύνης.

Παρατηρούμε ότι, ο δείκτης ικανότητας $C_{pk} = 1.5465 > 1.33$ γεγονός που υποδηλώνει ότι η διαδικασία είναι αποδεκτή, αλλά χρειάζεται βελτίωση για να φτάσει την επιθυμητή τιμή 1,67. Οι μακροπρόθεσμοι δείκτες και τα διαστήματα εμπιστοσύνης δε δίνονται για τα συγκεκριμένα δεδομένα.

4.4.6. Σύνοψη

Στο Κεφάλαιο αυτό, μιλήσαμε αρχικά για τις προδιαγραφές μιας διαδικασίας οι οποίες ουσιαστικά είναι η *φωνή του πελάτη*. Μια διαδικασία πρέπει να τηρεί τις απαιτήσεις του πελάτη. Αν η τιμή του χαρακτηριστικού είναι κάτω από την τιμή LSL ή πάνω από την τιμή USL η διαδικασία είναι απαράδεκτη. Στην συνέχεια εισαγάγαμε την έννοια της απόδοσης της διαδικασίας και ορίσαμε τα κυριότερα αριθμητικά μέτρα απόδοσης όπως τα FTY, RTY, DPU, DPMO. Όλα αυτά τα είδαμε και μέσα από ένα παράδειγμα. Παρουσιάσαμε ακόμη το κομμάτι διαδικασία εναντίον προδιαγραφών και μιλήσαμε για βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη τυπική απόκλιση και την τιμή Z της διαδικασίας.

Τέλος αναφερθήκαμε στους δείκτες ικανότητας μιας διαδικασίας, όπου με τη βοήθειά τους έχουμε ένα στοιχείο για το αν η διαδικασία είναι αποδεκτή ή όχι. Από την τιμή κάθε δείκτη μπορούμε να καταλάβουμε αν η διεργασία χρειάζεται περαιτέρω βελτίωση. Το παράδειγμα με τη γαλακτοβιομηχανία ήταν ιδανικό για να παρουσιάσουμε όλα αυτά για την ανάλυση ικανότητας μιας διαδικασίας. Η χρήση της R (και συγκεκριμένα του πακέτου SixSigma) ήταν εξίσου σημαντική και ένας εύκολος και γρήγορος τρόπος για να εξάγουμε τα συμπεράσματα που θέλουμε.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ R ΓΙΑ ΤΗ ΦΑΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ

5.1. Εισαγωγή

Στο κεφάλαιο αυτό θα εισάγουμε εργαλεία τα οποία είναι χρήσιμα στη φάση ανάλυσης του κύκλου DMAIC. Συγκεκριμένα στη φάση αυτή, τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των βασικών καταχωρήσεων της διαδικασίας καθώς και της σχέσης τους με τα αποτελέσματα της διαδικασίας. Αναλυτικά στην συνέχεια θα δούμε κάποια διαγράμματα τα οποία δημιουργούνται με χρήση της R και πως αυτά είναι χρήσιμα στην εν λόγω φάση του κύκλου.

5.2. Γραφήματα με την R

Ο στόχος των γραφημάτων είναι η υποστήριξη της ερμηνείας των δεδομένων και η καλύτερη κατανόησή της. Επομένως, είναι εύκολα αντιληπτό, ότι τα γραφήματα είναι ιδιαίτερα χρήσιμα και σημαντικά σε ένα 6σ πρότζεκτ. Η παροχή επαρκούς ερμηνείας των δεδομένων χρησιμοποιώντας τα γραφήματα είναι κρίσιμη για τα πρότζεκτ μας.

Κυρίως χρησιμοποιούνται τα δισδιάστατα γραφήματα, ως βάση σε πιο περίπλοκες αναπαραστάσεις. Όταν έχουμε στη διάθεσή μας πολυδιάστατα δεδομένα, μπορούμε να τα αναπαραστήσουμε μέσω κάποιων επεκτάσεων/τροποποιήσεων των δισδιάστατων γραφημάτων.

Πιο αναλυτικά, στην ενότητα αυτή θα δούμε αρχικά τη χρήση των γραφημάτων καθώς επίσης και κάποιες βασικές έννοιες που αφορούν τα γραφήματα. Στη συνέχεια θα δούμε λεπτομερώς τους πιο σημαντικούς τύπους των γραφημάτων και προς το τέλος του Κεφαλαίου θα αναφερθούμε σε πιο περίπλοκα γραφήματα. επίσης, θα γίνει και μια σύντομη αναφορά σε πιο προηγμένα χαρακτηριστικά τα οποία είναι χρήσιμα για την κατασκευή των διαγραμμάτων.

5.3. Χρήση των γραφημάτων

Ακούγοντας τη λέξη γράφημα, έρχεται κατευθείαν στο μυαλό το απόφθεγμα που λέει: *μια εικόνα ίσο χίλιες λέξεις*. Το απόφθεγμα αυτό περικλείει όλη τη σημασία και τη χρησιμότητα ενός γραφήματος. Όμως πρέπει να συνειδητοποιήσουμε ότι τα γραφήματα είναι απλώς ένας εύκολος τρόπος για να ερμηνεύσουμε τα δεδομένα. Δεν είναι τα ίδια τα δεδομένα, ή τα ίδια τα συμπεράσματα. Σε ένα 6σ πρότζεκτ τα γραφήματα είναι χρήσιμα σε κάθε φάση του κύκλου DMAIC και όχι μόνο στη φάση ανάλυσης. Στα προηγούμενα κεφάλαια είδαμε πως χρησιμοποιούνται κάποια γραφήματα και εξαγάγαμε χρήσιμα συμπεράσματα με τη βοήθεια τους.

Στη φάση ανάλυσης τώρα, τα γραφήματα φαντάζουν εξαιρετικά χρήσιμα στα αρχικά στάδια της, όπου χρειαζόμαστε μια περιγραφή της διαδικασίας για να μπορέσουμε να κάνουμε εικασίες, να ανακαλύψουμε σχέσεις και να σχεδιάσουμε την περαιτέρω έρευνα. Έτσι η περιγραφική ανάλυση είναι η πιο σημαντική αποστολή των διαγραμμάτων. Η κατάλληλη επιλογή τύπου για τα γραφήματα είναι μείζονος σημασίας καθώς στο τέλος όταν παρουσιάσουμε τα αποτελέσματα μιας ανάλυσης σε μια αναφορά, ένα κακό διάγραμμα μπορεί να καταστρέψει όλη τη δουλειά που έγινε κατά τη διάρκεια του πρότζεκτ. Επομένως η κατάλληλη επιλογή γραφήματος μπορεί να καταστρέψει μια δουλειά ή να την απογειώσει. Σημειώνεται ότι κατά τη διάρκεια της ανάλυσης μπορούν να χρησιμοποιηθούν πολλά διαφορετικά γραφήματα για να ερμηνεύσουμε τις πληροφορίες που παρέχονται από τα δεδομένα, μέχρις ότου καταλήξουμε στα τελικά συμπεράσματα.

5.4. Υπόβαθρο

Τα περισσότερα γραφήματα που χρησιμοποιούμε στην στατιστική (και συνεπώς και στην 6σ μεθοδολογία), είναι δισδιάστατα γραφήματα. Οι δύο αυτές διαστάσεις αντιπροσωπεύονται ως δύο άξονες, ο οριζόντιος άξονας ονομάζεται X – άξονας και ο κάθετος άξονας ονομάζεται Y – άξονας. Κάθε άξονας αντιπροσωπεύει μία διαφορετική μεταβλητή. Εάν θέλουμε να παρουσιάσουμε την σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών, συνήθως ο X – άξονας αντιστοιχεί στην *ανεξάρτητη* μεταβλητή και στον Y – άξονα στην *εξαρτημένη* μεταβλητή.

Η φύση των μεταβλητών που μετρούμε σε κάθε διάσταση καθορίζει την κλίμακα του γραφήματος. Πολλές φορές το γράφημα είναι σωστό για εμάς, αλλά μερικές φορές θα χρειαστεί να προσαρμόσουμε την κλίμακα του γραφήματος για να βελτιώσουμε την ικανότητά του ούτως ώστε να μπορούμε να αναφερθούμε σωστά στα δεδομένα. Για παράδειγμα, έχουμε τη δυνατότητα να επιλέξουμε διαφορετικές κλίμακες όπως π.χ. μια λογαριθμική κλίμακα για μία από τις δύο διαστάσεις ή και για τις δύο. Επιπλέον μπορούμε να ορίσουμε μια αναλογία απεικόνισης μεταξύ των δύο διαστάσεων (π.χ. ο Y – άξονας διπλασιάζει τον X – άξονα). Η κλίμακα σαφώς και πρέπει να εμφανίζεται στο διάγραμμα ούτως ώστε να αποφευχθούν λανθασμένες ερμηνείες ή παρεξηγήσεις.

Ένα άλλο ζήτημα σχετικά με το γράφημά μας είναι ο καθορισμός των ορίων του. Ο χώρος για να δημιουργηθεί το γράφημα είναι άπειρος, όμως η οθόνη ή ένα κομμάτι χαρτί στο οποίο θα προβληθεί δεν είναι. Επομένως είναι αναγκαίο να επιλέξουμε τα όρια των αξόνων μας, και τα όρια αυτά πρέπει να επιτρέπουν μια σαφή απεικόνιση των δεδομένων χωρίς να κρύβονται τυχόν σχετικές πληροφορίες. Συνιστάται στο γράφημα να επισυνάπτονται και ορισμένα στοιχεία, ακόμη και ένας πίνακας με τα δεδομένα τα οποία παρουσιάζονται στο γράφημα.

Παράδειγμα 5.1. (Μελάνια εκτυπωτή)

Ο πίνακας 5.1. παρουσιάζει τα δεδομένα ενός δείγματος από 24 δοχεία μελανιού εκτυπωτή μιας δεδομένης μάρκας. Είναι από τρία διαφορετικά γεμίσματα και υπάρχουν δύο τύποι μελανιών: το έγχρωμο και το μαύρο. Η ποσότητα και η πυκνότητα μετρήθηκαν σε κάθε μελάνι.

Με την εντολή `ss.data.pc` που περιέχει το πακέτο `SixSigma` της R λαμβάνουμε τα δεδομένα που αναφέραμε. Στο παράδειγμα αυτό θα σχεδιάσουμε ένα διάγραμμα διασποράς (`scatterplot`) για τις δύο μεταβλητές (ποσότητα και πυκνότητα) με διαφορετικές ρυθμίσεις για τους άξονες. Οι κώδικες που χρησιμοποιήσαμε δίνονται πιο κάτω.

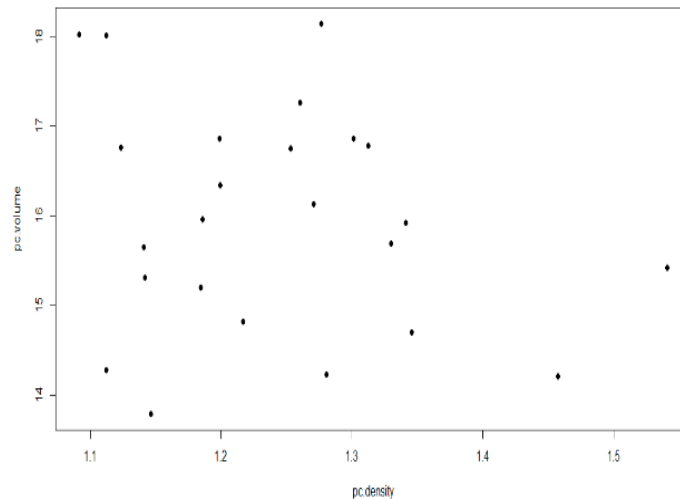
Πίνακας 5.1. Δεδομένα για Μελάνια Εκτυπωτή

	Pc.col	Pc.filler	Pc.volume	Pc.density	Pc.batch	Pc.op
1	C	1	16.75	1.25	1	A
2	C	2	18.01	1.11	1	B
3	C	3	15.64	1.14	1	C
4	C	1	18.03	1.09	1	D
5	C	2	13.78	1.15	2	A
6	C	3	16.76	1.12	2	B
7	C	1	14.69	1.35	2	C
8	C	2	15.20	1.18	2	D
9	C	3	14.21	1.46	3	A
10	C	1	15.96	1.19	3	B
11	C	2	18.15	1.28	3	C
12	C	3	14.23	1.28	3	D
13	B	1	16.86	1.30	4	A
14	B	2	14.28	1.11	4	B
15	B	3	16.13	1.27	4	C
16	B	1	15.92	1.34	4	D
17	B	2	16.86	1.20	5	A
18	B	3	16.34	1.20	5	B
19	B	1	15.42	1.54	5	C
20	B	2	16.79	1.31	5	D
21	B	3	15.31	1.14	6	A
22	B	1	14.82	1.22	6	B
23	B	2	17.27	1.26	6	C
24	B	3	15.69	1.33	6	D

Οι εντολές για να προκύψουν τα διαγράμματα διασποράς είναι:

```
ss.data.pc  
plot (pc.volume ~ pc.density, data = ss.data.pc, pch = 16)
```

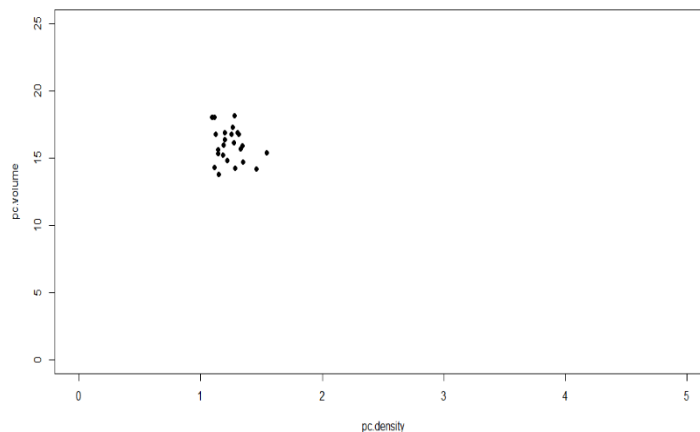
Το γράφημα είναι το ακόλουθο, όπου η απεικόνιση των δεδομένων έγινε χρησιμοποιώντας τις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις (αυτόματα προσαρμοσμένες κλίμακες).



Σχήμα 5.1. (α): Διάγραμμα Διασποράς των Δεδομένων του Πίνακα 5.1

Αν τώρα δώσουμε την παρακάτω εντολή, προκύπτει το επόμενο διάγραμμα διασποράς για τα δεδομένα του Πίνακα 5.1. Εδώ έχει χρησιμοποιηθεί μεγέθυνση των αξόνων.

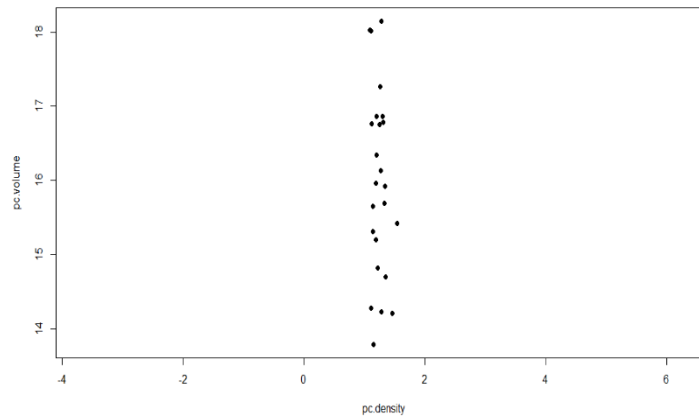
```
plot (pc.volume ~ pc.density, data = ss.data.pc, xlim = c(0,5), ylim = c(0,25), pch = 16)
```



Σχήμα 5.1. (β): Διάγραμμα Διασποράς των Δεδομένων του Πίνακα 5.1
(μεγέθυνση αξόνων)

Τέλος η παρακάτω εντολή μας δίνει το επόμενο διάγραμμα διασποράς, στο οποίο τα δεδομένα απεικονίζονται με τις ίδιες κλίμακες στους δύο άξονες.

```
plot (pc.volume ~ pc.density, data = ss.data.pc, asp = 1, pch = 16)
```



Σχήμα 5.1. (γ): Διάγραμμα Διασποράς των Δεδομένων του Πίνακα 5.1 (ίδια κλίμακα αξόνων)

Ένα τελευταίο ζήτημα που πρέπει να αναφερθεί και είναι εξίσου σημαντικό είναι τι σύμβολο θα χρησιμοποιήσουμε στον σχεδιασμό του γραφήματος. Τα δύο βασικά σύμβολα που έχουμε τη δυνατότητα να επιλέξουμε είναι κουκκίδες και γραμμές. Μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε διαφορετικούς τύπους κουκκίδων (γεμισμένο κύκλο, άδειο κύκλο, τρίγωνο κ.λπ.) καθώς επίσης και διαφορετικούς τύπους γραμμών (συμπαγείς, διακεκομμένες κ.α.) για να διακρίνουμε διαφορετικά μπλοκ πληροφοριών (π.χ. δεδομένα από διαφορετικές χώρες σε μια δεδομένη χρονολογική σειρά). Επιπλέον έχουμε τη δυνατότητα να ενώσουμε και τα δύο σύμβολα ή ακόμη και να χρησιμοποιήσουμε πιο περίπλοκους τρόπους για τον προσδιορισμό των δεδομένων, όπως θα δούμε και παρακάτω.

Συχνά οι δύο διαστάσεις δεν είναι αρκετές για να αντιπροσωπεύσουν την πραγματικότητα. Έχουμε αρκετές επιλογές για την απεικόνιση πολυδιάστατων δεδομένων, αλλά ουσιαστικά είναι επεκτάσεις δύο διαστάσεων. Ενδεικτικά, κάποιες από τις επιλογές που θα χρησιμοποιήσουμε στην συνέχεια του Κεφαλαίου είναι:

- Χρώματα και σύμβολα για τη διάκριση άλλων μεταβλητών.
- Σχόλια (μπορούμε να εκτυπώσουμε κείμενο μέσα σε μια γραφική παράσταση για να προσδιορίσουμε την τιμή μιας άλλης μεταβλητής).
- Πολλαπλά γραφήματα: Αυτός είναι ο πιο εκτεταμένος τρόπος για την αναπαραγωγή πολυδιάστατων δεδομένων. Μπορούμε να σχεδιάσουμε ένα πίνακα από γραφήματα, όπου κάθε γράφημα ορίζει δύο από τις μεταβλητές.

Συνήθως όλα τα γραφήματα από τον πίνακα των γραφημάτων σχεδιάζονται χρησιμοποιώντας την ίδια κλίμακα.

Μόλις καταγράψουμε το πλήθος των μεταβλητών που θέλουμε να αναλύσουμε, μπορούμε να ακολουθήσουμε τα παρακάτω βήματα ούτως ώστε να δημιουργήσουμε το καλύτερο γράφημα:

- Επιλέξτε τις μεταβλητές που θέλετε να απεικονίσετε.
- Ανακαλύψτε τι τύπους μεταβλητών έχετε (παράγοντας, διακριτή, συνεχής).
- Αποφασίστε τι χαρακτηριστικό των δεδομένων χρειάζεστε: διακύμανση, σχέση των μεταβλητών (relationship) , κατανομή, τοποθεσία (location), ποσότητα (amount) κ.α.
- Επιλέξτε το γράφημα που είναι καταλληλότερο για την αναπαράσταση αυτών που θέλουμε να δούμε.
- Επιλέξτε προσεκτικά την κλίμακα του γραφήματος.
- Σχεδιάστε το γράφημα αρκετές φορές, μέχρις ότου να έχετε αυτό που πραγματικά θέλετε. Ίσως χρειαστεί να μετατρέψετε (μετασχηματίσετε) τα δεδομένα, ή ακόμα και να αποκτήσετε διαφορετικά ή περισσότερα δεδομένα.

Στις επόμενες ενότητες του κεφαλαίου θα δούμε πιο αναλυτικά και μέσω παραδειγμάτων μερικά γραφήματα τα οποία χρησιμοποιούνται ευρέως σε 6σ πρότζεκτ.

5.5. Ραβδόγραμμα (Bar Chart)

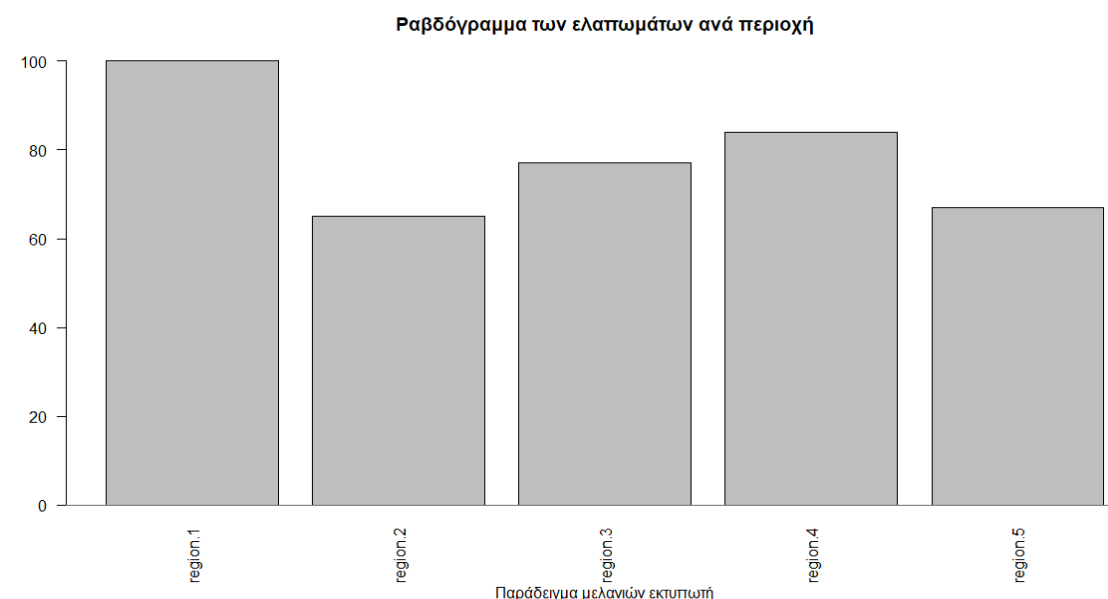
Ένα Ραβδόγραμμα είναι ένα πολύ απλό διάγραμμα όπου ορισμένες ποσότητες εμφανίζονται ως ύψη ράβδων. Κάθε ράβδος αντιπροσωπεύει έναν παράγοντα όπου μετριέται η υπό μελέτη μεταβλητή. Ένα ραβδόγραμμα είναι συνήθως η καλύτερη γραφική παράσταση για κατηγορηματικές μεταβλητές..

Παράδειγμα 5.2. (Μελάνια εκτυπωτή, συνέχεια)

Ο κατασκευαστής μελανιών εκτυπωτή διανέμει το προϊόν του σε 5 περιοχές. Μια απρόσμενη ποσότητα ελαττωματικών μελανιών έχει επιστραφεί τον τελευταίο μήνα. Το ραβδόγραμμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.2. είναι ένας απλός τρόπος για να παρουσιαστούν τα δεδομένα που φαίνονται στον Πίνακα 5.2. (προκύπτει από την συνάρτηση `ss.data.pc.r` που διαθέτει το πακέτο `SixSigma`). Στον οριζόντιο άξονα υπάρχουν οι 5 περιοχές και στον κάθετο άξονα οι συχνότητες. Κάθε ράβδος είναι ο αριθμός των ελαττωματικών μελανιών που υπάρχουν σε κάθε περιοχή. Ο κώδικας δίνεται πιο κάτω:

```
with(ss.data.pc.r,  
      barplot(pc.def, names.arg = pc.regions,  
              las=2,  
              main = "Ραβδόγραμμα των ελαττωμάτων ανά περιοχή",  
              sub = "Παράδειγμα μελανιών εκτυπωτή"))  
abline(h=0, col= "#666666")
```

Το ραβδόγραμμα που προκύπτει είναι:



Σχήμα 5.2.:Ραβδόγραμμα των ελαττωματικών ανά περιοχή (Παράδειγμα 5.2).

Πίνακας 5.2.: Ελαττωματικά ανά περιοχή για το παράδειγμα των μελανιών

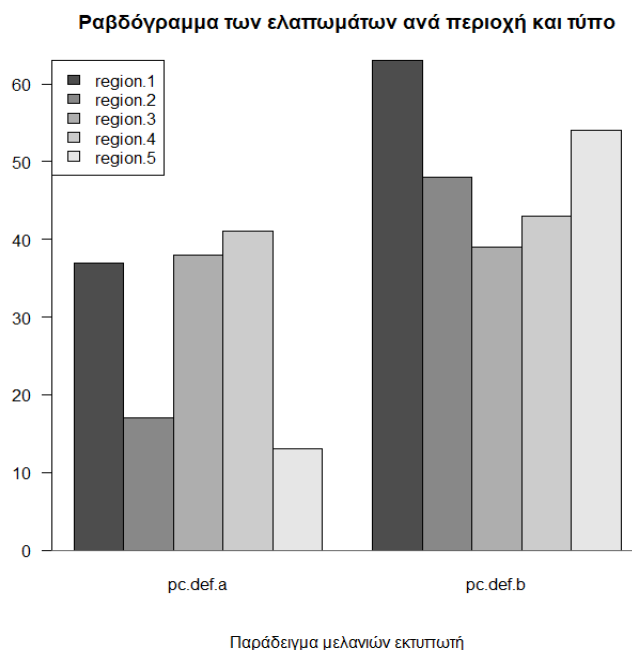
	εκτυπωτή			
	pc.regions	pc.def.a	pc.def.b	pc.def.
1	region.1	37	63	100
2	region.2	17	48	65
3	region.3	38	39	77
4	region.4	41	43	84
5	region.5	13	54	67

Αξίζει να αναφέρουμε ότι υπάρχουν αρκετές παραλλαγές στα ραβδογράμματα. Ένα διάγραμμα Pareto (δείτε Κεφάλαιο 4.2.) είναι ένα ταξινομημένο ραβδόγραμμα, από τις υψηλότερες στις χαμηλότερες ράβδους. Ένα οριζόντιο ραβδόγραμμα είναι ένα ραβδόγραμμα με τους συντελεστές στον άξονα γ. Το ιστόγραμμα που θα παρουσιάσουμε στην επόμενη ενότητα είναι ένα ειδικό διάγραμμα ράβδων για συνεχείς μεταβλητές. Μπορούμε να σχεδιάσουμε αρκετές ράβδους, όταν έχουμε να παρουσιάσουμε περισσότερες από μια κατηγορίες.

Παράδειγμα 5.3. (Μελάνια εκτυπωτή, συνέχεια)

Μπορούμε να σχεδιάσουμε το ραβδόγραμμα για κάθε τύπο μελανιού στο ίδιο γράφημα, ακόμη και με ένα υπόμνημα (δείτε Σχήμα 5.3.), χρησιμοποιώντας τον παρακάτω κώδικα. Οι περιοχές καταγράφονται δύο φορές: μία για κάθε τύπο μελανιού. Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να δούμε μια ματιά όλες τις πληροφορίες του πίνακα.

```
barplot(as.matrix(ss.data.pc.r[,2:3]), las=1, beside = TRUE,  
        legend = ss.data.pc.r[,1], args.legend = list(x="topleft"),  
        main = "Ραβδόγραμμα των ελαττωμάτων ανά περιοχή και τύπο",  
        sub = "Παράδειγμα μελανιών εκτυπωτή")  
abline(h=0, col= "#666666")
```



Σχήμα 5.3.: Πολλαπλό ραβδόγραμμα για το παράδειγμα 5.3

5.6.. Ιστόγραμμα

Ένα ιστόγραμμα είναι ένα ραβδόγραμμα για συνεχείς μεταβλητές. Το συγκεκριμένο ραβδόγραμμα δείχνει την κατανομή των μετρήσεων των μεταβλητών. Στον x – άξονα, κάθε ράβδος αντιπροσωπεύει ένα διάστημα των πιθανών τιμών μιας μεταβλητής. Το ύψος των ράβδων (δηλαδή ο y – άξονας) εξαρτάται από την συχνότητα (σχετική ή απόλυτη) των μετρήσεων μέσα σε κάθε διάστημα. Ο κανόνας είναι ότι η περιοχή των ράβδων πρέπει να είναι ανάλογη προς τις συχνότητες.

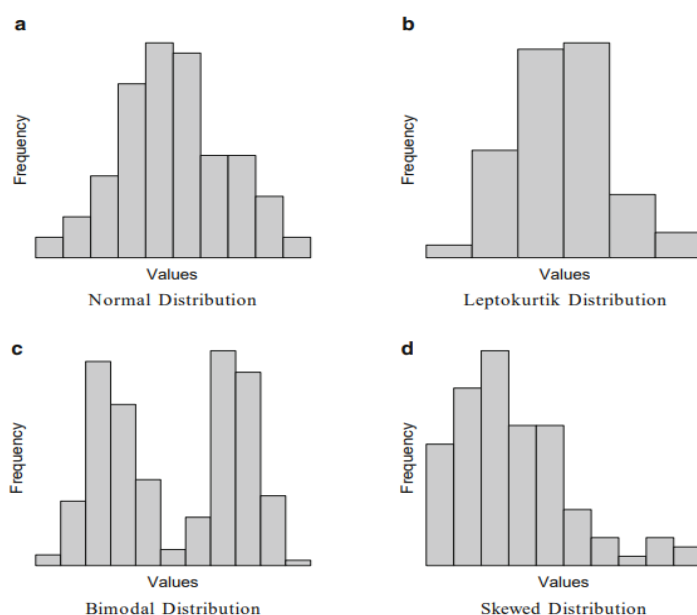
Το ιστόγραμμα χρησιμοποιείται για την εύρεση της κατανομής μιας μεταβλητής, δηλαδή:

- Είναι η μεταβλητή κεντρική ή μεροληπτική;
- Ποια είναι η διασπορά; Είναι οι παρατηρήσεις κοντά στις κεντρικές τιμές ή είναι μια κατανομή;
- Υπάρχει κάποιο μοτίβο το οποίο θα παρακινούσε σε περαιτέρω ανάλυση;
- Είναι μια κανονική κατανομή;

Για να δημιουργήσουμε ένα ιστόγραμμα των δεδομένων, πρώτα πρέπει να καθορίσουμε τον αριθμό των ράβδων που πρόκειται να σχεδιάσουμε. Στην συνέχεια, αποφασίζουμε πιο θα είναι το πλάτος των διαστημάτων (συνήθως είναι το ίδιο για όλα τα διαστήματα) και υπολογίζουμε τον αριθμό των μετρήσεων μέσα σε κάθε διάστημα. Τέλος σχεδιάζουμε τις ράβδους. Για διαστήματα με ίσα πλάτη, το ύψος των ράβδων είναι ίσο με τις συχνότητες.

Η R θα κάνει όλους τους υπολογισμούς αυτόματα, αλλά μπορούμε να αλλάξουμε τις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις για να έχουμε την καλύτερη απεικόνιση για το ιστόγραμμα μας.

Στο παρακάτω σχήμα δίνονται κάποια μοτίβα τα οποία μπορούμε να αναγνωρίσουμε σε ένα ιστόγραμμα. Το (α) αντιπροσωπεύει μια κανονική κατανομή, με τις περισσότερες τιμές γύρω από τον μέσο και το κέντρο (ο μέσος είναι ίσος με τη διάμεσο και την επικρατούσα τιμή). Το (b) είναι μια άλλη κανονική κατανομή, αλλά με υψηλότερη κορυφή (leptokurtik) από μια κανονική κατανομή. Το (c) μας δείχνει ότι μπορεί να έχουμε δυο διαφορετικές ομάδες δεδομένων, με ξεχωριστούς μέσους. Τέλος το (d) είναι μια δεξιός – λοξή κατανομή, στην οποία οι υψηλές τιμές είναι λιγότερο συχνές από τις χαμηλές τιμές οι οποίες έχουν υψηλές συχνότητες.



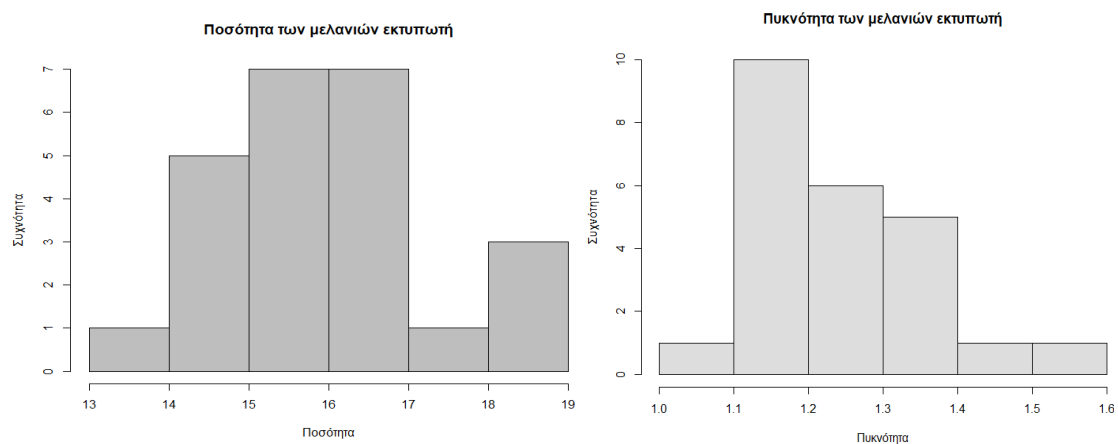
Σχήμα 5.4.: Διάφορα Μοτίβα Ιστογράμματος.

Παράδειγμα 5.4. (Μελάνια εκτυπωτή – συνέχεια)

Με τον παρακάτω κώδικα θα δημιουργήσουμε τα ιστογράμματα για την ποσότητα και την πυκνότητα των μεταβλητών για τα δεδομένα που παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.1.

```
hist(ss.data.pc$pc.volume, main = "Ποσότητα των μελανιών εκτυπωτή",  
     xlab = "Ποσότητα", ylab = "Συχνότητα", col = "grey")  
  
hist(ss.data.pc$pc.density, breaks = "FD", main = "Πυκνότητα των μελανιών εκτυπωτή",  
     xlab = "Πυκνότητα", ylab = "Συχνότητα", col = "#DDDDDD")
```

Τα δεδομένα στο αριστερά ιστόγραμμα (ποσότητα) φαίνεται να προέρχονται από κανονική κατανομή με μέσο γύρω στο 16. Από την άλλη τα δεδομένα στο δεξί γράφημα (πυκνότητα) είναι λοξός – δεξιά κατανομή με τις περισσότερες τιμές να συγκεντρώνονται στο 1.1.



Σχήμα 5.5.: Ιστογράμματα για το παράδειγμα των μελανιών εκτυπωτή.

Συνεχίζοντας το παράδειγμα θα βελτιώσουμε το ιστόγραμμα που αφορά τη μεταβλητή ποσότητα βάζοντας πάνω μια γραμμή πυκνότητας για μια θεωρητική κανονική κατανομή της οποίας η μέση τιμή είναι 16 και η τυπική απόκλιση είναι 1. Μια επισημείωση δίπλα από τη γραμμή δείχνει τις παραμέτρους. Αυτό προκύπτει χρησιμοποιώντας τον παρακάτω κώδικα:

```

hist(ss.data.pc$pc.volume, main = "Ιστόγραμμα για πυκνότητα",
     xlab = "Πυκνότητα", ylab = "Ποσότητα", col = "#BBBBBB", border = "white",
     freq = FALSE, ylim = c(0,0.4))

curve(dnorm(x,16,1), add = TRUE, lty = 2, lwd = 2, col = "blue")

lines(density(ss.data.pc$pc.volume), lwd = 2, col = "red")

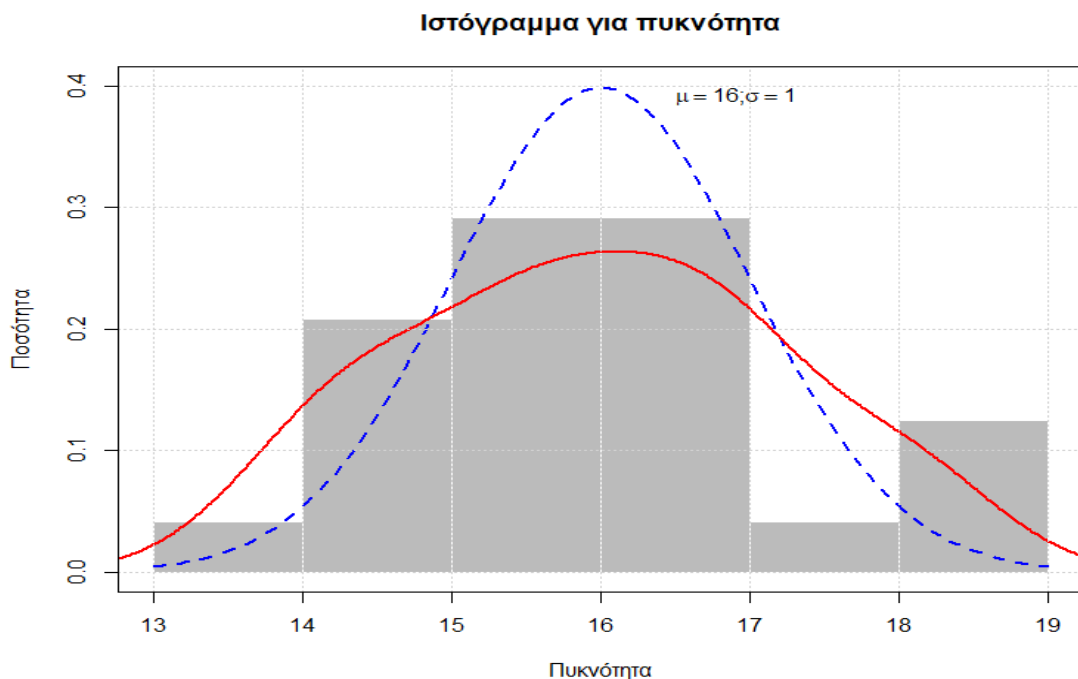
text(label = expression(paste(mu ==16, ";", sigma ==1, sep = "")), x=16.5, y=0.4,
     adj = c(0,1))

grid()

box()

```

Η συμπαγής γραμμή (κόκκινη) είναι η γραμμή πυκνότητας για τα δεδομένα. Η διακεκομμένη γραμμή (μπλε) είναι η θεωρητική γραμμή πυκνότητας για την κανονική κατανομή. Οι παράμετροι αυτής της θεωρητικής κατανομής παρουσιάζονται σαν επισημείωση δίπλα από τη διακεκομμένη γραμμή.



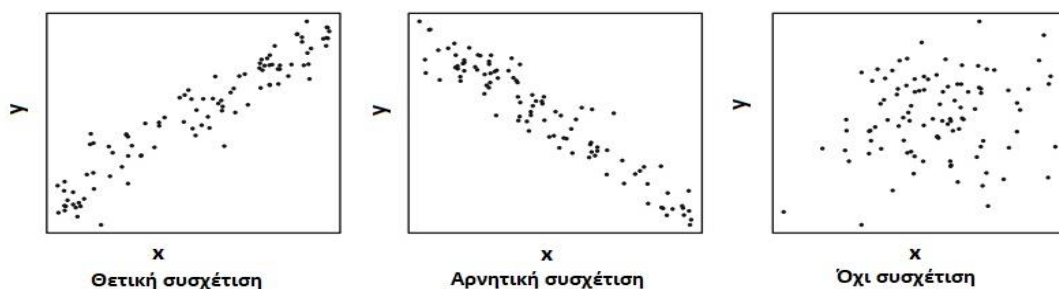
Σχήμα 5.6. Ιστόγραμμα με γραμμές πυκνότητας (παράδειγμα μελανιών).

5.7. Διάγραμμα διασποράς (Scatterplot)

Ένα διάγραμμα διασποράς είναι χρήσιμο εργαλείο γιατί φανερώνει τις σχέσεις που υπάρχουν μεταξύ δύο μεταβλητών. Στη γλώσσα της στατιστικής, οι σχέσεις αυτές μπορούν να ενταχθούν στην έννοια της *συσχέτισης*. Συνεπώς, μπορούμε να έχουμε τρία είδη συσχέτισης ανάμεσα σε δύο μεταβλητές:

- Θετική συσχέτιση: υψηλές τιμές της μίας μεταβλητής, οδηγούν σε υψηλές τιμές της άλλης μεταβλητής.
- Αρνητική συσχέτιση: υψηλές τιμές της μίας μεταβλητής, οδηγούν σε χαμηλές τιμές της άλλης μεταβλητής.
- Όχι συσχέτιση: οι μεταβλητές είναι ανεξάρτητες.

Στο παρακάτω γράφημα έχουμε κάποιες χαρακτηριστικές εικόνες διαγραμμάτων διασποράς. Όταν η σχέση μεταξύ δύο μεταβλητών είναι σαφής, έχουμε ένα από αυτά τα μοτίβο. Το πρώτο από αριστερά, παρουσιάζει θετική συσχέτιση. Το μεσαίο παρουσιάζει αρνητική συσχέτιση και το δεξιό φανερώνει ότι δεν υπάρχει συσχέτιση και επομένως οι μεταβλητές είναι ανεξάρτητες.



Σχήμα 5.7.: Μοτίβα για διαγράμματα διασποράς.

Μέσα σε ένα 6σ πρότζεκτ είναι αναγκαίο να ανακαλύψουμε ποια είναι η σχέση ανάμεσα στα Y s και X s της διαδικασίας. Αυτή η σχέση θα μετρηθεί υπό την έννοια της συσχέτισης μεταξύ των δύο μεταβλητών. Μόλις ανακαλύψουμε τι είδους σχέση υπάρχει ανάμεσα στις δύο μεταβλητές, θα πρέπει να αποδείξουμε ότι, η μεταβολή

της εξαρτημένης μεταβλητής, οφείλεται στην ανεξάρτητη μεταβλητή. Το πρώτο βήμα για να ξεκινήσουμε αυτήν την ανάλυση είναι το διάγραμμα διασποράς.

Ουσιαστικά η συσχέτιση περιγράφει το πως μεταβάλλονται οι μεταβλητές, όμως αυτή η μεταβολή δεν οφείλεται απαραίτητα στην σχέση αιτίου – αποτελέσματος.

Σε ένα διάγραμμα διασποράς, ο x – άξονας αντιπροσωπεύει την ανεξάρτητη μεταβλητή και ο y – άξονας αντιπροσωπεύει την εξαρτημένη μεταβλητή. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει το κάθε ζεύγος (x,y) αποκτώντας ένα σύννεφο από σημεία. Το διάγραμμα διασποράς χρησιμοποιείται συνήθως όταν έχουμε δύο συνεχείς μεταβλητές. Ωστόσο μπορεί να χρησιμοποιηθεί και όταν η ανεξάρτητη μεταβλητή είναι ένας παράγοντας. Η μόνη διαφορά είναι ότι θα έχουμε τις τελείες ευθυγραμμισμένες στη θέση της τιμής του παράγοντα.

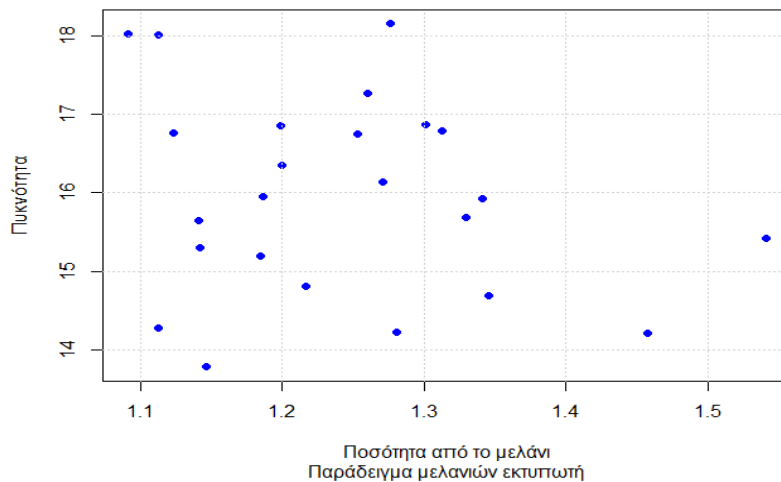
Παράδειγμα 5.5 (Μελάνια εκτυπωτή – συνέχεια)

Στο παράδειγμα των μελανιών εκτυπωτή και συγκεκριμένα στο σύνολο των δεδομένων `ss.data.pc`, έχουμε δύο συνεχείς μεταβλητές, τη μεταβλητή `pc.volume` και τη μεταβλητή `pc.density`. Για να ελέγξουμε αν η πυκνότητα και η ποσότητα σχετίζονται, το πρώτο πράγμα που πρέπει να κάνουμε είναι να δημιουργήσουμε ένα `scatterplot` για να βρούμε τα μοτίβα της σχέσης αυτής. Χρησιμοποιούμε τον ακόλουθο κώδικα για να το καταφέρουμε:

```
plot (pc.volume ~pc.density, data = ss.data.pc,
      main = "Αναζητώντας συσχέτιση ανάμεσα στην ποσότητα και την πυκνότητα",
      col = "blue", pch = 16, sub = "Παράδειγμα μελανιών εκτυπωτή",
      xlab = "Ποσότητα από το μελάνι", ylab = "Πυκνότητα")

grid()
```

Αναζητώντας συσχέτιση ανάμεσα στην ποσότητα και την πυκνότητα



Σχήμα 5.8.: Scatterplot για το παράδειγμα μελανιών εκτυπωτή.

Παρατηρούμε στο παραπάνω σχήμα ότι η ποσότητα απεικονίζεται στον x – άξονα, και η πυκνότητα στο y – άξονα. Το νέφος των σημείων δεν ακολουθεί κανένα μοτίβο, αλλά μπορούμε να πούμε ότι δεν υπάρχει συσχέτιση. Επομένως οι μεταβλητές είναι ανεξάρτητες.

5.8. Διάγραμμα ροής (run chart)

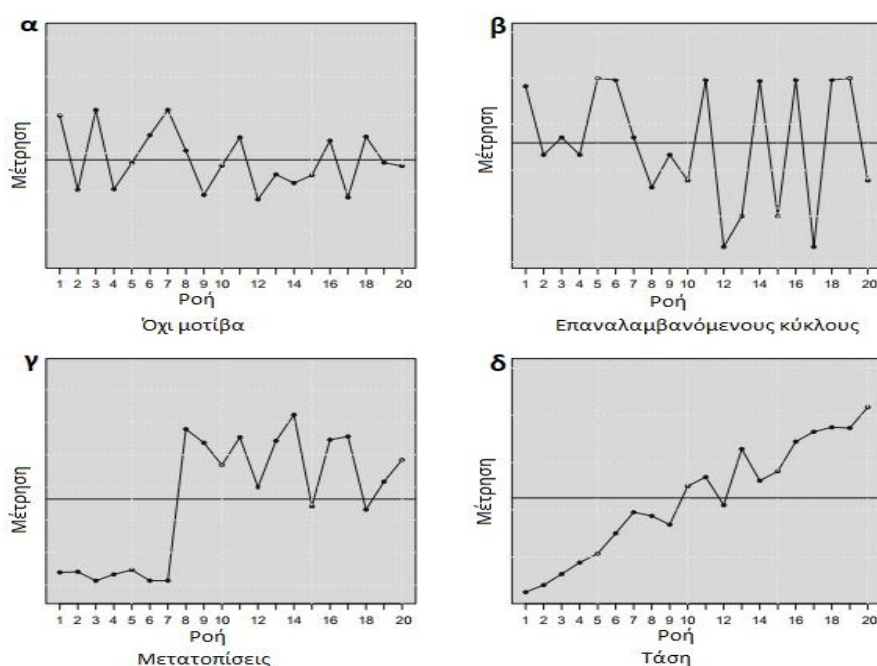
Ένα διάγραμμα ροής είναι ένα δισδιάστατο γράφημα, όπου ο x – άξονας αντιπροσωπεύει μια χρονική γραμμή και στον y – άξονα σχεδιάζεται η μεταβλητή που θέλουμε να παρακολουθήσουμε. Η μεταβλητή αυτή μπορεί να είναι κρίσιμο για την ποιότητα χαρακτηριστικό (CTQ) της διαδικασίας μας, ή μπορεί να είναι μια παράμετρος που την επηρεάζει. Αυτοί οι τύποι διαγραμμάτων είναι επίσης γνωστοί και ως γραφήματα χρονοσειρών όταν έχουμε χρονολογική κλίμακα στον x – άξονα (π.χ. ο αριθμός των παραγγελιών που λαμβάνουμε καθημερινά). Η κλίμακα του x – άξονα δεν είναι απαραίτητα χρονική (π.χ. ο όγκος ορισμένων παραληπτών των οποίων η παραγωγή είναι διαδοχική).

Επομένως, θα έχουμε έναν αριθμό υποομάδων όπου μετρείται ένα χαρακτηριστικό, και έχουμε τη σειρά των υποομάδων (παρατηρήστε ότι μια υποομάδα μπορεί να περιέχει μόνο ένα στοιχείο). Συνήθως σε ένα διάγραμμα ροής,

σχεδιάζεται μια κεντρική γραμμή, η οποία μπορεί να αντιπροσωπεύει μια τιμή στόχο, τον μέσο των δεδομένων ή οποιαδήποτε άλλη τιμή.

Με τα διαγράμματα ροής έχουμε την ευκαιρία να ανιχνεύσουμε μοτίβα, τα οποία είναι ένδειξη για αλλαγές στη διαδικασία. Οι αλλαγές συνεπάγονται μεταβλητότητα και συνεπώς λιγότερη ποιότητα. Συγκεκριμένα, αν σε γράφημα ροής εντοπίσουμε κύκλους, τάσεις ή μετατοπίσεις, θα πρέπει οπωσδήποτε να αναθεωρήσουμε τη διαδικασία.

Για παράδειγμα, στο Σχήμα 5.9., βλέπουμε πώς μπορούμε να προσδιορίσουμε τα μοτίβα σε ένα γράφημα ροής. Το (α) δεν δείχνει κάποιο μοτίβο, το (β) μοιάζει με ένα κύμα (σκαμπανεβάσματα). Στο (γ) γράφημα παρατηρούμε μια σαφή μετατόπιση από την όγδοη ροή και τέλος το (δ) παρουσιάζει μια ανοδική τάση.



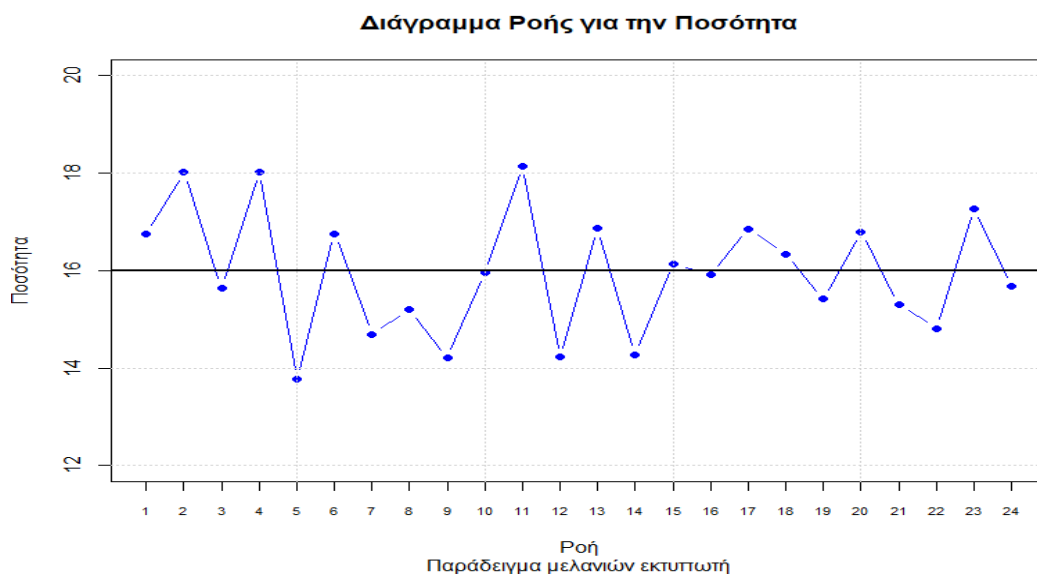
Σχήμα 5.9.: Μοτίβα σε διαγράμματα ροής.

Εάν θέλουμε να κατασκευάσουμε ένα διάγραμμα ροής με τη βοήθεια της R, χρειάζεται πρώτα να σχεδιάσουμε την υπό μελέτη μεταβλητή στον y – άξονα και τον αριθμό των ρών στον x – άξονα. Εάν έχουμε τα δεδομένα ταξινομημένα με βάση τη ροή, μπορούμε να σχεδιάσουμε αυτόματα τις τιμές χρησιμοποιώντας το διάνυσμα της απόκρισης των δεδομένων.

Παράδειγμα 5.6 (Μελάνια εκτυπωτή – συνέχεια)

Θέλουμε να παρακολουθήσουμε την ποσότητα των μελανιών. Υποθέτουμε ότι η τιμή στόχος για την ποσότητα είναι 16. Χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο κώδικα λαμβάνουμε το διάγραμμα ροής που φαίνεται στο Σχήμα 5.10.:

```
plot(ss.data.pc$pc.volume, type = "b", pch = 16, col = "blue", ylim = c(12,20),  
     axes = FALSE, main = "Διάγραμμα Ροής για την Ποσότητα",  
     sub = "Παράδειγμα μελανιών εκτυπωτή", xlab = "Ροή", ylab = "Ποσότητα")  
axis(1, at=1:24, cex.axis = 0.7)  
axis(2)  
box()  
grid()  
abline(h=16, lwd = 2)
```



Σχήμα 5.10.: Διάγραμμα ροής για το παράδειγμα μελανιών εκτυπωτή.

Παρατηρούμε στο γράφημα ότι έχουμε 24 ταξινομημένες παρατηρήσεις. Δεν παρατηρείται κάποιου είδους μοτίβο (τάση, κύκλος, μετατόπιση) στην εξέλιξη της διαδικασίας. Επομένως μπορούμε να την θεωρήσουμε ικανοποιητική και ότι δε χρήζει κάποιου είδους αναθεώρηση.

Για να βελτιώσουμε την απεικόνιση του διαγράμματος ροής και να έχουμε εν τέλει το διάγραμμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.10., προβήκαμε στις παρακάτω αλλαγές στις προεπιλεγμένες ρυθμίσεις:

- Προσθέσαμε τίτλο, υπότιτλο και ετικέτες για τους άξονες x και y .
- Έχουμε αφαιρέσει τους άξονες στην συνάρτηση `plot` και εν συνεχεία προσθέσαμε μόνοι μας τους άξονες, ούτως ώστε να μπορέσουμε να εμφανίσουμε τον αριθμό των ρών στον x – άξονα.
- Προσθέσαμε επίσης πλέγμα και κουτί στο γράφημα.

5.9. Διάγραμμα βαθμίδων (tier chart)

Ένα διάγραμμα βαθμίδων είναι παρόμοιο με ένα διάγραμμα ρών. Χρησιμοποιείται όταν έχουμε περισσότερες από μια παρατηρήσεις σε κάθε ρή (π.χ. παρτίδες, ημέρες κ.λπ.). Με το διάγραμμα βαθμίδων μπορούμε να δούμε τη βραχυπρόθεσμη και μακροπρόθεσμη διακύμανση από κοινού σε ένα γράφημα. Η βραχυπρόθεσμη διακύμανση είναι η διακύμανση εντός κάθε υποομάδας, ενώ η μακροπρόθεσμη διακύμανση είναι η διακύμανση μεταξύ όλων των ομάδων.

Για να σχεδιάσουμε ένα διάγραμμα βαθμίδων, σχεδιάζουμε κατακόρυφες γραμμές στη θέση κάθε ρής από την υψηλότερη στη χαμηλότερη τιμή. Εν συνεχεία οι μοναδικές τιμές απεικονίζονται ως σημείο ή ως κάθετο τμήμα.

Παράδειγμα 5.7 (Μελάνια εκτυπωτή – συνέχεια)

Ας υποθέσουμε ότι το δείγμα 24 μελανιών προέρχεται από 6 διαφορετικές παρτίδες και μετριέται διαδοχικά. Δηλαδή τα μελάνια 1 έως 4 είναι από την παρτίδα 1, το 5-8 είναι από την παρτίδα 2, και ούτω καθεξής. Οι πληροφορίες αυτές βρίσκονται στη μεταβλητή `pc.batch`.

Μπορούμε να δημιουργήσουμε το γράφημα χρησιμοποιώντας την συνάρτηση `stripchart` και προσθέτοντας μια γραμμή για κάθε υποομάδα. Ο κώδικας δίνεται πιο κάτω:

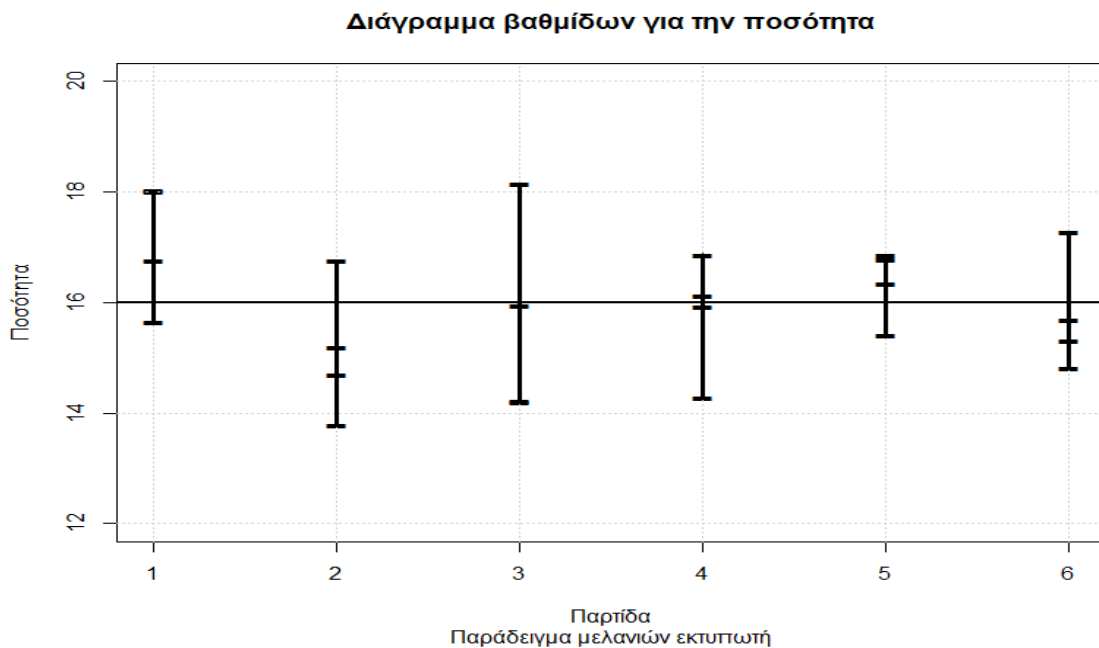
```

stripchart (pc.volume ~pc.batch, data = ss.data.pc, pch = "-", cex = 3,
           xlab = "Παρτίδα", ylab = "Ποσότητα", ylim = c(12,20),
           vertical = TRUE, main = "Διάγραμμα βαθμίδων για την ποσότητα",
           sub = "Παράδειγμα μελανιών εκτυπωτή")

grid()
for(i in 1:6){
  lines(x=rep(i,2), lwd = 3, col = "black",
        y = c(max(ss.data.pc$pc.volume[ss.data.pc$pc.batch==i]),
              min(ss.data.pc$pc.volume[ss.data.pc$pc.batch==i])))
}
abline (h =16, lwd = 2)

```

Το διάγραμμα βαθμίδων που προκύπτει είναι:



Σχήμα 5.11.: Διάγραμμα βαθμίδων για το παράδειγμα μελανιών εκτυπωτή.

Αρχικά σχεδιάσαμε ένα διάγραμμα λωρίδων (stripchart) και στην συνέχεια προσθέσαμε γραμμές (με την εντολή line) για κάθε υποομάδα-παρτίδα.

5.10. Box – Whisker διάγραμμα (Θηκόγραμμα)

Το διάγραμμα Box – Whisker είναι γνωστό και ως *box plot* (θηκόγραμμα) και ουσιαστικά συνοψίζει γραφικά την κατανομή μιας συνεχούς μεταβλητής. Οι πλευρές του κουτιού αντιστοιχούν στο πρώτο και τρίτο τεταρτημόριο (25^ο και 75^ο εκατοστημόριο αντίστοιχα). Επομένως μέσα στο κουτί υπάρχει το 50% των δεδομένων. Η διάμεσος απεικονίζεται ως μια γραμμή η οποία διασχίζει το κουτί. Οι ακραίες τιμές στα άκρα κάθε whisker (μύστακας) μπορεί να είναι το μέγιστο και το ελάχιστο των δεδομένων ή άλλα όρια (συνήθως ποσοστιαία σημεία της δειγματικής κατανομής) πέραν των οποίων τα δεδομένα θεωρούνται απομακρυσμένα. Τα όρια αυτά συνήθως λαμβάνονται ως:

$$Q1 - 1.5 \cdot IQR, \quad Q3 + 1.5 \cdot IQR$$

όπου Q1 και Q3 είναι το πρώτο και το τρίτο τεταρτημόριο αντίστοιχα. Το IQR είναι το εύρος μεταξύ των (Q3 – Q1) και είναι γνωστό ως ενδοτεταρτημοριακό εύρος (*interquartile range*). Μπορούμε να αντικαταστήσουμε το 1.5 με οποιαδήποτε τιμή στην συνάρτηση boxplot της R. Τα απομακρυσμένα σημεία σχεδιάζονται πέρα από τους μύστακες ως απομονωμένα σημεία και μπορούν να επισημανθούν προκειμένου να έχουμε ένδειξη για παρουσία έκτροπων (outliers) παρατηρήσεων στα δεδομένα.

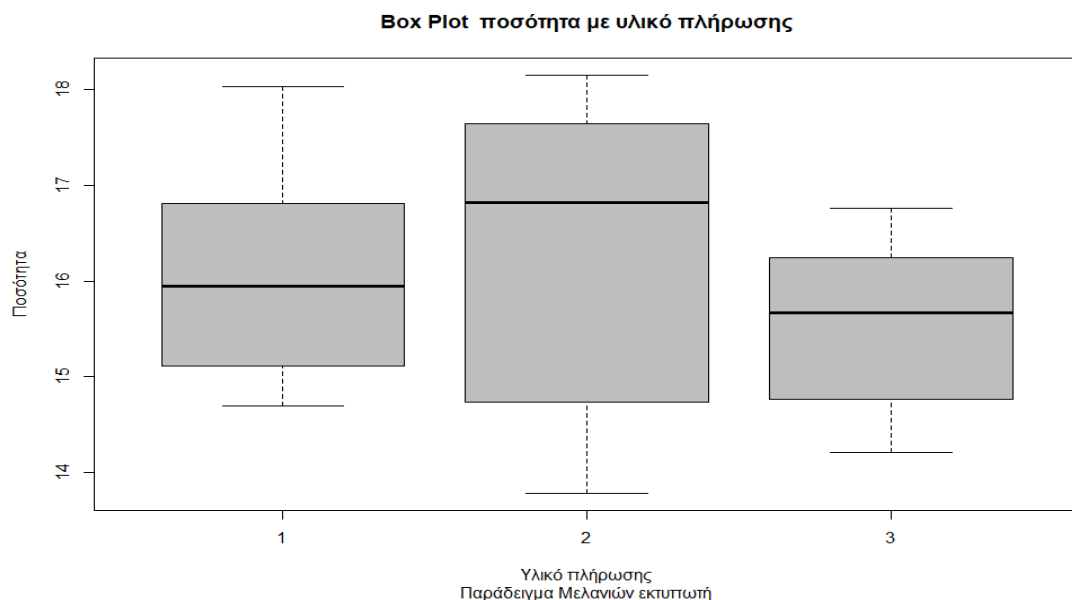
Το boxplot δίνει μια γραφική απάντηση για το αν η κατανομή μας είναι κεντραρισμένη ή όχι (δηλ. που είναι η θέση του μέσου σε σχέση με τα υπόλοιπα δεδομένα), αν υπάρχουν ακραίες τιμές (σημεία έξω από τους μύστακες) ή εάν τα δεδομένα είναι κοντά στις κεντρικές τιμές. Το γράφημα αυτό είναι ιδιαίτερα χρήσιμο όταν θέλουμε να συγκρίνουμε ομάδες και να ελέγξουμε αν υπάρχουν διαφορές μεταξύ τους.

Παράδειγμα 5.8 (Μελάνια εκτυπωτή – συνέχεια)

Σε μια γραμμή παραγωγής, έχουμε τρία υλικά πλήρωσης για τα μελάνια του εκτυπωτή. Θέλουμε να διαπιστώσουμε αν υπάρχουν διαφορές μεταξύ των υλικών πλήρωσης και να εντοπίσουμε τυχόν ακραίες τιμές (για παράδειγμα, σφάλματα στην

εισαγωγή δεδομένων). Για να λάβουμε το boxplot για το συγκεκριμένο παράδειγμα για κάθε ομάδα χρησιμοποιούμε τον ακόλουθο κώδικα:

```
library(SixSigma)
boxplot(pc.volume ~ pc.filler, data = ss.data.pc, col = "grey",
        main = "Box Plot ποσότητα με υλικό πλήρωσης",
        sub = "Παράδειγμα Μελανιών εκτυπωτή",
        xlab = "Υλικό πλήρωσης", ylab = "Ποσότητα")
```



Σχήμα 5.10.: Boxplot διάγραμμα για το παράδειγμα των μελανιών εκτυπωτή.

Παρατηρούμε ότι η ποσότητα των μελανιών που γεμίζονται από το υλικό πλήρωσης 2 είναι περισσότερο απλωμένη από την ποσότητα των μελανιών που γεμίζονται από τα υλικά πλήρωσης 1 και 3. Δεν υπάρχουν ακραίες τιμές και τα δεδομένα είναι αρκετά κεντραρισμένα.

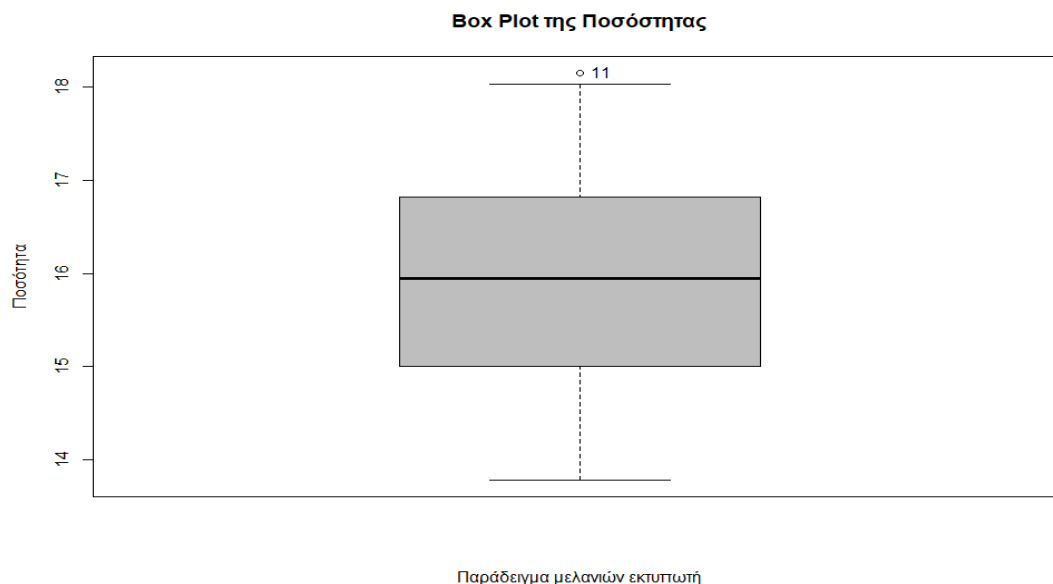
Μπορούμε να αποθηκεύσουμε το boxplot σε ένα αντικείμενο και να έχουμε πρόσβαση στα δεδομένα που χρησιμοποιούνται για να σχεδιάσουμε το διάγραμμα box – whisker. Αυτή η δυνατότητα είναι πολύ χρήσιμη για τον εντοπισμό ακραίων τιμών ή για τη διεξαγωγή περαιτέρω ανάλυσης.

Παράδειγμα 5.9 (Μελάνια εκτυπωτή – συνέχεια)

Σχεδιάζουμε ξανά ένα διάγραμμα box – whisker για όλα τα δεδομένα με τον ακόλουθο κώδικα, στον οποίον αλλάξαμε την τιμή εμβέλειας για τις ακραίες τιμές σε 0.7.

```
my.bp <- boxplot(ss.data.pc$pc.volume, col = "grey",
  main = "Box Plot της Ποσότητας",
  sub = "Παράδειγμα μελανιών εκτυπωτή",
  ylab = "Ποσότητα", range = 0.7)
text(x = rep(1, length(my.bp$out)), y = my.bp$out,
  labels = which(ss.data.pc$pc.volume==my.bp$out), pos = 4)
str(my.bp)
```

Στο συγκεκριμένο διάγραμμα τροποποιήσαμε την προεπιλεγμένη τιμή του εύρους. Παρατηρούμε ότι η 11^η σειρά των δεδομένων είναι μια ακραία τιμή.



Σχήμα 5.11.: Boxplot με ετικέτα στις ακραίες τιμές.

5.11. Άλλα γραφήματα

Πολλοί τύποι γραφημάτων μπορούν να σχεδιαστούν βασισμένοι στα δισδιάστατα γραφήματα, όπως ακριβώς τα είδαμε στις προηγούμενες ενότητες του κεφαλαίου αυτού. Δεν είναι ευχάριστο να περιοριζόμαστε σε μερικές αυστηρές προεπιλεγμένες ρυθμίσεις του λογισμικού που χρησιμοποιούμε. Για αυτό το λόγο προτιμάται η R καθώς υπερβαίνει αυτόν τον περιορισμό. Μπορούμε να σχεδιάσουμε σχεδόν οτιδήποτε χρειαζόμαστε προσαρμόζοντας απλώς κάποιες παραμέτρους στις γραφικές συναρτήσεις που παρέχει η R.

Στην ενότητα αυτή του κεφαλαίου θα σχεδιάσουμε μερικά γραφήματα τα οποία χρησιμοποιούνται στην *bs* χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα επιχειρήματα στις βασικές συναρτήσεις της R. Το διάγραμμα *πολλαπλών μεταβλητών* είναι μια εξαίρεση: θα χρησιμοποιήσουμε το *lattice graphics*, το οποίο είναι ισχυρό πακέτο για την εμφάνιση πολλαπλών δεδομένων.

5.11.1. Ομαδικό γράφημα

Σε ένα ομαδικό διάγραμμα, προσδιορίζουμε τα σημεία στο γράφημα, δείχνοντας με αυτόν τον τρόπο, την ομάδα στην οποία ανήκουν. Είναι χρήσιμο το γράφημα αυτό όταν το χαρακτηριστικό που μετράμε παράγεται από διαφορετικές ροές διαδικασιών ή μετριέται σε διαφορετικές θέσεις. Οι υψηλότερες και οι χαμηλότερες τιμές κάθε ομάδας συνδέονται συνήθως με γραμμές.

Παράδειγμα 5.10. (Μελάνια εκτυπωτή – συνέχεια)

Υποθέτουμε ότι τα 4 μελάνια του εκτυπωτή σε κάθε παρτίδα είναι επισημασμένα σύμφωνα με τον χειριστή που πουλάει τα μελάνια (A, B, C και D). Οι πληροφορίες περιέχονται στη μεταβλητή *pc.op*. Με τον ακόλουθο κώδικα λαμβάνουμε το διάγραμμα που φαίνεται στο Σχήμα 5.12.. Σημειώνεται ότι αρχικά δεν σχεδιάζουμε τίποτα στον πίνακα ($pch = ""$) και στην συνέχεια σχεδιάζουμε γραφικά στοιχεία (όπως ένα γκρι ορθογώνιο παραλληλόγραμμο, κουκκίδες, ετικέτες και γραμμές).

```

library(SixSigma)
stripchart(pc.volume~pc.batch, vertical = TRUE, data = ss.data.pc, pch = "",
          xlab = "Σύνολο παραγωγής", ylab = "Ποσότητα", ylim = c(12,20),
          main = "Ομαδικό γράφημα για την ποσότητα", sub = "Παράδειγμα μελανιών εκτυπωτή")

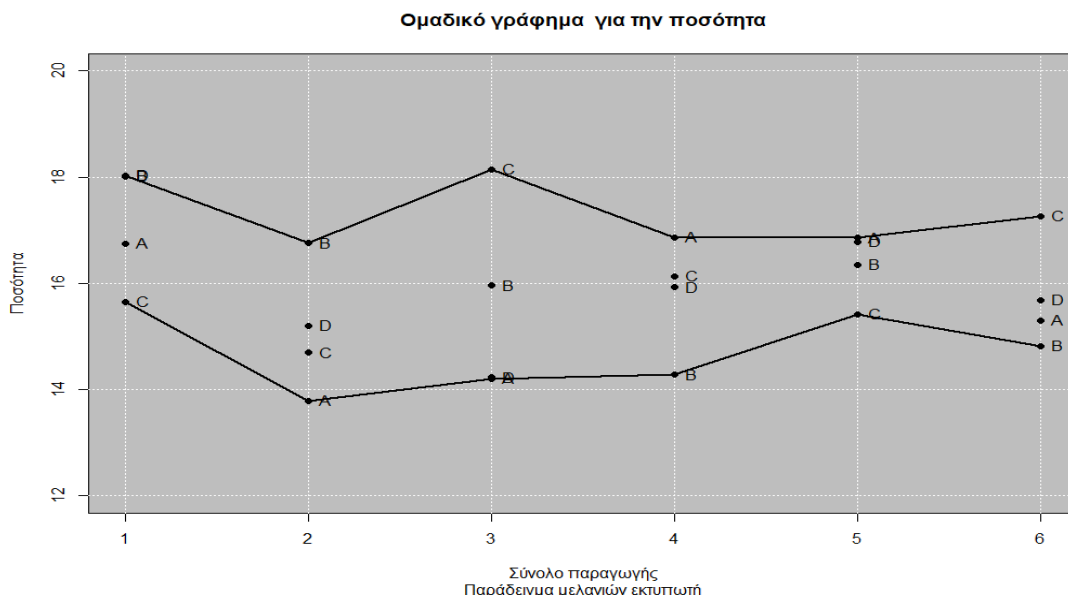
rect(par("usr")[1], par("usr")[3], par("usr")[2], par("usr")[4], col = "grey")
boxplot(col = "grey")
grid(col = "white")
points(pc.volue~ pc.batch, data = ss.data.pc, pch = 19)

with(ss.data.pc, text(label = pc.op, x = pc.batch, y = pc.volume, pos = 4))

lines(aggregate(pc.volume~pc.batch, data = ss.data.pc, max), lwd = 2)

lines(aggregate(pc.volume~pc.batch, data = ss.data.pc, min), lwd = 2)

```



Σχήμα 5.12.: Ομαδικό γράφημα για το παράδειγμα μελανιών εκτυπωτή.

Χρησιμοποιούμε αυτόν τον τύπο διαγράμματος όταν έχουμε μετρήσεις οι οποίες προέρχονται από διαφορετικές ροές διαδικασιών και θέλουμε να προσδιορίσουμε την ομάδα (ροή) στην οποία ανήκει κάθε μέτρηση. Στο διάγραμμα είναι εμφανές σε ποιο από τα τέσσερα διαφορετικά μελάνια ανήκει η κάθε μέτρηση που έγινε.

5.11.2. Διαγράμματα θέσης

Έστω ότι έχουμε στη διάθεσή μας ένα χαρακτηριστικό το οποίο μετρείται σε διάφορες θέσεις ενός τμήματος. Εάν θέλουμε να μετρήσουμε το χαρακτηριστικό αυτό σε ένα σύνολο διαφορετικών τμημάτων, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε διαγράμματα θέσης (location chart) για να το αναπαραστήσουμε. Για κάθε τμήμα ο άξονας x αντιπροσωπεύει τις θέσεις και ο y – άξονας αντιστοιχεί στην τιμή του χαρακτηριστικού σε κάθε θέση. Για να διακρίνουμε τις τιμές που αντιστοιχούν σε κάθε τμήμα, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε διαφορετικά σύμβολα ή χρώματα.

Έχουμε τη δυνατότητα να σχεδιάσουμε διαφορετικούς τύπους διαγραμμάτων θέσης, όπως για παράδειγμα, διάγραμμα θέσης ρών, διάγραμμα θέσης βαθμίδων, διάγραμμα θέσης box – whisker ή οποιοδήποτε άλλο προσαρμοσμένο γράφημα με τη θέση να βρίσκεται πάντα στο x – άξονα. Αυτού του είδους γραφήματα μπορούν να σχεδιαστούν με παρόμοιο τρόπο με τις αναπαραστάσεις που περιγράψαμε πιο πάνω, προσέχοντας όμως ότι η ερμηνεία τους είναι διαφορετική.

5.11.3. Διάγραμμα Multi-Vari

Το διάγραμμα πολλαπλών μεταβλητών (*Multi-vari chart*) είναι χρήσιμο στο να ανιχνεύουμε γραφικά ποιοι παράγοντες μπορούν να επηρεάσουν το CTQ χαρακτηριστικό. Στη διερευνητική ανάλυση μπορούμε να σχεδιάσουμε ιστορικά δεδομένα για να ανακαλύψουμε ποιοι παράγοντες μπορεί να είναι σημαντικοί για τον σχεδιασμό πειραμάτων. Η βασική ιδέα είναι να σχεδιαστούν μεμονωμένες μετρήσεις μαζί με τις μέσες τιμές των εμπλεκόμενων παραγόντων.

Η συνάρτηση *mvPlot* που περιέχεται στο πακέτο *qualityTools* που διαθέτει η R δημιουργεί διαγράμματα πολλαπλών μεταβλητών χρησιμοποιώντας τα τυπικά γραφήματα της R. Για περαιτέρω πληροφορίες σχετικά με την συγκεκριμένη συνάρτηση μπορείτε να βρείτε στο εγχειρίδιο του πακέτου και της συνάρτησης.

Σύμφωνα με τον Sarkar D. (2008) μπορούμε να κατασκευάσουμε το προσαρμοσμένο διάγραμμα πολλαπλών μεταβλητών χρησιμοποιώντας το πακέτο *lattice*. Μπορούμε να ταξινομήσουμε τη διάταξη των διαφόρων γραφημάτων σε

σειρές και στήλες και να σχεδιάσουμε ανά ομάδα, χρησιμοποιώντας χρώματα, σύμβολα και σχολιασμούς για να εμφανίσουμε διάφορες μεταβλητές.

Παράδειγμα 5.11. (Μελάνια εκτυπωτή – συνέχεια)

Θα χρησιμοποιήσουμε ένα εκτενές σύνολο δεδομένων του εργοστασίου των εκτυπωτών για το διάγραμμα πολλαπλών μεταβλητών. Αυτό το σύνολο δεδομένων θα το βρούμε με την εντολή `ss.data.pc.big`. Έχουμε όλους τους συνδυασμούς για τους 4 παράγοντες που αναφέρθηκαν προηγουμένως [χρώμα (2), χειριστής (3), υλικά πλήρωσης (3) και παρτίδα (4) αντί (6) που ήταν προηγουμένως]. Επομένως αυτό το σύνολο δεδομένων έχει 72 παρατηρήσεις ($2 \times 3 \times 3 \times 4$). Εάν κάποιος ενδιαφέρεται να δει τη δομή του συνόλου των δεδομένων μπορεί απλώς να πληκτρολογήσει `str`.

```
library(SixSigma)
str(ss.data.pc.big)
```

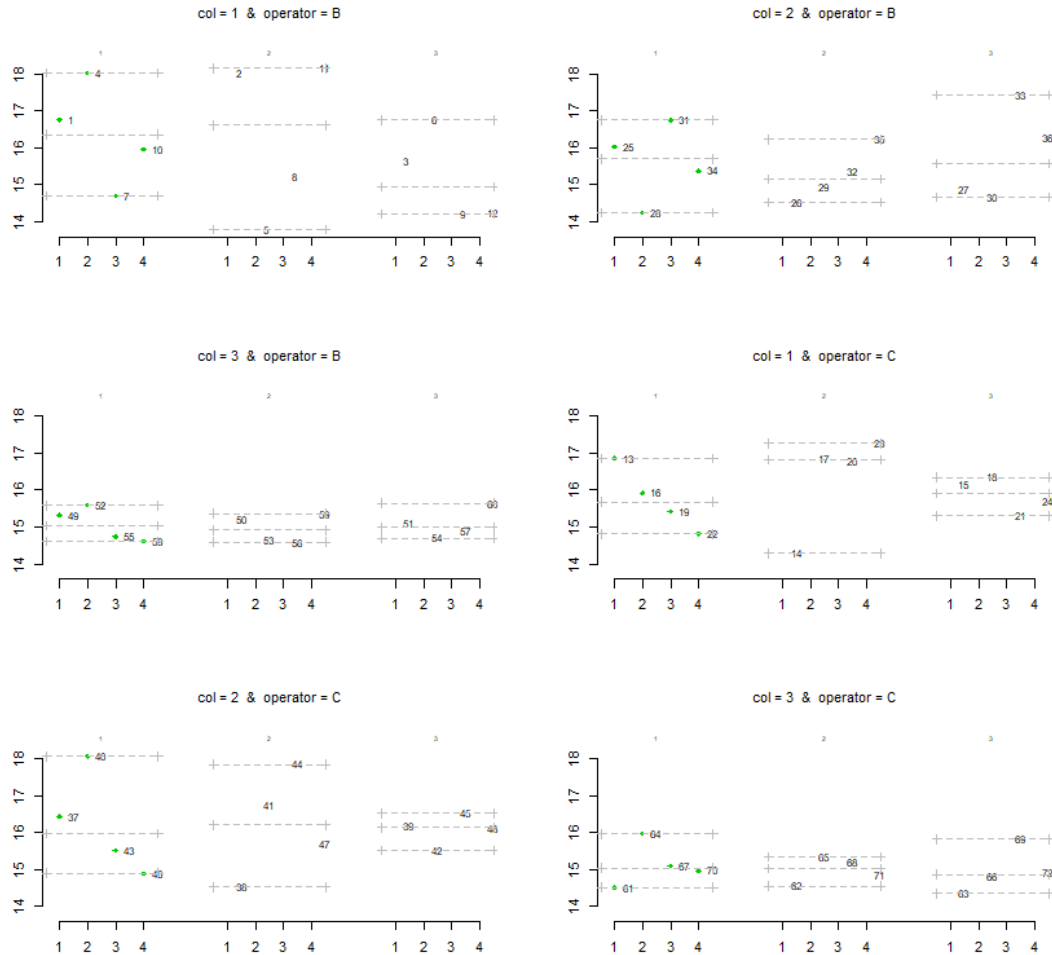
Με την παραπάνω εντολή παίρνουμε τα παρακάτω αποτελέσματα τα οποία είναι η δομή του συνόλου των δεδομένων:

```
'data.frame':      72 obs. of      5 variables:
 $filler: Factor   w/3 levels "1", "2", "3": 1 2 3 1 2 3 1 2 3 1...
 $batch:  Factor   w/4 levels "1", "2", "3", "4": 1 1 1 2 2 2 3 3 3 4 ...
 $col:    Factor   w/2 levels "B", "C": 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 ...
 $operator: Factor   w/3 levels "1" "2" "3": 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 ...
 $volume: num      16.8 18 15.6 18 13.8...
```

Για να αποκτήσουμε το διάγραμμα πολλαπλών επιλογών που παρουσιάζεται στο Σχήμα 5.13. χρειάζεται να πληκτρολογήσουμε τον παρακάτω κώδικα ενεργοποιώντας πρώτα το πακέτο `qualityTools`:

```
attach(ss.data.pc.big)
```

```
mvPlot(volume, filler, batch, col, operator, sort = TRUE, pch=18,cex.txt=0.5,labels=TRUE)
```



Σχήμα 5.13: Multi-Vari Chart

5.11.4. Περισσότερα σχετικά με τα γραφήματα

Εκτός από τις μεθόδους που περιγράψαμε σε προηγούμενες ενότητες, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και άλλες τεχνικές για την εμφάνιση δεδομένων πολλαπλών μεταβλητών:

- Βοηθητικοί άξονες για εναλλασσόμενα διαγράμματα.
- Προοπτική. Μπορούμε να απεικονίσουμε τρισδιάστατα δεδομένα σχεδιάζοντας μια προοπτική των τριών διαστάσεων (χώρου) και όχι των

δύο διαστάσεων (επίπεδο), προσθέτοντας μόνο έναν τρίτο άξονα στο γράφημα.

- Φυσαλίδες (*Bubbles*). Μπορούμε να σχεδιάσουμε κύκλους των οποίων η περιοχή είναι ανάλογη με την τιμή μιας άλλης μεταβλητής.

Τα περισσότερα γραφήματα που περιγράψαμε στο κεφάλαιο αυτό, λήφθηκαν με τη βοήθεια των συναρτήσεων που περιέχονται στο πακέτο *graphics*. Η μόνη εξαίρεση που είδαμε ήταν το διάγραμμα πολλαπλών μεταβλητών όπου για να το παράξουμε χρησιμοποιήσαμε το *qualityTools*. Εναλλακτικά, μπορεί να κατασκευαστεί και μέσα από το πακέτο *lattice*. Δείτε π.χ. Cano et al. (2012). Υπάρχουν πολλά άλλα προηγμένα πακέτα τα οποία παράγουν εξελιγμένα (και ίσως πιο εξειδικευμένα) διαγράμματα και γραφήματα.

Εκτός από το *lattice*, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και το πακέτο *ggplot2*, το οποίο χρησιμοποιεί τη μορφοσύνταξη των γραφικών. Επιπλέον μπορούμε να σχεδιάσουμε δια δραστικά γραφήματα με τη βοήθεια *iplots* πακέτου. Για περαιτέρω λεπτομέρειες μπορούμε να ανατρέξουμε στο Graphics Task View.

5.12. Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό εισαγάγαμε μερικές σημαντικές έννοιες οι οποίες αφορούν τα γραφήματα. Ο κάτοχος της Μαύρης Ζώνης μπορεί να χρησιμοποιήσει αυτές τις έννοιες για να κατασκευάσει το καταλληλότερο γράφημα για να εξηγήσει τα δεδομένα. Αρχικά αναφερθήκαμε σε ένα σύνολο διαγραμμάτων τα οποία δημιουργούνται μέσω απλών συναρτήσεων του πακέτου *graphics* που παρέχει η R. Εν συνέχεια είδαμε πως να μπορούμε να κάνουμε κάποιες βελτιώσεις, όπως τα σχόλια και επιπλέον με τη βοήθεια του πακέτου *lattice* σχεδιάσαμε ένα πιο περίπλοκο γράφημα.

Καλό θα είναι να έχουμε υπόψη ότι όσο περισσότερο προχωράμε στη γραφική ανάλυση που θέλουμε να διεξάγουμε, τόσο περισσότερο θα πρέπει να προσαρμόσουμε τα γραφήματά μας. Ο Crawley (2007) αφιερώνει ένα κεφάλαιο αποκλειστικά στα γραφήματα με χρήση της R.

Κλείνοντας το Κεφάλαιο αυτό, αξίζει να αναφέρουμε ότι στο κομμάτι της Χρήσης της R για τη Φάση Ανάλυσης του κύκλου DMAIC εμπεριέχονται και η στατιστική και πιθανότητες με τη βοήθεια της R καθώς επίσης και η στατιστική συμπερασματολογία. Στην παρούσα διπλωματική δε θα γίνει κάποια αναφορά στα συγκεκριμένα κομμάτια. Για περισσότερες λεπτομέρειες, δείτε Cano et al. (2012).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ R ΓΙΑ ΤΗ ΦΑΣΗ ΒΕΛΤΙΩΣΗΣ

6.1. Εισαγωγή

Σε αυτό το κεφάλαιο της παρούσας διπλωματικής, θα παρουσιάσουμε χρήσιμα εργαλεία για τη Φάση Βελτίωσης του κύκλου DMAIC. Ουσιαστικά στη φάση αυτή, η σχέση μεταξύ των μεταβλητών εισόδου και απόκρισης επαληθεύεται και επιπλέον οι νέες συνθήκες λειτουργίας της διαδικασίας επικυρώνονται στατιστικά. Θα ασχοληθούμε με το πιο αντιπροσωπευτικό εργαλείο της φάσης αυτής: τον σχεδιασμό πειραμάτων (DoE).

6.2. ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΩΝ

Ο σχεδιασμός πειραμάτων (DoE) είναι ένα από τα πιο σημαντικά εργαλεία στη μεθοδολογία 6σ. Σύμφωνα με τον Allen (2010) είναι το «κόσμημα της ποιοτικής μηχανικής». Είναι η ουσία της φάσης βελτίωσης και η βάση για τον σχεδιασμό ισχυρών διαδικασιών. Ωστόσο, η DoE δεν είναι η ίδια η βελτίωση. Στην πραγματικότητα, ορισμένοι συγγραφείς συμπεριλαμβάνουν το DoE στο στάδιο της Ανάλυσης του κύκλου DMAIC. Η ικανοποιητική χρήση του DoE θα οδηγήσει στη βελτίωση μιας διαδικασίας, αλλά ο κακός σχεδιασμός μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα συμπεράσματα και να προκαλέσει αντίθετα αποτελέσματα: αναποτελεσματικότητα, υψηλότερο κόστος και λιγότερη ανταγωνιστικότητα.

Στο κεφάλαιο αυτό θα παρουσιάσουμε τις βάσεις του DoE και θα εισαγάγουμε τις απαραίτητες συναρτήσεις της R για να εκτελέσουμε ένα DoE και να αναλύσουμε τα αποτελέσματά του. Εν συνεχεία θα περιγράψουμε τους 2^k παραγοντικούς σχεδιασμούς χρησιμοποιώντας τη διακύμανση του παραδείγματος που χρησιμοποιούν οι Box and Jones S. (1992) στο βιβλίο τους. Το παράδειγμα αυτό είναι αντιπροσωπευτικό του πως ένα DoE μπορεί να χρησιμοποιηθεί ούτως ώστε να επιτευχθεί βελτίωση μιας διαδικασίας με ένα 6σ τρόπο. Η ιδέα του κεφαλαίου αυτού είναι να εισαγάγει ένα απλό μοντέλο με ένα ευκολονόητο τρόπο. Για περισσότερη τεχνική ή προηγμένη εκπαίδευση, δίνονται αναφορές στο τέλος της διπλωματικής.

6.3. Η Σημασία του Πειραματισμού

Με τα αναλυτικά εργαλεία που παρουσιάσαμε σε προηγούμενα κεφάλαια (θα παρουσιαστούν και στο επόμενο κεφάλαιο), μπορούμε να εκτελέσουμε μελέτες παρατήρησης (observational studies). Σε τέτοιου είδους μελέτες ενεργούμε ως εξωτερικός παρατηρητής, δηλαδή δεν έχουμε καμία απολύτως επίδραση στις μεταβλητές που μετράμε. Συλλέγουμε τα δεδομένα ακριβώς και τα αναλύουμε χρησιμοποιώντας την κατάλληλη τεχνική (π.χ. παλινδρόμηση, ανάλυση διακύμανσης κ.α.).

Ο DoE μας επιτρέπει να ελέγξουμε τις τιμές των Xs της διαδικασίας και στην συνέχεια να μετρήσουμε την τιμή των Ys για να ανακαλύψουμε ποιες τιμές των ανεξάρτητων μεταβλητών θα μας επιτρέψουν να βελτιώσουμε την απόδοση της διαδικασίας μας (η εξαρτημένη μεταβλητή ή η απόκριση). Επιπλέον μπορούμε να διαχειριστούμε τις επιδράσεις άλλων μεταβλητών οι οποίες είναι πέρα από τον έλεγχό μας, χρησιμοποιώντας τεχνικές μπλοκαρίσματος.

Πολλοί θεωρούν ότι τα πειράματα είναι πράγματα των επιστημόνων. Η ερώτηση λοιπόν είναι: Χρειαζόμαστε πειράματα για βιομηχανικές και υπηρεσιακές δραστηριότητες; Απάντηση σε αυτό έδωσε ο διευθυντής της Toyota Motor Company σε έναν εκ των Box G., Hunter J. & Hunter W. (2005). Η εν λόγω απάντηση λοιπόν είναι: *«Ένας μηχανικός ο οποίος δε γνωρίζει πειραματικό σχεδιασμό δεν είναι μηχανικός»*. Από αυτήν την άποψη τονίσαμε αρκετές φορές ότι η 6σ συνιστάται στην εφαρμογή της επιστημονικής μεθόδου για τη βελτίωση της διαδικασίας, και τα πειράματα αποτελούν ουσιαστικό μέρος της επιστημονικής μεθόδου της εργασίας.

Όταν όμως στηριζόμαστε στην ανάλυση των δεδομένων τα οποία συλλέγονται απευθείας κατά τη διάρκεια της κανονικής απόδοσης μιας διαδικασίας, υπάρχουν ορισμένοι κίνδυνοι οι οποίοι σχετίζονται με τα συμπεράσματα. Στην συνέχεια θα περιγράψουμε τους κινδύνους, τους οποίους πρέπει να λάβουμε υπόψη μας.

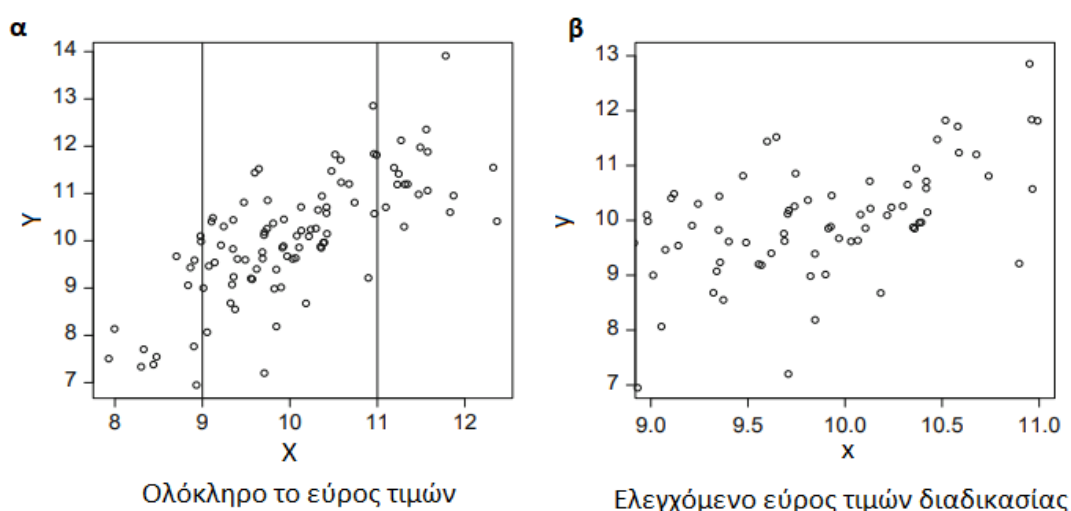
6.3.1. Μη-Συνεπή δεδομένα

Οι παράγοντες θορύβου όπως η γήρανση, οι τροποποιήσεις της διαδικασίας, οι επιδιορθώσεις και άλλες συνθήκες που ποικίλουν ως χρονικές αλλαγές γενικά δε

μετριοούνται μαζί με τις μεταβλητές ενδιαφέροντος μιας διαδικασίας. Έτσι τα δεδομένα που καταγράφονται αυτόματα μπορεί να μην είναι συνεπή και τα συμπεράσματα τα οποία βασίζονται στην ανάλυσή τους μπορεί να μην είναι σωστά.

6.3.2. Εύρος Τιμών της Μεταβλητής

Κατά τη μέτρηση της καθημερινής απόδοσης της διαδικασίας, υποτίθεται ότι οι μεταβλητές είναι υπό έλεγχο, δηλαδή είναι εντός των ορίων ελέγχου της διαδικασίας. Το γεγονός αυτό μπορεί να κρύψει την πραγματική σχέση μεταξύ των μεταβλητών, επειδή η ανεξάρτητη μεταβλητή (X) βρίσκεται εντός του εύρους λειτουργίας και η απόδοση της εκτός αυτού του εύρους είναι άγνωστη. Το Σχήμα 6.1. απεικονίζει ένα παράδειγμα αυτής της κατάστασης.

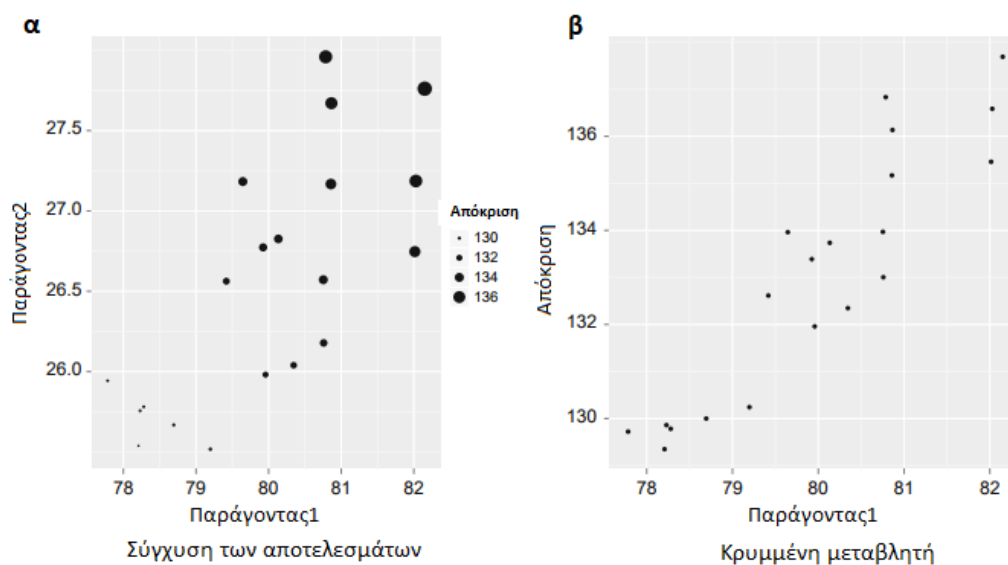


Σχήμα 6.1.: Κίνδυνος εύρους τιμών σε μελέτες παρατήρησης.

Στο παραπάνω Σχήμα παρουσιάζονται τα scatterplots δύο συναφή μεταβλητών. Η σχέση στο γράφημα (α) είναι σαφής. Στο (α) απεικονίζεται ολόκληρο το σύνολο των δεδομένων. Κατά τη διάρκεια της κανονικής απόδοσης της διαδικασίας, οι τιμές που μετριοούνται είναι αυτές εντός των ορίων (9 – 11), αλλά όταν σχεδιάσουμε αυτές τις εντός ορίων τιμές, γράφημα (β), η σχέση μεταξύ τους δεν είναι εμφανής.

6.3.3. Συσχετισμένες μεταβλητές

Ο τρίτος κίνδυνος ο οποίος πρέπει να ληφθεί υπόψη για να αποφευχθούν λανθασμένα συμπεράσματα είναι αυτός της ύπαρξης συσχετισμένων μεταβλητών. Όταν δύο ή περισσότερες επεξηγηματικές μεταβλητές συσχετίζονται, τα δεδομένα τα οποία συλλέγονται κατά την κανονική λειτουργία της διαδικασίας (χωρίς πειράματα) πιθανόν να οδηγήσουν σε λανθασμένα συμπεράσματα. Επομένως μπορεί να οδηγηθούμε σε δύο διαφορετικές, παραπλανητικές καταστάσεις. Η πρώτη είναι γνωστή και ως σύγχυση των αποτελεσμάτων και παράγεται όταν οι αποκρίσεις ποικίλουν υπό την έννοια των δύο συσχετισμένων παραγόντων. Επομένως δε γνωρίζουμε ποιος από τους δύο παράγοντες προκαλεί τη διακύμανση στην απόκριση. Η δεύτερη κατάσταση ονομάζεται κρυμμένη μεταβλητή και παράγεται όταν ο ένας από τους συσχετισμένους παράγοντες δεν έχει μετρηθεί, και έτσι μπορούμε να συμπεράνουμε ότι η μεταβολή οφείλεται στον μετρούμενο παράγοντα (όταν δεν υπάρχει σχέση αιτίου – αποτελέσματος). Στο Σχήμα 6.2. παρουσιάζεται ένα παράδειγμα των δύο αυτών καταστάσεων.



Σχήμα 6.2.: Κίνδυνοι συσχετισμένων μεταβλητών χωρίς πειραματισμό.

Παρατηρούμε ότι στο αριστερό διάγραμμα (α) έχουμε τρεις μεταβλητές: οι δυο επεξηγηματικές μεταβλητές αντιπροσωπεύονται αντίστοιχα στον x – άξονα και y – άξονα. Η απόκριση αντιπροσωπεύεται ως η περιοχή του κύκλου σε κάθε διασταύρωση Παράγοντα1/Παράγοντα2. Παρατηρήσετε ότι η απόκριση αυξάνεται

καθώς ένας από τους δύο παράγοντες αυξάνεται. Επομένως δεν γνωρίζουμε ποιος προκαλεί τη διακύμανση στην απόκριση. Στο δεξιό διάγραμμα (β) ο x – άξονας είναι μια από τις εξηγηματικές μεταβλητές (Παράγοντας1) και ο y – άξονας είναι η απόκριση. Φαίνεται ότι υπάρχει μια σχέση, αλλά πιθανώς η σχέση αιτίου – αποτελέσματος προέρχεται από τον κρυφό μεταβλητό παράγοντα2.

6.4. Στρατηγικές πειραματισμού

Πιο πάνω αναφερθήκαμε στους κινδύνους οι οποίοι υπάρχουν όταν στηριζόμαστε στην ανάλυση των δεδομένων τα οποία συλλέγονται απευθείας κατά τη διάρκεια της κανονικής απόδοσης μιας διαδικασίας. Μπορούμε να αντιμετωπίσουμε αυτούς τους κινδύνους μέσω πειραματισμού. Οι σχέσεις αιτίου – αποτελέσματος μπορούν να προσδιοριστούν μεταβάλλοντας τα επίπεδα των παραγόντων και μετρώντας τα *αποτελέσματα*. Θα εξηγήσουμε αναλυτικότερα τον υπολογισμό των αποτελεσμάτων χρησιμοποιώντας στατιστικές τεχνικές, όμως πριν από αυτό θα δούμε τις διάφορες στρατηγικές που μπορούμε να ακολουθήσουμε στα στάδια πριν τον πειραματισμό.

6.4.1. Στρατηγικές σχεδιασμού

Ο πειραματισμός συνήθως είναι δαπανηρός και έχουμε περιορισμένους πόρους για να πραγματοποιήσουμε τα πειράματά μας. Πρέπει λοιπόν να αποφασίσουμε πως θα τους χρησιμοποιήσουμε, καθώς όσο περισσότερες δοκιμές κάνουμε τόσο περισσότερα χρήματα ξοδεύουμε στο πείραμα. Σε αυτά που ακολουθούν, θα αναφερθούμε στις εξηγηματικές μεταβλητές ως *παράγοντες*, και στις διακριτές τιμές αυτών των μεταβλητών ως *επίπεδα*. Στην πραγματικότητα ο αριθμός των δοκιμών αυξάνεται εκθετικά καθώς προσθέτουμε περισσότερους παράγοντες ή επίπεδα.

Η απόφαση για τον τρόπο που θα διανεμηθεί ο προϋπολογισμός γίνεται στον σχεδιασμό του πειράματος. Έχουμε τη δυνατότητα να αποφασίσουμε μεταξύ πολλών στρατηγικών σχεδιασμού:

Χωρίς σχεδιασμό: όλοι συμφωνούν ότι αυτός είναι ένας κακός τρόπος διεξαγωγής ενός πειράματος. Ωστόσο συμβαίνει αρκετά συχνά. Αυτή είναι η προσέγγιση δοκιμής –και - σφάλματος. Δηλαδή διεξάγουμε το ένα πείραμα μετά το άλλο μέχρι να δαπανηθεί ο προϋπολογισμός, ακολουθώντας ορισμένα κριτήρια, τα οποία όμως συχνά βασίζονται στη διαίσθηση ή τις εικασίες μας και όχι στην επιστήμη ή την ανάλυση δεδομένων.

Σχεδιασμός όλων από την αρχή: μόλις καθοριστεί το πείραμα (ουσιαστικά οι παράγοντες των οποίων τα αποτελέσματα στην απόκριση πρέπει να αξιολογηθούν) ο συνολικός προϋπολογισμός κατανέμεται για την εκτέλεση όλων των πιθανών πειραμάτων, ορίζοντας διαφορετικά επίπεδα για κάθε παράγοντα εντός του εύρους που αποφάσισε ο αναλυτής (για παράδειγμα, μέσω παρατηρητικών μελετών, βιβλιογραφίας ή με κάποια άλλη μέθοδο). Το μειονέκτημα αυτής της στρατηγικής σχεδιασμού είναι ότι δε λαμβάνει υπόψη τα ενδιάμεσα αποτελέσματα και πιθανώς θα δαπανήσουμε χρήματα για πειράματα τα οποία δεν συνέλαβαν καθόλου στη γνώση που έχουμε για τη διαδικασία.

Διαδοχικός σχεδιασμός: αυτός είναι και ο 6ος τρόπος πειραματισμού: σχεδιασμός διαδοχικών πειραμάτων. Αρχικά σε πρώτο στάδιο, θα διεξαχθεί μεμονωμένος αριθμός δοκιμών για να ληφθούν αποφάσεις σχετικά με το επόμενο στάδιο. Σε αυτό το πρώτο στάδιο θα πρέπει να καταναλώνεται μέρος του προϋπολογισμού (μεταξύ του 25% και του 40% ανάλογα με τον ερευνητή). Το μεγαλύτερο μέρος του προϋπολογισμού θα πρέπει να δαπανηθεί σε επόμενα στάδια, λαμβάνοντας υπόψη τα προηγούμενα αποτελέσματα.

6.4.2. Επίπεδα παραγόντων και αναπαραγωγές

Στην στρατηγική διαδοχικού σχεδιασμού, που μόλις περιγράψαμε, τα επίπεδα των παραγόντων μπορούν να τροποποιηθούν προς την κατεύθυνση του στόχου του πειράματος. Για παράδειγμα, έστω ότι έχουμε μια συνεχή μεταβλητή (παράγοντα), η οποία έχει διακριτοποιηθεί σε δύο επίπεδα, χαμηλή (που συνήθως συμβολίζεται με το “-”) και υψηλή (που συνήθως συμβολίζεται με το “+”). Αν ενδιαφερόμαστε για την αύξηση της μεταβλητής απόκρισης, και ένα πρώτο πείραμα δείχνει ότι η

επίδραση ενός δεδομένου παράγοντα αυξάνει την απόκριση σε ένα υψηλό επίπεδο (+), τότε στο επόμενο πείραμα θα πρέπει να δοκιμάσουμε ένα υψηλότερο επίπεδο του παράγοντα για να βρούμε εάν η απόκριση βελτιώνει ακόμη περισσότερο την απόδοσή της και δεν ξοδεύει χρήματα προς άλλη κατεύθυνση, δηλαδή το χαμηλότερο επίπεδο (-). Καλό είναι να σημειωθεί ότι, οι παράγοντες και τα επίπεδα συνήθως αναπαρίστανται από ένα πίνακα σχεδιασμού, με μία στήλη για κάθε παράγοντα, μια γραμμή για κάθε διαφορετική πειραματική συνθήκη και ένα σύμβολο στα κελιά το οποίο αντιπροσωπεύει το επίπεδο του παράγοντα.

Στο σημείο αυτό θα ορίσουμε ένα πείραμα το οποίο θα χρησιμοποιείται σε ολόκληρο το κεφάλαιο. Είναι μια παραλλαγή του παραδείγματος που περιγράφουν οι Box G., & Jones S. (1992) στο βιβλίο τους.

Παράδειγμα 6.1.: (Ζύμη πίτσας)

Ένας κατασκευαστής τροφίμων αναζητά την καλύτερη συνταγή για το κύριο προϊόν του που είναι η ζύμη πίτσας, η οποία πωλείται στα καταστήματα της περιοχής. Για να ανακαλύψουν οι διαχειριστές αυτή τη μαγική φόρμουλα, αποφάσισαν να διεξάγουν ένα πείραμα για να καθορίσουν τα βέλτιστα επίπεδα των τριών βασικών συστατικών της ζύμης: αλεύρι, αλάτι και baking powder (σκόνη ψησίματος). Τα υπόλοιπα συστατικά δε λαμβάνονται υπόψη καθώς δεν επηρεάζουν την τελική γεύση της μαγειρεμένης πίτσας. Η γεύση του προϊόντος θα καθοριστεί από μια ομάδα εμπειρογνομόνων οι οποίοι θα δώσουν μια βαθμολογία σε κάθε συνταγή. Επομένως έχουμε τρεις παράγοντες, αλεύρι, αλάτι και baking powder, με δύο επίπεδα ο κάθε παράγοντας (- και +). Για να καταγράψουμε τα μετρημένα δεδομένα, μπορούμε να κατασκευάσουμε ένα φύλλο δεδομένων χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο κώδικα:

```

pizza.Design <- expand.grid(flour = gl(2,1,labels = c("-", "+")),
                             salt = gl(2,1,labels = c("-", "+")),
                             bakPow = gl(2,1,labels = c("-", "+")),
                             score = NA)

pizza.Design

```

Σημειώνεται ότι έχουμε 8 διαφορετικά πειράματα (συνταγές) που περιλαμβάνουν όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των τριών παραγόντων σε δύο επίπεδα.

	Αλεύρι	αλάτι	BakPow	score
1	-	-	-	NA
2	+	-	-	NA
3	-	+	-	NA
4	+	+	-	NA
5	-	-	+	NA
6	+	-	+	NA
7	-	+	+	NA
8	+	+	+	NA

Όταν έχουμε περισσότερους από ένα παράγοντες, ο διαδοχικός σχεδιασμός μπορεί να πραγματοποιηθεί αλλάζοντας ένα παράγοντα κάθε φορά, διατηρώντας τους άλλους σταθερούς. Αυτή είναι η λανθασμένη προσέγγιση, καθώς ενδέχεται να υπάρχουν αλληλεπιδράσεις μεταξύ των παραγόντων, δηλαδή, ο συνδυασμός των επιπέδων διαφορετικών παραγόντων μπορεί να επηρεάσει την απόκριση. Για παράδειγμα, όταν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ δύο παραγόντων, η επίδραση του ενός στην απόκριση εξαρτάται από την τιμή του άλλου. Επομένως για να ανακαλύψουμε τις κύριες επιδράσεις και αλληλεπιδράσεις, πρέπει να μεταβάλουμε περισσότερα από ένα επίπεδα τη φορά, πραγματοποιώντας πειράματα σε όλους τους πιθανούς συνδυασμούς.

Ωστόσο όπως σημειώσαμε και πιο πάνω, ο πειραματισμός είναι δαπανηρός και ο αριθμός των επιπέδων των υπό εξέταση παραγόντων αυξάνει τον αριθμό των

πειραμάτων. Αυτός είναι και ο λόγος που τα πειράματα 2 επιπέδων παράγοντα (δηλώνεται με 2^k) είναι τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα.

Τέλος για να μελετήσουμε τη διακύμανση υπό τις ίδιες πειραματικές συνθήκες, θα χρειαστεί να επαναλάβουμε το πείραμα κάνοντας περισσότερες από μια δοκιμές ανά συνδυασμό παραγόντων. Ο αριθμός των αναπαραγωγών εξαρτάται από διάφορες πτυχές (π.χ. προϋπολογισμός).

6.4.3. Προοδευτικό Πείραμα

Στην πράξη, ο τρόπος να προχωρήσουμε σε ένα 6σ πείραμα είναι μια προοδευτική (και συνήθως επαναληπτική) μέθοδος. Αρχικά, πραγματοποιώντας πειράματα ελέγχου, μελετάμε ένα σύνολο παραγόντων και απορρίπτουμε εκείνους οι οποίοι δεν επηρεάζουν την απόκριση και έτσι επιλέγουμε τους σημαντικούς. Εκ των προτέρων, μπορεί να πιστεύουμε ότι μερικοί από αυτούς τους παράγοντες δεν προκαλούν μεταβολή στην απόκριση, αλλά το όφελος τους από την συμπερίληψή τους στο πείραμα, είναι ότι θα έχουμε επιστημονικά στοιχεία. Επιπλέον, οι υποκειμενικές αλληλεπιδράσεις θα εξεταστούν κατάλληλα. Μόλις εντοπιστούν τα σημαντικά αποτελέσματα, διεξάγονται *πειράματα χαρακτηρισμού*, εκτιμώντας τα αποτελέσματα και μελετώντας τα κατάλοιπα για να μοντελοποιήσουμε την συνάρτηση $Y = f(X)$ που διέπει η διαδικασία. Τέλος τα πειράματα *βελτιστοποίησης* θα βοηθήσουν στην εύρεση της βέλτιστης λειτουργικής τιμής για τη διαδικασία μας.

6.4.4. Μοντέλα υποθέσεων

Στο σημείο αυτό κρίνεται χρήσιμο να υπενθυμίσουμε ότι βρισκόμαστε στη φάση βελτίωσης του κύκλου DMAIC. Έχουμε φτάσει μέχρι εδώ αφού καθορίσαμε τη διαδικασία και τους στόχους του πρότζεκτ. Επιπλέον έχουμε επιτύχει ένα κατάλληλο μετρητικό σύστημα (κεφάλαιο 4.1.) και γνωρίζουμε την ικανότητα της διαδικασίας (κεφάλαιο 4.3.) και το κόστος κακής ποιότητας (κεφάλαιο 3.2.1.).

Για να επικυρώσουμε τα αποτελέσματα, πρέπει να επαναλάβουμε την σπουδαιότητα της τυχαιοποίησης. Μόλις καθορίσουμε τους παράγοντες και τα

επίπεδα ενός πειράματος, οι μετρήσεις πρέπει να λαμβάνονται τυχαία. Επομένως, εάν έχουμε μια καθορισμένη λίστα με όλους τους συνδυασμούς των επιπέδων των παραγόντων, πριν ξεκινήσουμε τη μέτρηση της απόκρισης, πρέπει να ορίσουμε την τυχαία σειρά στην οποία πρόκειται να μετρηθούν.

Η κατάλληλη στατιστική τεχνική για την ανάλυση των πειραμάτων, είναι η ανάλυση διακύμανσης (ANOVA). Υπάρχουν δύο βασικές υποθέσεις σε αυτού του είδους το μοντέλο: (1) η κανονικότητα και η ανεξαρτησία των καταλοίπων και (2) η ομοσκεδαστικότητα (σταθερή διακύμανση). Μια συστηματική στρατηγική τυχαιοποίησης είναι χρήσιμη για την επίτευξη της πρώτης υπόθεσης, ενώ η δεύτερη υπόθεση μπορεί να ελεγχθεί χρησιμοποιώντας ελέγχους υποθέσεων.

Παράδειγμα 6.2. (Ζύμη πίτσας – συνέχεια) :

Μόλις σχεδιαστεί ένα πείραμα, θα προχωρήσουμε στην τυχαιοποίηση του. Μπορούμε να προσθέσουμε μια στήλη στον πίνακα σχεδιασμού, με την σειρά των δοκιμών να είναι τυχαία, και να ταξινομήσουμε τις γραμμές του πίνακα σχεδιασμού ακολουθώντας μια τυχαία σειρά με τον παρακάτω κώδικα:

```
pizza.Design$ord <- sample(1:8, 8)
pizza.Design[order(pizza.Design$ord),]
```

Έτσι λαμβάνουμε τον παρακάτω πίνακα σχεδιασμού:

	Αλεύρι	αλάτι	BakPow	score	ord
4	+	+	-	NA	1
8	+	+	+	NA	2
3	-	+	-	NA	3
6	+	-	+	NA	4
1	-	-	-	NA	5
7	-	+	+	NA	6
5	-	-	+	NA	7
2	+	-	-	NA	8

Κάθε φορά που επαναλαμβάνουμε την εντολή, παίρνουμε μια διαφορετική σειρά λόγω τυχαιοποίησης.

Τέλος μπορούμε να τυπώσουμε το πλαίσιο δεδομένων στα κατάλληλα μέσα για το μέλος της ομάδας που είναι υπεύθυνο για την καταγραφή της τιμής της απόκρισης (στην περίπτωση αυτή, οι βαθμολογίες που δίνουν οι εμπειρογνώμονες σε κάθε συνταγή).

6.5. 2^k Παραγοντικός Σχεδιασμός

Οι 2^k παραγοντικοί σχεδιασμοί είναι εκείνοι των οποίων ο αριθμός των παραγόντων που πρέπει να μελετηθούν είναι k , με όλους να έχουν 2 επίπεδα. Ο αριθμός των πειραμάτων που θα πρέπει να διενεργήσουμε για να αποκτήσουμε μια πλήρη αναπαραγωγή είναι ακριβώς η ισχύς 2^k . Αν θέλουμε n επαναλήψεις του πειράματος, τότε ο συνολικός αριθμός των πειραμάτων είναι $n \times 2^k$.

Χρησιμοποιώντας την ANOVA, θα εκτιμήσουμε την επίδραση κάθε παράγοντα και αλληλεπίδρασης, και θα αξιολογήσουμε ποιες από αυτές τις επιδράσεις είναι σημαντικές. Ας συμβολίσουμε τους παράγοντες με κεφαλαία γράμματα (A, B, ...). Οι κύριες επιδράσεις συνήθως αντιπροσωπεύονται με ελληνικά γράμματα (α, β, \dots) που αντιστοιχούν στα λατινικά γράμματα των παραγόντων και τα αποτελέσματα των αλληλεπιδράσεων με το συνδυασμό των γραμμάτων που αντιπροσωπεύουν τους παράγοντες των οποίων τα αποτελέσματα αλληλοεπιδρούν. Για παράδειγμα, για ένα 2^k πείραμα με τρεις παράγοντες και n αναπαραγωγές, το στατιστικό μοντέλο είναι:

$$Y_{ijkl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_k + (\alpha\beta)_{ij} + (\alpha\gamma)_{ik} + (\beta\gamma)_{kl} + (\alpha\beta\gamma)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}, \quad (6.1.)$$

$$i = 1,2; j = 1,2; k = 1,2; l = 1 \dots n,$$

$$\varepsilon_{ijkl} \sim N(0, \sigma) \text{ ανεξάρτητα}$$

Όπου,

μ είναι καθολικός μέσος όρος της απόκρισης,

α_i είναι η επίδραση του A παράγοντα στο i επίπεδο

β_j είναι η επίδραση του B παράγοντα στο j επίπεδο

γ_k είναι η επίδραση του C παράγοντα στο k επίπεδο

$(\alpha\beta)_{ij}$ είναι η επίδραση της αλληλεπίδρασης των παραγόντων A και B στα επίπεδα I και j αντίστοιχα

$(\beta\gamma)_{kl}$ είναι η επίδραση της αλληλεπίδρασης των παραγόντων B και C στα επίπεδα j και k αντίστοιχα

$(\alpha\beta\gamma)_{ijk}$ είναι η επίδραση της αλληλεπίδρασης των παραγόντων A, B και C στα επίπεδα I, j και k αντίστοιχα

ε_{ijkl} είναι το τυχαίο στοιχείο σφάλματος του μοντέλου

Παράδειγμα 6.3. (Ζύμη πίτσας – συνέχεια) :

Το πείραμα πραγματοποιείται με την προετοιμασία των πιτσών στο εργοστάσιο ακολουθώντας τις οδηγίες συσκευασίας, που είχαν δοκιμαστεί προηγουμένως ως οι καλύτερες συνθήκες για την προετοιμασία της πίτσας, δηλαδή «ψήστε την πίτσα για 9 λεπτά στο φούρνο στους 180° C».

Μετά από μια τυφλή δοκιμή (οι ειδικοί δε γνωρίζουν την συνταγή που χρησιμοποιείται για κάθε μεμονωμένη πίτσα), οι βαθμολογίες που έδωσαν οι εμπειρογνώμονες σε καθεμία από τις οκτώ (2^3) συνταγές σε κάθε αναπαραγωγή του πειράματος φαίνονται στον Πίνακα 6.1. Για να εκτελέσουμε ANOVA στην R, διατηρούμε τα δεδομένα σε ένα πλαίσιο δεδομένων όπου κάθε σειρά αντιστοιχεί σε ένα από τα μεμονωμένα πειράματα. Μπορούμε να το κάνουμε αυτό, συνδυάζοντας τον πίνακα σχεδιασμού που δημιουργήσαμε προηγουμένως και καθορίζοντας τις τιμές απόκρισης χρησιμοποιώντας ένα διάνυσμα ή οποιαδήποτε άλλη μέθοδο δεδομένων εισόδου που είναι διαθέσιμη στην R. Χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο κώδικα αποκτάμε ένα R *data.frame* με δεδομένα από τον Πίνακα 6.1. Το σύνολο δεδομένων *ss.data.doe1* είναι διαθέσιμο στο πακέτο SixSigma.

Πίνακας 6.1. : Βαθμολογίες συνταγών ζύμης πίτσας

ΑΑ	Αναπαραγωγή 1	Αναπαραγωγή 2
Συνταγή 1	5.33	5.70
Συνταγή 2	6.99	7.71
Συνταγή 3	4.23	5.13
Συνταγή 4	6.61	6.76
Συνταγή 5	2.26	2.79
Συνταγή 6	5.75	4.57
Συνταγή 7	3.26	2.48
Συνταγή 8	6.24	6.18

Ο κώδικας με τον οποίο λαμβάνουμε τα δεδομένα για τις πίτσες είναι:

```
ss.data.doe1 <- data.frame(rep1 = rep(1:2, each = 8),
                           rbind(pizza.Design[, -6], pizza.Design[, -6]))
ss.data.doe1$score <- c(5.33, 6.99, 4.23, 6.61, 2.26, 5.75, 3.26, 6.24,
                        5.7, 7.71, 5.13, 6.76, 2.79, 4.57, 2.48, 6.18)
```

	rep	Αλεύρι	αλάτι	BakPow	score	ord
1	1	-	-	-	5.33	2
2	1	+	-	-	6.99	4
3	1	-	+	-	4.23	8
4	1	+	+	-	6.61	5
5	1	-	-	+	2.26	1
6	1	+	-	+	5.75	6
7	1	-	+	+	3.26	3
8	1	+	+	+	6.24	7
9	2	-	-	-	5.70	2
10	2	+	-	-	7.71	4
11	2	-	+	-	5.13	8
12	2	+	+	-	6.76	5
13	2	-	-	+	2.79	1
14	2	+	-	+	4.57	6
15	2	-	+	+	2.48	3
16	2	+	+	+	6.18	7

Επιπλέον έχουμε τη δυνατότητα να πάρουμε το μέσο όρο για κάθε συνταγή:

```
aggregate(score~flour+salt+bakPow, FUN = mean, data = ss.data.doe1)
```

	Αλεύρι	αλάτι	BakPow	score
1	-	-	-	5.515
2	+	-	-	7.350
3	-	+	-	4.680
4	+	+	-	6.685
5	-	-	+	2.525
6	+	-	+	5.160
7	-	+	+	2.870
8	+	+	+	6.210

Η καλύτερη συνταγή φαίνεται να είναι αυτή με το υψηλό επίπεδο αλευριού και χαμηλό επίπεδο αλατιού και baking powder. Πρέπει όμως να εφαρμόσουμε ένα γραμμικό μοντέλο και να κάνουμε μια ANOVA για να βρούμε τα σημαντικά αποτελέσματα. Χρησιμοποιούμε την συνάρτηση lm για να φτιάξουμε το μοντέλο:

```
doe.model1 <- lm(score~flour+salt+bakPow+ flour*salt+flour*bakPow+ salt*bakPow+  
flour*salt*bakPow, data = ss.data.doe1)
```

Μόλις αποθηκεύσουμε το μοντέλο σε ένα πρότυπο αντικειμένου, αποκτάμε έναν πίνακα ANOVA, χρησιμοποιώντας την συνάρτηση summary:

```
summary(doe.model1)
```

```

Call:
lm(formula = score ~ flour+salt+bakPow+flour*salt+flour*bakPow+salt*bakPow
+flour*salt*bakPow, data = ss.data.doe1)

Residuals:
Min          1Q          Median          3Q          Max
-0.5900   -0.2888    0.0000    0.2888    0.5900

Coefficients:
              Estimate      Std. Error    t value    Pr(>|t|)
(Intercept)    5.5150      0.3434    16.061    2.27e-07 ***
flour+         1.8350      0.4856     3.779    0.005398 **
salt+         -0.8350      0.4856    -1.719    0.123843
bakPow+       -2.9900      0.4856    -6.157    0.000272 **
flour+:salt+   0.1700      0.6868     0.248    0.810725
flour+:bakPow+ 0.8000      0.6868     1.165    0.277620
salt+:bakPow+  1.1800      0.6868     1.718    0.124081
flour+:salt+:bakPow+ 0.5350    0.9712     0.551    0.596779
---
Signif. codes:  0 '***' 0.01 '**' 0.05 '*' 0.1 '.' 1

Residuals standard error: 0.4856 on 8 degrees of freedom
Multiple R – Squared: 0.9565, Adjusted R – Squared: 0.9185
F – statistic: 25.15 on 7 and 8 DF, p-value: 7.666e-05

```

Εξετάζοντας τα p – value, μπορούμε να καταλάβουμε, με υψηλό επίπεδο εμπιστοσύνης, ότι οι κύριες επιδράσεις των συστατικών αλεύρι και baking powder είναι σημαντικές, ενώ η επίδραση του αλατιού δεν είναι σημαντική. Επιπλέον οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των συστατικών είναι ασήμαντες.

Τώρα μπορούμε να απλοποιήσουμε το μοντέλο μας, εξαιρώντας τις μη σημαντικές επιδράσεις. Έτσι το μοντέλο με τις σημαντικές επιδράσεις είναι:

```

doe.model2 <- lm(score~flour+bakPow, data = ss.data.doe1)

summary(doe.model2)

```

```

Call:
lm(formula = score ~ flour+bakPow, data = ss.data.doe1)

Residuals:
Min          1Q          Median          3Q          Max
-0.84812    -0.54344     0.06062     0.44406     0.86938

Coefficients:
              Estimate      Std. Error    t value    Pr(>|t|)
(Intercept)    4.8306         0.2787      17.330    2.30e-10 ***
flour+         2.4538         0.3219       7.624    3.78e-06 ***
bakPow+       -1.8662         0.3219      -5.798    6.19e-05 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 '.' 1

Residuals standard error: 0.6437 on 13 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.8759, Adjusted R-squared: 0.8568
F-statistic: 45.87 on 2 and 13 DF, p-value: 1.288e-06

```

Επίσης μπορούμε να λάβουμε τους συντελεστές του μοντέλου με την συνάρτηση `coef`:

```

coef(doe.model2)

(Intercept)      flour+      bakPow+
4.830625        2.453750       -1.866250

```

Επομένως, το στατιστικό μοντέλο για το πείραμά μας είναι:

$$\widehat{score} = 4.8306 + 2.4538 \times \text{αλεύρι} - 1.8662 \times \text{bakPow}, (6.2.)$$

Στην παραπάνω εξίσωση οι πιθανές τιμές για τους παράγοντες αλεύρι και baking powder είναι 0 για το χαμηλό επίπεδο (-) και 1 για το υψηλό επίπεδο (+). Θα πρέπει να σημειωθεί ότι αυτή η κωδικοποίηση των παραγόντων είναι διαφορετική από εκείνη στην (6.1.) στην οποία οι πιθανές τιμές για τους συντελεστές είναι -1 για το χαμηλό επίπεδο και +1 για το υψηλό επίπεδο. Για τον υπολογισμό των επιδράσεων, οι συντελεστές πρέπει να διαιρεθούν κατά δύο και το αντίστοιχο μοντέλο (6.1.) θα είναι:

$$\widehat{score} = 5,1244 + 1.2269 \cdot \text{αλεύρι} - 0,9331 \cdot \text{bakPow} \quad (6.3.)$$

όπου 5,1244 είναι η συνολική μέση βαθμολογία. Για παράδειγμα, σε αυτή την σύνθεση του μοντέλου, το πέρασμα του αλευριού από το επίπεδο -1 στο +1 υποδηλώνει αύξηση της μέσης βαθμολογίας της συνταγής της τάξης του 2,4538.

Αν θέλουμε να τροποποιήσουμε το μοντέλο στο (6.3.) στο μοντέλο που δίνεται στο (6.2.), τότε το μόνο που πρέπει να κάνουμε είναι να υπολογίσουμε τους συντελεστές διπλασιάζοντας τις επιδράσεις και υπολογίζοντας τον σταθερό όρο ως:

$$\bar{y} - \alpha_1 - \beta_1 = 5,124375 - 1,226875 - (-0,933125) = 4,8306 \quad (6.4.)$$

```
as.numeric(mean(ss.data.doe1$score)- coef(doe.model2)[2]/2 - coef(doe.model2)[3]/2)
```

```
[1] 4,8306
```

Έτσι η συνταγή με υψηλό επίπεδο αλευριού και χαμηλό επίπεδο baking powder θα είναι η καλύτερη, ανεξάρτητα από το επίπεδο αλατιού (υψηλό ή χαμηλό). Η εκτιμώμενη βαθμολογία για αυτήν την συνταγή είναι:

$$4,3806 + 2,4538 \times 1 + (-1,8662) \times 0 = 7,284$$

```
coef(doe.model2)[1] + coef(doe.model2)[2]
```

```
(Intercept)
7.284375
```

Λαμβάνουμε το ίδιο αποτέλεσμα με χρήση του μοντέλου:

$$\hat{y} = 5.124375 + 1.2269 \times 1 + (-0.9331) \times (-1) = 7.2844$$

```
mean(ss.data.doe1$score)+coef(doe.model2)[2]/2*(1)+
coef(doe.model2)[3]/2*(-1)
```

```
flour+
7.284375
```

Μπορούμε να λάβουμε τις εκτιμήσεις για όλες τις πειραματικές συνθήκες (συμπεριλαμβανομένων και των αναπαραγωγών) χρησιμοποιώντας την συνάρτηση predict ως εξής:

```
predict(doe.model2)
```

1	2	3	4	5	6
4.830625	7.284375	4.830625	7.284375	2.964375	5.418125
7	8	9	10	11	12
2.964375	5.418125	4.830625	7.284375	4.830625	7.284375
13	14	15	16		
2.964375	5.418125	2.964375	5.418125		

Η εκτίμηση για τις πειραματικές συνθήκες 2, 4, 10, 12 είναι η ίδια (7,284375) καθώς ο παράγοντας αλάτι έχει απομακρυνθεί από το μοντέλο.

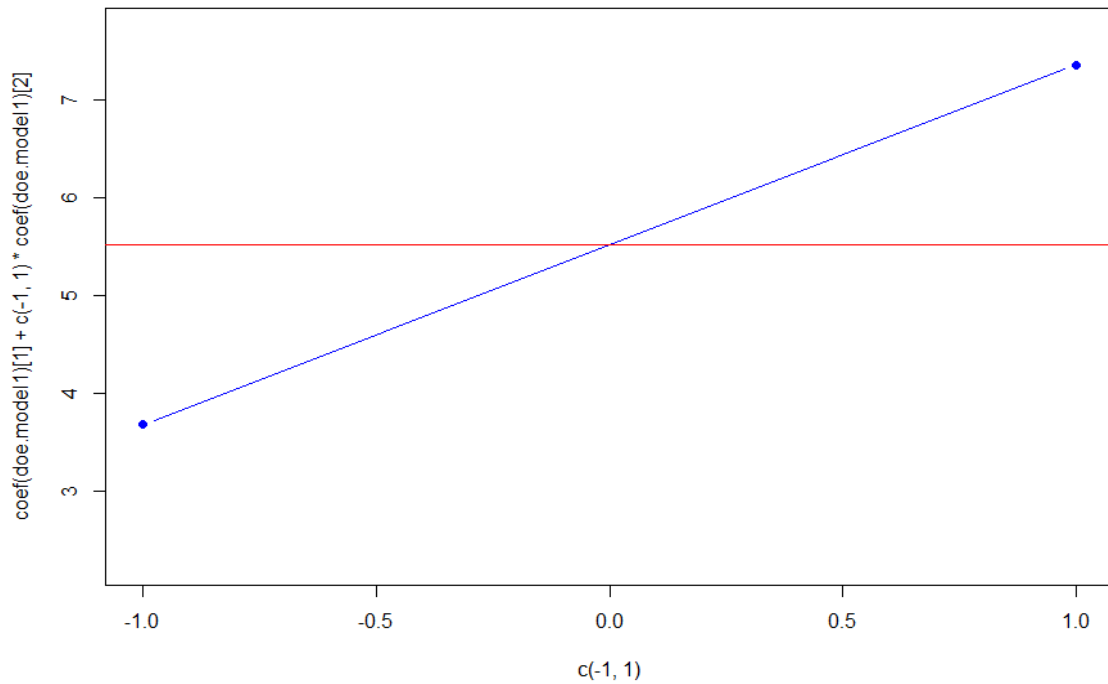
Επίσης έχουμε τη δυνατότητα να υπολογίσουμε ένα διάστημα εμπιστοσύνης για κάθε παράμετρο ως εξής:

```
confint(doe.model2)
```

	2.5%	97.5%
(Intercept)	4.228435	5.432815
flour+	1.758401	3.149099
bakPow+	-2.561599	-1.170901

Για να απεικονιστούν γραφικά τα κύρια αποτελέσματα, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την συνάρτηση `plot`. Έτσι σε αυτήν την περίπτωση, θα εμφανιστούν γραφικά σημεία και γραμμές που δείχνουν τα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, για να αναπαραστήσουμε τα αποτελέσματα για τον παράγοντα αλεύρι πληκτρολογούμε τις παρακάτω εντολές:

```
plot(c(-1, 1), ylim = range(ss.data.doe1$score),  
     coef(doe.model1)[1] + c(-1, 1)* coef(doe.model1)[2],  
     type = "b", pch = 16, col = "blue")  
abline(h=coef(doe.model1)[1], col = "red")
```

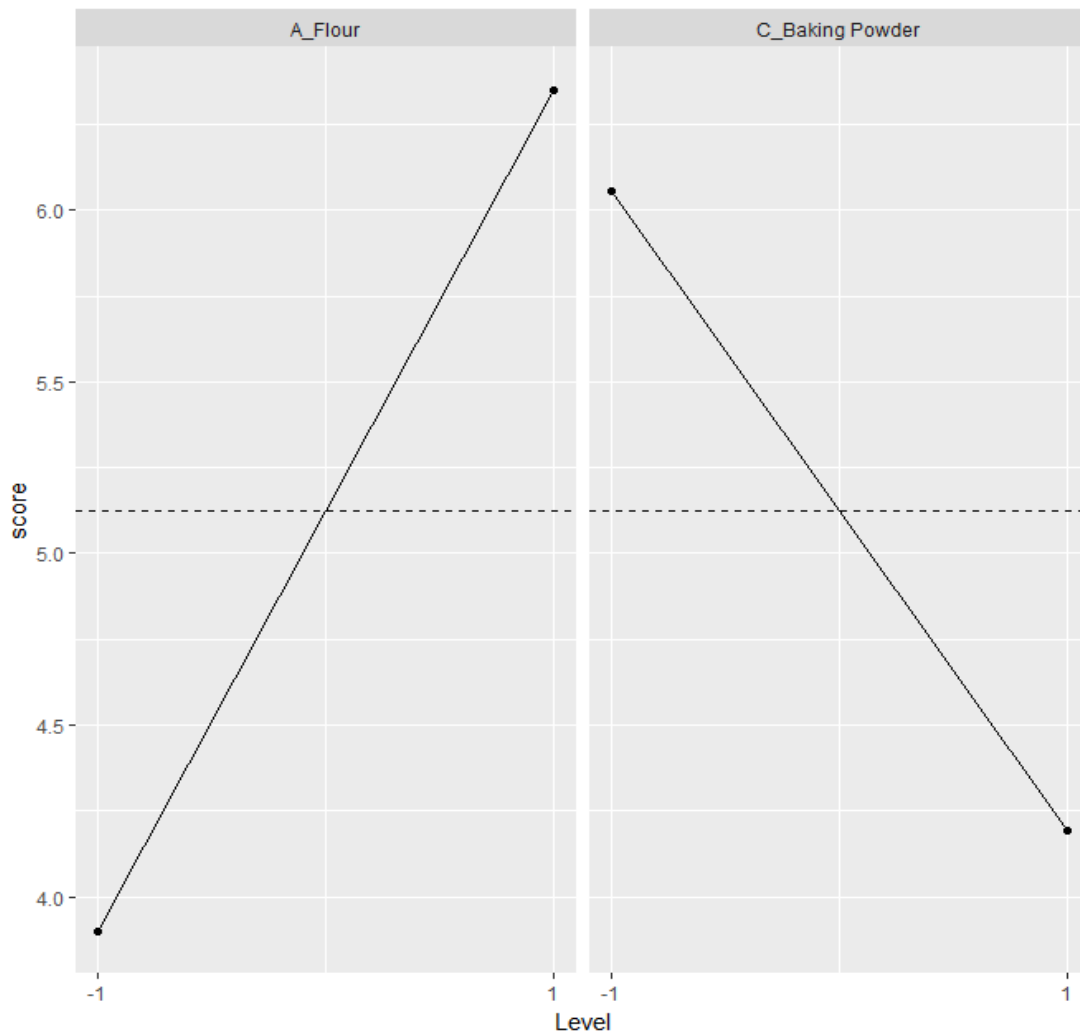


Σχήμα 6.3.: Διάγραμμα Απλής Επίδρασης.

Μπορούμε απλώς να σχεδιάσουμε γραμμές και σημεία τα οποία αντιπροσωπεύουν τους συντελεστές, μια οριζόντια γραμμή για το σταθερό όρο και τα σημεία που συνδέονται με τις επιδράσεις.

Μπορούμε επίσης να σχεδιάσουμε γραφήματα για να απεικονίσουμε τις επιδράσεις με το πακέτο ggplot2. Χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο κώδικα σχεδιάζουμε τις κύριες επιδράσεις των δύο παραγόντων στο ίδιο γράφημα:

```
prinEf <- data.frame(Factor = rep(c("A_Flour", "C_Baking Powder"), each = 2),
  Level = rep(c(-1, 1), 2),
  score = c(aggregate(score~flour, FUN = mean, data = ss.data.doe1)[,2],
    aggregate(score~bakPow, FUN = mean, data = ss.data.doe1)[,2]))
p <- ggplot(prinEf, aes(x=Level, y=score)) + geom_point() +
  geom_line()+ scale_x_continuous(breaks = c(-1, 1))+ facet_grid(. ~ Factor)+
  geom_abline (intercept = mean(ss.data.doe1$score),slope = 0, linetype = "dashed")
print(p)
```



Σχήμα 6.4.: Επιδράσεις παραγόντων για το παράδειγμα 6.3.

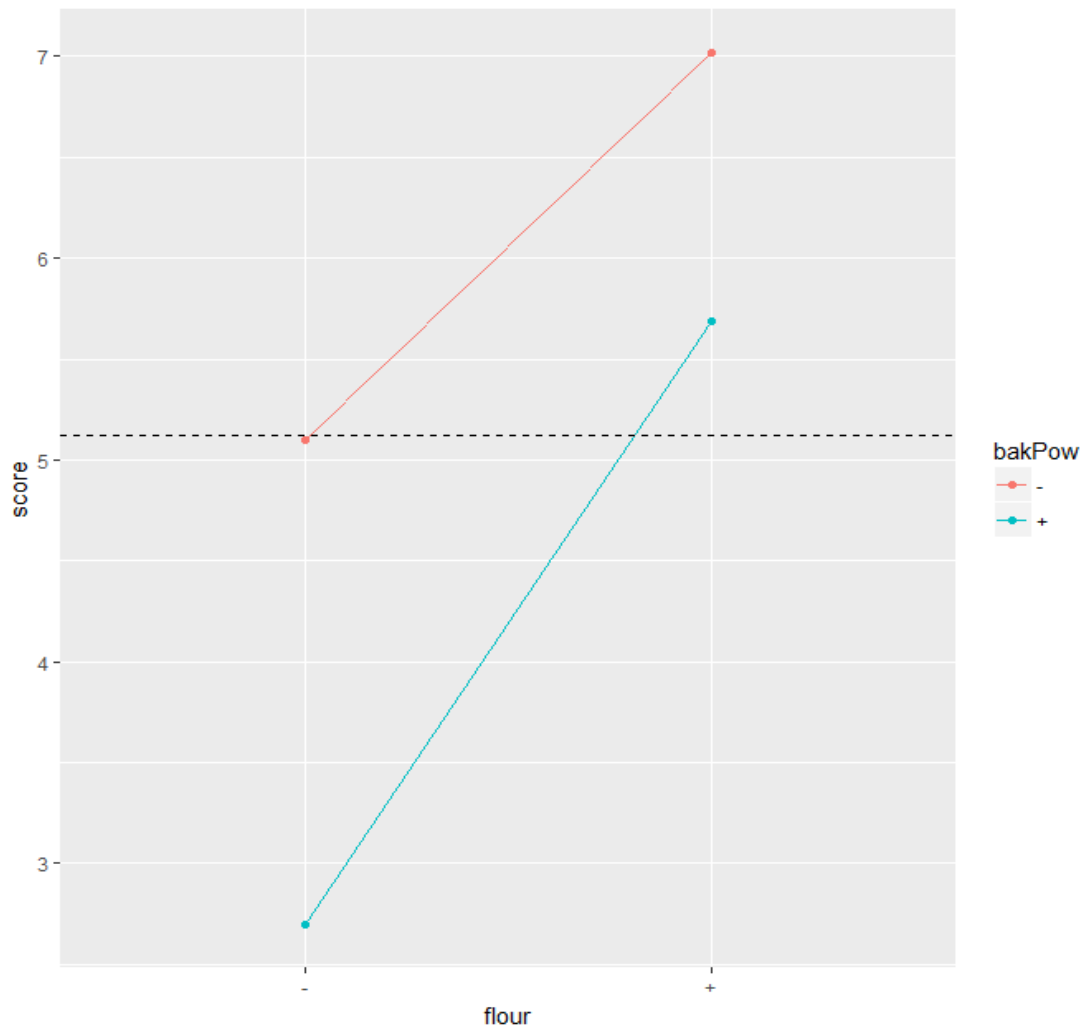
Παρατηρούμε ότι η επίδραση του παράγοντα αλευριού είναι θετική, ενώ η επίδραση του παράγοντα baking powder είναι αρνητική.

Για να λάβουμε τις επιδράσεις της αλληλεπίδρασης των παραγόντων πληκτρολογούμε τον παρακάτω κώδικα:

```
intEf<-aggregate(score~flour+bakPow,FUN=mean,data=ss.data.doe1)

p=ggplot(intEf,aes(x=flour,y=score,color=bakPow))+geom_point()+geom_line(aes(group=
bakPow))+geom_abline(intercept=mean(ss.data.doe1$score),slope=0,linetype="dashed",
color="black")

print(p)
```

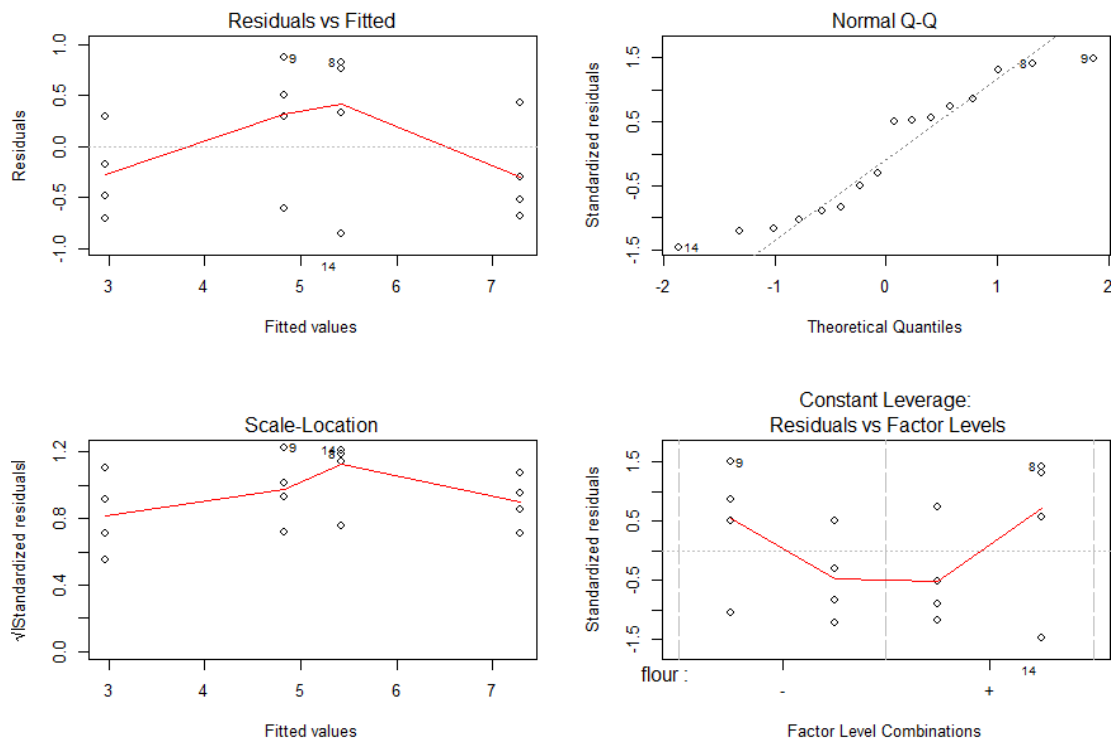



Σχήμα 6.5.: Διάγραμμα αλληλεπίδρασης μεταξύ των παραγόντων για το παράδειγμα 6.3.

Παρατηρούμε ότι οι γραμμές δε διασχίζουν η μία την άλλη, και επομένως μπορούμε να συμπεράνουμε ότι δεν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των δυο παραγόντων (αλεύρι και baking powder).

Τα διαγνωστικά του μοντέλου μπορούν να γίνουν με ανάλυση των καταλοίπων. Μπορούμε να σχεδιάσουμε τα πρότυπα γραφήματα για γραμμικά μοντέλα με τον παρακάτω κώδικα:

```
par(mfrow=c(2,2))
plot(doe.model2)
box("outer")
```



Σχήμα 6.6.: Διαγνωστικοί Έλεγχοι για το πείραμα πίτσας.

Από τα παραπάνω γραφήματα, δεν υπάρχουν σαφή μοτίβα στα κατάλοιπα. Από το γράφημα Normal Q – Q φαίνεται να υπάρχει μια απόκλιση από την υπόθεση της κανονικότητας των μετρήσεων.

Πέραν από τη γραφική εικόνα για την κανονικότητα των καταλοίπων χρειάζεται και ένας στατιστικός έλεγχος. Ας δοκιμάσουμε δύο από τους στατιστικούς ελέγχους, αυτούς των Shapiro – Wilk και Kolmogorov – Smirnov.

```
shapiro.test(residuals(doe.model2))
library(nortest)
lillie.test(residuals(doe.model2))
```

Τα αποτελέσματα των δύο αυτών τεστ κανονικότητας φαίνονται πιο κάτω.

<p>Shapiro – Wilk normality test</p> <p>data: residuals(doe.model2) W=0.90652, p – value =0.1023</p> <p>Lilliefors (Kolmogorov – Smirnov) normality test</p> <p>data: residuals(doe.model2) D =0.1891, p- value = 0.1313</p>
--

Από τα παραπάνω p – value τα οποία είναι μεγαλύτερα από οποιοδήποτε επίπεδο σημαντικότητας, δεν απορρίπτουμε την κανονικότητα των καταλοίπων.

6.6. Σχεδιασμός πειραμάτων για βελτίωση της διαδικασίας

Σε όλο το κεφάλαιο έχουμε περιγράψει ένα πλήρες σχεδιασμό πειραμάτων (DoE). Όμως η εκτέλεση των πειραμάτων μπορεί να μην είναι αρκετή για να βελτιώσει τη διαδικασία. Για παράδειγμα, ίσως δεν είναι όλα τα X της διαδικασίας αναγνωρίσιμα, ή κάποια Xs μπορεί να εξαρτώνται από εξωτερικές συνθήκες και επομένως δεν είναι κάτω υπό τον έλεγχο μας. Υπό αυτές τις περιστάσεις, μια δυνατότητα είναι να σχεδιάσουμε προϊόντα τα οποία είναι ισχυρά για το περιβάλλον (ισχυρός σχεδιασμός). Αυτό περιλαμβάνει την ενσωμάτωση παραγόντων θορύβου μέσα στο πείραμα. Αυτοί οι παράγοντες θορύβου είναι εκείνοι οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν τα CTQ χαρακτηριστικά, αλλά δε βρίσκονται κάτω από τον έλεγχό μας. Πρέπει λοιπόν να εντοπίσουμε όλους τους πιθανούς παράγοντες θορύβου, και από την άποψη αυτή, η επιχειρησιακή δομή που περιγράψαμε στο Κεφάλαιο 2 γίνεται κρίσιμη. Μπορούμε να λάβουμε πολύτιμες πληροφορίες σχετικά με αυτές τις εξωτερικές συνθήκες από τον ιδιοκτήτη της διαδικασίας.

Παράδειγμα 6.4. (Ζύμη πίτσας – συνέχεια) :

Μερικές εβδομάδες αργότερα, ο διαχειριστής των μέσων κοινωνικής δικτύωσης από το τμήμα μάρκετινγκ ενημέρωσε το διοικητικό συμβούλιο ότι κάποια κακά σχόλια είχαν συγκεντρωθεί από το μέσα κοινωνικής δικτύωσης (κυρίως Facebook και

Twitter). Τα σχόλια αυτά αφορούσαν μια κακή εμπειρία που είχαν οι καταναλωτές σχετικά με τη ζύμη της πίτσας. Η γεύση από τις πίτσες που παρασκευάστηκαν με αυτή τη ζύμη δεν ήταν ικανοποιητική.

Για να διερευνήσουν τους λόγους, αποφάσισαν να αντιμετωπίσουν το πρόβλημα από μια 6σ οπτική. Κατά τη διάρκεια της φάσης μέτρησης έγινε ακριβής εξακρίβωση των πιθανών παραγόντων που επηρεάζουν τη γεύση της πίτσας. Ο ιδιοκτήτης της διαδικασίας (το μέλος της ομάδας που ήρθε με τις οδηγίες προετοιμασίας) έδωσε μια σημαντική πληροφορία. Τόνισε ότι οι ακριβείς συνθήκες ψησίματος (θερμοκρασία =180° C και χρόνος =9 λεπτά) είναι κρίσιμες για την επίτευξη της επιθυμητής γεύσης για τους πελάτες.

Επιπλέον περαιτέρω έρευνα που έγινε σχετικά με το πως οι πελάτες ετοιμάζουν τις πίτσες, έδειξε ότι σχεδόν κανείς δεν ακολουθεί με ακρίβεια τις οδηγίες προετοιμασίας που δίνονται στην συσκευασία. Ως εκ τούτου, ένας νέος σχεδιασμός προτάθηκε από τον κάτοχο Μαύρης Ζώνης, για τη διεξαγωγή νέας έρευνας σχετικά με την συνταγή της ζύμης της πίτσας. Αποφάσισε να συμπεριλάβει δύο παράγοντες θορύβου με δύο επίπεδα: τον χρόνο (7 και 11 λεπτά, t- και t+ αντίστοιχα) και τη θερμοκρασία (160° C και 200° C, T- και T+ αντίστοιχα). Έτσι τώρα έχουμε ένα 2⁵ παραγοντικό σχεδιασμό, με τον ακόλουθο πίνακα σχεδιασμού:

```
pizza.Design2 <- expand.grid(flour = gl(2, 1, labels = c("-", "+")),
                             salt = gl(2, 1, labels = c("-", "+")), bakPow = gl(2, 1, labels = c("-", "+")),
                             temp = gl(2, 1, labels = c("-", "+")), time = gl(2, 1, labels = c("-", "+")),
                             score = NA)
pizza.Design2
```

	flour	salt	BakPow	temp	time	score
1	-	-	-	-	-	NA
2	+	-	-	-	-	NA
3	-	+	-	-	-	NA
4	+	+	-	-	-	NA
5	-	-	+	-	-	NA
6	+	-	+	-	-	NA
7	-	+	+	-	-	NA
8	+	+	+	-	-	NA
9	-	-	-	+	-	NA
10	+	-	-	+	-	NA
11	-	+	-	+	-	NA
12	+	+	-	+	-	NA
13	-	-	+	+	-	NA
14	+	-	+	+	-	NA
15	-	+	+	+	-	NA
16	+	+	+	+	-	NA
17	-	-	-	-	+	NA
18	+	-	-	-	+	NA
19	-	+	-	-	+	NA
20	+	+	-	-	+	NA
21	-	-	+	-	+	NA
22	+	-	+	-	+	NA
23	-	+	+	-	+	NA
24	+	+	+	-	+	NA
25	-	-	-	+	+	NA
26	+	-	-	+	+	NA
27	-	+	-	+	+	NA
28	+	+	-	+	+	NA
29	-	-	+	+	+	NA
30	+	-	+	+	+	NA
31	-	+	+	+	+	NA
32	+	+	+	+	+	NA

Η Μαύρη Ζώνη αποφάσισε να κάνει 2 αναπαραγωγές. Δεδομένου ότι πρέπει να εκτελέσουμε $2^5 = 32$ πειράματα ανά αναπαραγωγή, ελήφθησαν συνολικά 64 παρατηρήσεις. Στον Πίνακα 6.3. συνοψίζονται τα δεδομένα, δείχνοντας το μέσο αποτέλεσμα ανά συνδυασμό συνταγής και παράγοντα θορύβου. Αυτό το σύνολο δεδομένων παρέχεται στο πλαίσιο δεδομένων *ss.data.doe2* του πακέτου *SixSigma*.

Πίνακας 6.3.: Ισχυρά πειραματικά δεδομένα

AA	Αλεύρι	Αλάτι	BakPow	T180t9	T-t-	T+t-	T-t+	T+t+	Mean	Sd
1	-	-	-	5.52	3.67	5.12	4.18	3.90	4.48	0.64
2	+	-	-	7.35	3.37	4.52	5.05	2.94	4.65	0.98
3	-	+	-	4.68	0.96	4.91	5.29	1.17	3.40	2.34
4	+	+	-	6.69	3.59	5.89	5.62	3.87	5.13	1.18
5	-	-	+	2.52	1.92	3.05	1.73	1.70	2.18	0.64
6	+	-	+	5.16	3.14	5.01	5.54	2.90	4.35	1.32
7	-	+	+	2.87	1.21	1.86	3.04	1.31	2.06	0.84
8	+	+	+	6.21	5.80	6.11	5.98	5.96	6.01	0.12

Στον Πίνακα 6.3. υπάρχει η στήλη που αφορά τη μέση τιμή και η στήλη που αφορά την τυπική απόκλιση για κάθε πείραμα. Παρατηρήστε ότι η συνταγή με την καλύτερη μέση τιμή και τη μικρότερη μεταβλητότητα είναι αυτή με τους τρεις αρχικούς παράγοντες σε υψηλό επίπεδο. Αυτή η συνταγή είναι η καταλληλότερη λαμβάνοντας υπόψη τους παράγοντες θορύβου. Αυτό είναι ένα παράδειγμα για το πως η 6σ μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη βελτίωση διαδικασιών μέσω DoE.

6.7. Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό, παρουσιάσαμε μια σύντομη εισαγωγή στην στατιστική τεχνική η οποία είναι γνωστή ως Σχεδιασμός πειραμάτων (DoE). Αναφερθήκαμε σε κάποιες στρατηγικές σχεδιασμού και επισημάναμε την σημασία του πειραματισμού. Επικεντρωθήκαμε στο διαδοχικό σχεδιασμό και αναφερθήκαμε σε γενικές γραμμές σε μοντέλα υποθέσεων. Εν συνεχεία μιλήσαμε για 2^k σχεδιασμούς πειραμάτων, και στην πραγματικότητα καθ' όλη τη διάρκεια του κεφαλαίου χρησιμοποιήσαμε ένα 2^3 αντιπροσωπευτικό πείραμα. Το παράδειγμα αυτό μας δείχνει τον τρόπο χρήσης ενός DoE σε ένα 6σ πρότζεκτ. Ο 2^3 σχεδιασμός που χρησιμοποιείται σε όλο το κεφάλαιο μπορεί εύκολα να επεκταθεί σε ένα 2^k factorial σχεδιασμό πειραμάτων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7

ΧΡΗΣΗ ΤΗΣ R ΓΙΑ ΤΗ ΦΑΣΗ ΕΛΕΓΧΟΥ

7.1 Εισαγωγή

Η φάση ελέγχου είναι η τελευταία φάση του DMAIC κύκλου. Στη φάση αυτή, τα κέρδη που επιτεύχθηκαν στις προηγούμενες 4 φάσεις του κύκλου πρέπει να παρακολουθούνται και επιπλέον οι νέες συνθήκες διαδικασίας να τεκμηριώνονται. Επίσης, κρίνεται αναγκαίο να διασφαλιστεί η βιωσιμότητα της νέας δομής της διαδικασίας. Ουσιαστικά στο κεφάλαιο αυτό θα εισάγουμε στρατηγικές προστασίας από λάθη (mistake – proofing strategies) και διαγράμματα ελέγχου, τα οποία είναι το πιο αντιπροσωπευτικό εργαλείο ελέγχου.

7.2. Έλεγχος διαδικασίας με χρήση της R

Οι μηχανικοί συνήθως συνδέουν τον έλεγχο στατιστικών διαδικασιών (SPC) με ένα σύνολο διαγραμμάτων για να ελέγξουν εάν τα αποτελέσματα μιας διαδικασίας βρίσκονται εντός ή εκτός ελέγχου. Αυτή είναι η κλασική προσέγγιση του ελέγχου ποιότητας (QC) και συνιστάται στις διαδικασίες προσαρμογής μόνο όταν τα αποτελέσματά τους είναι εκτός ελέγχου. Σύμφωνα με αυτήν την προσέγγιση, ένας τυπικός τρόπος για να προχωρήσει κανείς είναι μέσω της επιθεώρησης. Ένας από τους στόχους του QC είναι η μείωση της ανάγκης για επιθεώρηση.

Ο 6σ έλεγχος διαδικασίας έχει ως στόχο να διατηρήσει τις βελτιώσεις που επιτεύχθηκαν σε όλα τα προηγούμενα στάδια του DMAIC κύκλου. Κάτω από το 6σ παράδειγμα, ο έλεγχος καθορίζεται από τις μεταβλητές που επηρεάζουν τα CTQ χαρακτηριστικά.

Στο κεφάλαιο αυτό με το οποίο ουσιαστικά ολοκληρώνεται και ο DMAIC κύκλος, θα εισάγουμε αρχικά μερικές έννοιες για τις στρατηγικές αποφυγής σφαλμάτων. Στην συνέχεια, θα εξηγήσουμε τα διαγράμματα ελέγχου και την αναπαράστασή τους με τη βοήθεια της R. Ολοκληρώνοντας θα δώσουμε και άλλα θέματα τα οποία σχετίζονται με τον SPC μαζί με τα διαθέσιμα πακέτα που περιέχει η R.

7.3. Στρατηγικές προστασίας από σφάλματα (Poka – Yoke)

Στην 6ο τα ζητήματα ελέγχου αρχίζουν στο στάδιο του σχεδιασμού του προϊόντος. Αυτό σημαίνει ότι οι διαδικασίες πρέπει να σχεδιάζονται για αυτοέλεγχο, αποφεύγοντας την επιρροή εξωτερικών παραγόντων όπως για παράδειγμα οι χειριστές, οι χρήστες και τα εργαλεία. Ο παλιός όρος που χρησιμοποιείται για τον ορισμό αυτής της προσέγγισης του ελέγχου είναι «χαζή – προστασία». Η πιο ευγενική έκφραση «προστασία σφάλματος» υιοθετήθηκε τελικά χρησιμοποιώντας τις ιαπωνικές λέξεις «roka» (λάθος) και «yoke» (προστασία).

Αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο οι τεχνικές αυτές είναι γνωστές ως roka – yoke μέθοδοι. Ένα κλασικό παράδειγμα σχεδιασμού προστασίας από σφάλμα είναι η 3,5 ίντσες δισκέτα, η οποία δε μπορεί να εισαχθεί ανάποδα.

Για να επιτευχθούν διαδικασίες προστασίας από σφάλμα, ο στόχος πρέπει να είναι μηδέν ελαττώματα. Αυτό σημαίνει ότι ο σχεδιασμός της διαδικασίας θα πρέπει να καθιστά αδύνατη τη δημιουργία σφάλματος. Γενικά όσο πιο σύνθετη είναι η μέθοδος roka – yoke τόσο υψηλότερο είναι το κόστος της.

Παράδειγμα 7.1. (Εργοστάσιο κατασκευής σανίδων)

Ένα εργοστάσιο κατασκευής σανίδων παράγει σανίδες διαφόρων μεγεθών. Τα κύρια CTQ χαρακτηριστικά της διαδικασίας είναι οι διαστάσεις, το πάχος και η πυκνότητα των σανίδων, σύμφωνα με τις απαιτήσεις των πελατών.

Ας υποθέσουμε ότι η διαδικασία αποτελείται από την απόκτηση πρώτων υλών, την κατασκευή σανίδων, την κοπή τους σε τεμάχια σύμφωνα με τις παραγγελίες ενός πελάτη και την συσκευασία και την παράδοσή τους. Ένα σημαντικό καθήκον, και πιθανή πηγή σφαλμάτων είναι η επιλογή του κατάλληλου τύπου σανίδας (πάχος και πυκνότητα) για κάθε παραγγελία πελάτη.

Ένα παράδειγμα μιας μεθόδου roka – yoke για αυτή τη διαδικασία είναι η αποθήκευση των σανίδων σε εμφανώς διαχωρισμένους και κλειδωμένους χώρους. Πριν ο χειριστής πάρει την σανίδα, πρέπει να εισαγάγει τα χαρακτηριστικά της σανίδας χρησιμοποιώντας το πληκτρολόγιο του υπολογιστή: τότε ο χώρος που

αντιστοιχεί στις προδιαγραφές της σανίδας ξεκλειδώνει αυτόματα. Με αυτόν τον τρόπο, θα είναι αδύνατο για τον χειριστή να πάρει λάθος σανίδα. Μπορούν επίσης να εφαρμοστούν επιπρόσθετες στρατηγικές, όπως για παράδειγμα, σχεδιασμός και χρήση συγκεκριμένων περιτυλιγμάτων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο με σανίδες που αντιστοιχούν στο πλάτος του περιτυλίγματος.

Από το παραπάνω παράδειγμα γίνεται αντιληπτό ότι σύμφωνα, με την προσέγγιση 6σ, μόλις εντοπίσουμε τα Xs της διαδικασίας (οι μεταβλητές που προκαλούν μεταβολή στα CTQ χαρακτηριστικά, δηλαδή τα Ys της διαδικασίας) το μόνο που πρέπει να κάνουμε είναι να ελέγξουμε τα Xs της διαδικασίας. Εάν η μεταβλητότητα των Xs, είναι υπό έλεγχο, τότε η διαδικασία θα εκτελεστεί σωστά, οδηγώντας στα απαιτούμενα Ys και επομένως σε προϊόντα υψηλής ποιότητας.

Παράδειγμα 7.2. (Εργοστάσιο κατασκευής σανίδων, συνέχεια)

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά (Y) των σανίδων είναι η πυκνότητά τους. Μετά από μια 6σ έρευνα, διαπιστώνεται ότι η σημαντικότερη μεταβλητή της διαδικασίας που επηρεάζει την πυκνότητα των σανίδων είναι η υγρασία της πρώτης ύλης. Επομένως τα γραφήματα ελέγχου της διαδικασίας θα γίνουν σύμφωνα με ένα διάγραμμα ελέγχου που μετρά την υγρασία των πρώτων υλών (X).

Έχουμε ήδη δει ότι κάτω από το πρότυπο 6σ τα Xs της διαδικασίας πρέπει να ελέγχονται. Σε ορισμένες περιπτώσεις, τα Ys της διαδικασίας μπορούν επίσης να παρακολουθούνται. Σε κάθε περίπτωση, η παρακολούθηση μόνο των Ys δεν αποτελεί επιλογή, επειδή αυτή η κατάσταση συνεπάγεται την άρνηση στο να μάθουμε για τα αίτια της κακής απόδοσης της διαδικασίας.

7.4. Βασικά στοιχεία διαγραμμάτων ελέγχου

Τα διαγράμματα ελέγχου είναι το εργαλείο το οποίο μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε ούτως ώστε να παρακολουθήσουμε την απόδοση των μεταβλητών που εμπλέκονται στις διαδικασίες. Στην συνέχεια περιγράφονται τα βασικά στοιχεία των διαγραμμάτων ελέγχου και η ερμηνεία τους. Για περισσότερες λεπτομέρειες σχετικά με τα διαγράμματα ελέγχου δείτε Montgomery (2005), Αντζουλάκος (2007), Ταγαράς (2001), Ryan (2011).

7.4.1. Το γράφημα

Ένα διάγραμμα ελέγχου είναι ένα δισδιάστατο γράφημα του οποίου ο Y – άξονας αντιπροσωπεύει τη μεταβλητή που παρακολουθούμε. Οι τιμές του χαρακτηριστικού σχεδιάζονται διαδοχικά με την σειρά με την οποία έχουν προκύψει. Ανάλογα με τον τύπο των δεδομένων που αναλύουμε, οι τιμές αυτές μπορούν να είναι μεμονωμένες ή μέσοι ομάδας. Επομένως, ο X – άξονας του διαγράμματος είναι ένας αριθμός αναγνώρισης του συνόλου των αντικειμένων που αξιολογούνται (μεμονωμένο στοιχείο ή ομάδα). Οι τιμές σχεδιάζονται ως σημεία και συνδέονται με ευθείες γραμμές για να προσδιορίσουν μοτίβα τα οποία εμφανίζουν σημαντικές αλλαγές στην απόδοση της διαδικασίας. Μαζί με την ακολουθία των παρατηρήσεων για τη μεταβλητή που παρακολουθούμε, σχεδιάζονται τρεις σημαντικές γραμμές:

- *Κεντρική γραμμή (CL):* Αυτός είναι ο μέσος όρος της κατανομής της στατιστικής συνάρτησης (μεταβλητή που μας ενδιαφέρει, απεικονιζόμενη στατιστική συνάρτηση). Οι τιμές που παρακολουθούνται ποικίλουν γύρω από αυτό το μέσο όρο.
- *Κατώτερο όριο ελέγχου (LCL):* Αυτή είναι η τιμή κάτω από την οποία είναι δεν πολύ πιθανό να εμφανιστεί μια τιμή της μεταβλητής.
- *Ανώτερο όριο ελέγχου (UCL):* Είναι το αντίστοιχο του *LCL* στην επάνω πλευρά του διαγράμματος. Δηλαδή πάνω από αυτή την τιμή δεν είναι πολύ πιθανό να εμφανιστεί μια τιμή της μεταβλητής. Το *LCL* και *UCL* είναι συμμετρικά εάν η κατανομή πιθανότητας της μεταβλητής είναι συμμετρική (π. χ. κανονική).

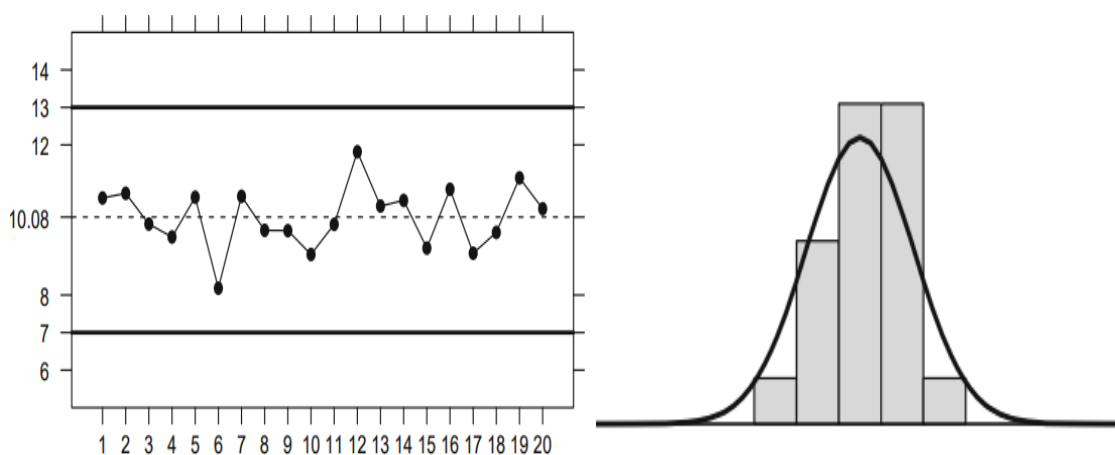
7.4.2. Ερμηνεία διαγραμμάτων

Ο πιο συνηθισμένος τρόπος κατασκευής διαγραμμάτων ελέγχου ακολουθεί μια προσέγγιση δύο φάσεων. Στη Φάση I χρησιμοποιώντας ένα προκαταρκτικό δείγμα εκτιμούμε αξιόπιστα όρια ελέγχου. Στη Φάση II, τα επακόλουθα δείγματα απεικονίζονται σε ένα διάγραμμα με τα όρια ελέγχου που εκτιμήθηκαν στη Φάση I. Για λόγους απλότητας, τα διαγράμματα που ακολουθούν σχεδιάζονται σε μια μόνο φάση, αν και στην πράξη θα πρέπει να γίνονται σε δύο φάσεις.

Όταν οι μεμονωμένες παρατηρήσεις του χαρακτηριστικού X βρίσκονται εντός των ορίων ελέγχου, η διαδικασία θα είναι υπό στατιστικό έλεγχο. Καλό είναι να διευκρινιστεί ότι τα όρια ελέγχου δεν είναι τα ίδια με τα όρια προδιαγραφών, δηλαδή τιμές πέραν από αυτά καθιστούν τη διαδικασία μη αποδεκτή από τον πελάτη.

Σύμφωνα με τους Cano et al. (2012), τα όρια ελέγχου υπολογίζονται ως ένα διάστημα εμπιστοσύνης που περιλαμβάνει ένα μεγάλο ποσοστό των τιμών. Τυπικά όρια ελέγχου είναι αυτά που είναι μεταξύ της μέσης τιμής και τριών τυπικών αποκλίσεων ($\mu \pm 3\sigma$). Για μια κανονική κατανομή πιθανότητας, τα όρια αυτά περιλαμβάνουν το 99.7% των δεδομένων. Έτσι υπάρχει μόνο μια πιθανότητα 0.3% μια μεμονωμένη παρατήρηση να βρεθεί εκτός των ορίων προδιαγραφής.

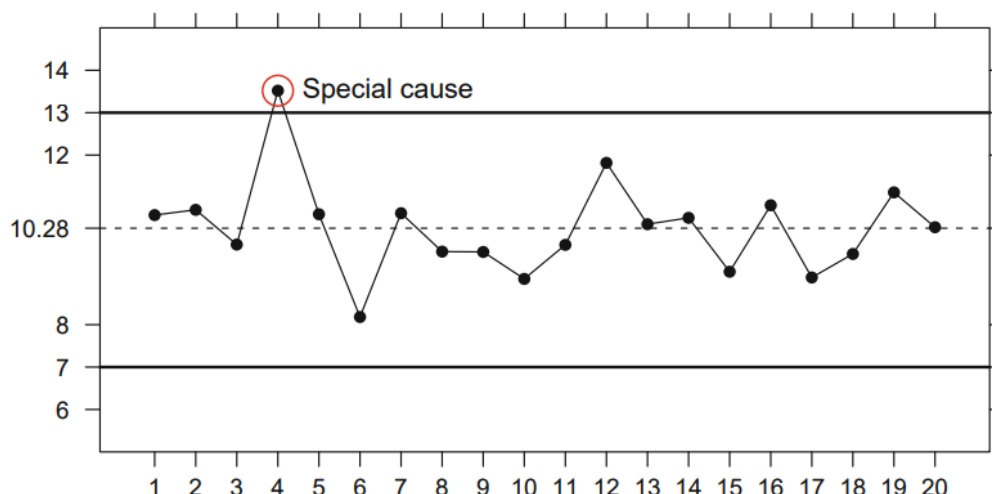
Επιπλέον ένα διάγραμμα ελέγχου προσθέτει πληροφορίες σχετικά με τη διακύμανση της διαδικασίας. Το Σχήμα 7.1. δείχνει το πως σχετίζονται οι δύο τύποι πληροφοριών.



Σχήμα 7.1. : Διαγράμματα ελέγχου έναντι κατανομή πιθανότητας.

Το διάγραμμα ελέγχου δείχνει την ακολουθία των παρατηρήσεων. Η διακύμανση γύρω από την κεντρική γραμμή παρέχει μια ιδέα για την κατανομή πιθανότητας.

Η μεταβολή του χαρακτηριστικού εντός των ορίων ελέγχου οφείλεται σε κοινά αίτια, ενώ η μεταβολή εκτός των ορίων ελέγχου οφείλεται σε ειδικές αιτίες. Πιο συγκεκριμένα, η εμφάνιση σημείων εκτός του διαστήματος [LCL, UCL] αποτελεί ένδειξη για την παρουσίας ειδικής αιτίας μεταβλητότητας στη διεργασία. Τα συνήθη αίτια (συνήθεις αιτίες μεταβλητότητας, *common causes of variation*) προκύπτουν από την εγγενή τυχαιότητα της διεργασίας και δε μπορούν να εξαλειφθούν. Οι ειδικές αιτίες (ειδικές αιτίες μεταβλητότητας, *assignable causes of variation*) που προκαλούν μεταβλητότητα δεν είναι συνέπεια της τυχαιότητας. Έτσι όταν ένα σημείο βρίσκεται εκτός των ορίων ελέγχου, πρέπει να προσδιοριστεί η (ειδική) αιτία και να εξαλειφθεί.

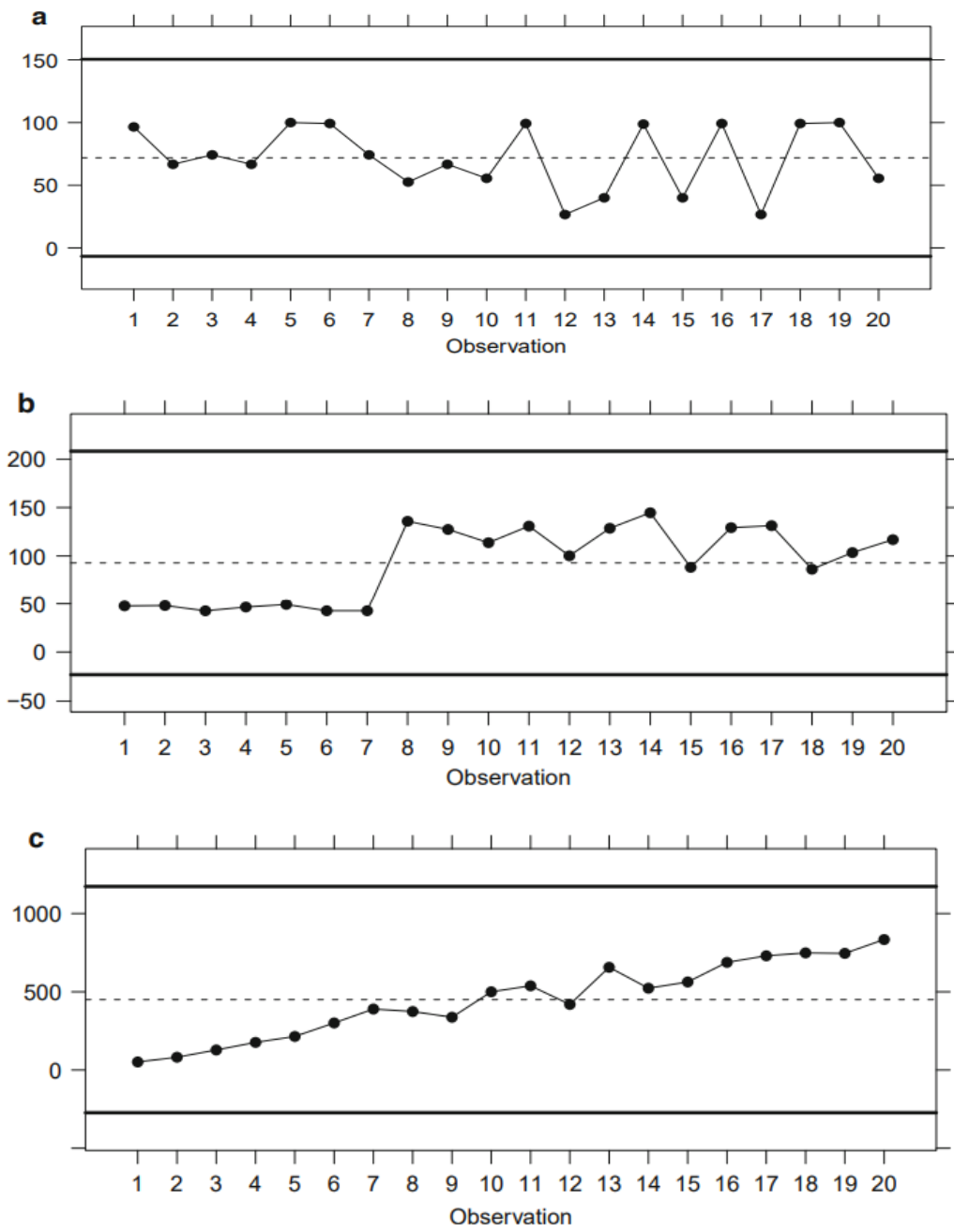


Σχήμα 7.2. : Προσδιορισμός ειδικών αιτιών μέσω μεμονωμένων σημείων.

Σημειώνεται ότι όταν ένα μεμονωμένο σημείο βρεθεί εκτός των ορίων ελέγχου, πρέπει να ξεκινήσει μια έρευνα της αιτίας για να εξαλειφθεί η ρίζα του προβλήματος.

Οι ειδικές αιτίες μπορούν επιπλέον να δημιουργήσουν άλλα προβλήματα σε μια διαδικασία. Μπορούν να αναγνωριστούν μέσω μοτίβων που παρουσιάζονται στο γράφημα. Διακρίνουμε τρία σημαντικά μοτίβα τα οποία μπορούν εύκολα να εντοπιστούν. Αυτά είναι η τάση, η μετατόπιση και η εποχικότητα (Σχήμα 7.3.). Άλλες ενδείξεις για εκτός ελέγχου διαδικασία είναι εννέα ή περισσότερα σημεία από τη μία

πλευρά της κεντρικής γραμμής, ή 2-από-3 σε απόσταση 2 τυπικών αποκλίσεων από την κεντρική γραμμή του διαγράμματος. Ενδεικτικά, έχουμε το παρακάτω Σχήμα 7.3.. Μπορούμε να προσδιορίσουμε διάφορα μοτίβα σε ένα διάγραμμα ελέγχου όπως π.χ. Κυκλικότητα/Περιοδικότητα (στο (α)), Μετατόπιση (στο (β)) και Τάση (στο (γ)).



Σχήμα 7.3.: Μοτίβα σε διαγράμματα ελέγχου.

7.4.3. Στρατηγική Δειγματοληψίας

Ορισμένες φορές τα παραγόμενα προϊόντα παρακολουθούνται και τα διαγράμματα ελέγχου παράγονται κατά το χρόνο εκτέλεσης. Αυτό είναι δυνατό μόνο για συγκεκριμένες διαδικασίες στις οποίες οι πληροφορίες που σχετίζονται με την απόδοση της διαδικασίας μπορούν αυτόματα να καταγραφούν μέσω ηλεκτρονικών μέσων, ή για εξαιρετικά αξιόπιστα προϊόντα τα οποία πρέπει να περάσουν ένα βήμα επαλήθευσης στο τέλος της γραμμής παραγωγής προτού παραδοθούν στον πελάτη.

Τις περισσότερες φορές τα διαγράμματα ελέγχου σχεδιάζονται χρησιμοποιώντας δείγματα δεδομένων. Όπως αναφέραμε και σε προηγούμενο κεφάλαιο η τυχαιοποίηση είναι εξαιρετικά σημαντική. Εξίσου απαραίτητη είναι η τυχαιοποίηση και όταν παρακολουθούνται οι διαδικασίες μέσω διαγραμμάτων ελέγχου. Επιπλέον ορισμένες ιδιαίτερες ανησυχίες πρέπει να ληφθούν υπόψη, όσο αφορά τη δειγματοληψία διαγραμμάτων ελέγχου:

- Όσο μεγαλύτερο είναι το μέγεθος του δείγματος, τόσο μεγαλύτερη είναι η πιθανότητα εντοπισμού σφάλματος. Στην κάτω πλευρά, συνήθως το κόστος που σχετίζεται με τον έλεγχο, αυξάνεται με το μέγεθος του δείγματος.
- Τα δείγματα συνήθως λαμβάνονται σε υποομάδες (π.χ. παρτίδες, ημέρες, τμήματα) και αυτές οι υποομάδες και το μέγεθός τους πρέπει να επιλέγονται ορθολογιστικά.
- Οι υποομάδες πρέπει να είναι ανεξάρτητες η μία από την άλλη.
- Πρέπει να επιτευχθεί ένας συμβιβασμός, μία αντιστάθμιση μεταξύ ανεξαρτησίας και ομοιογένειας στις μετρήσεις εντός των υποομάδων.
- Οι μετρήσεις πρέπει να καταγράφονται σε χρονολογική σειρά καθώς παράγονται.
- Το μέγεθος του δείγματος μπορεί να είναι μικρό όταν η διαδικασία είναι υπό έλεγχο και η ικανότητά του υπερβαίνει τις ελάχιστες απαιτήσεις.

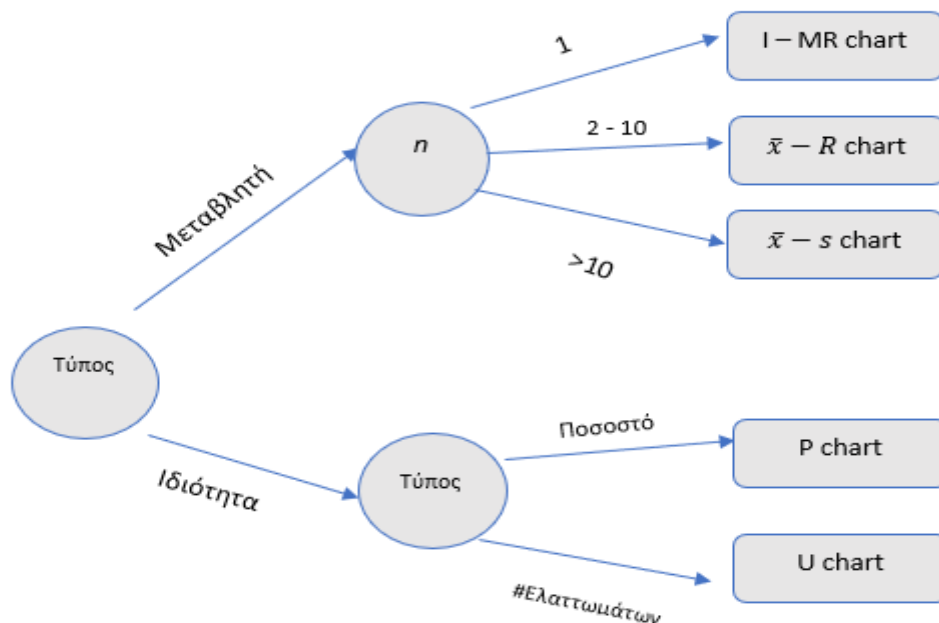
Επιγραμματικά, ένας γενικός κανόνας για την ορθολογιστική δειγματοληψία διαγράμματος ελέγχου, μπορεί να είναι «το δείγμα αντιπροσωπεύει την παραγωγή»

υπό κανονικές συνθήκες». Πρέπει να το έχουμε στο μυαλό μας αυτό κάθε φορά που σκοπεύουμε να αποκτήσουμε δείγμα για τον έλεγχο της διαδικασίας.

7.5. Σχεδιασμός Διαγραμμάτων Ελέγχου

Στο σημείο αυτό του κεφαλαίου θα περιγράψουμε τους κύριους τύπους διαγραμμάτων ελέγχου τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ανάλογα με τον τύπο της μεταβλητής που παρακολουθείται.

Για συνεχείς μεταβλητές, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε μεμονωμένα διαγράμματα και διαγράμματα κινούμενου – εύρους (I / MR chart) για πλήρη παρακολούθηση. Για τυχαία παρακολούθηση μέσω δειγμάτων χρησιμοποιούμε διαγράμματα μέσης τιμής και εύρους ($\bar{x} - R$ chart) ή διαγράμματα μέσης τιμής και τυπικής απόκλισης ($\bar{x} - s$ chart). Για τις διακριτές μεταβλητές (δεδομένα χαρακτηριστικών) μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε p – chart για να ελέγξουμε το ποσοστό των ελαττωματικών και το u – chart για τον έλεγχο του μέσου αριθμού ελαττωμάτων ανά μονάδα ελέγχου. Μια δομή απόφασης που συνοψίζει τις διάφορες επιλογές παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.4.



Σχήμα 7.4. :Δομή απόφασης για τα βασικά διαγράμματα ελέγχου διαδικασίας.

Αρχικά ελέγχουμε τον τύπο της μεταβλητής. Εάν πρόκειται για συνεχή μεταβλητή τότε το γράφημα εξαρτάται από το μέγεθος του δείγματος (n). Αν πρόκειται για μεταβλητή ιδιοτήτων, το γράφημα εξαρτάται από τι θέλουμε να παρακολουθήσουμε (ποσοστό ελαττωματικών ή αριθμό ελαττωμάτων ανά μονάδα ελέγχου).

Η R μέσω των πακέτων *qcc*, *IQCC* και *qAnalyst* μας παρέχει τη δυνατότητα να σχεδιάσουμε διάφορους τύπους διαγραμμάτων ελέγχου. Στην παρούσα διπλωματική θα χρησιμοποιήσουμε κάποιες συναρτήσεις που περιέχουν τα πακέτα αυτά, για να σχεδιάσουμε τα γραφήματα ελέγχου που θα χρειαστούμε. Παρόλα αυτά, θα δώσουμε τους τύπους των γραμμών ελέγχου (κεντρική γραμμή, ανώτερο όριο και κατώτερο όριο) έτσι ώστε αν θέλουμε να μπορέσουμε να σχεδιάσουμε τα δικά μας διαγράμματα ελέγχου χρησιμοποιώντας τις γραφικές συναρτήσεις που περιέχονται στα πακέτα της R, *graphics*, *lattice*, *ggplot2* και πολλά άλλα, απλώς σχεδιάζοντας σημεία και γραμμές και προσθέτοντας γραμμές ελέγχου (CI, UCL, LCL). Με αυτόν τον τρόπο μπορούμε να προσαρμόσουμε οποιοδήποτε χαρακτηριστικό στο διάγραμμα ελέγχου.

7.5.1. Συμβολισμοί για τον Υπολογισμό των Ορίων Ελέγχου

Για να μπορέσουμε να σχεδιάσουμε ένα διάγραμμα ελέγχου πρέπει να υπολογίσουμε τις τιμές για την κεντρική γραμμή (CL) και τις τιμές για το ανώτερο και κατώτερο όριο ελέγχου (UCL και LCL). Θα ακολουθήσουμε τους ακόλουθους συμβολισμούς:

- n : Αριθμός στοιχείων δειγματοληψίας σε κάθε ομάδα (ίσα μεγέθη δείγματος)
- k : Αριθμός ομάδων
- n_i : Αριθμός στοιχείων δειγματοληψίας στην i ομάδα (άνισα μεγέθη δείγματος)
- D_i : Αριθμός ελαττωματικών στην i ομάδα
- $\bar{\bar{X}}$: Συνολικός μέσος όρος δείγματος
- \bar{X}_i : Μέσος όρος της i -οστής ομάδας
- \bar{S} : Μέση τυπική απόκλιση

- s_i : Τυπική απόκλιση της i ομάδας
- d_2 : Μέση τιμή της τυχαίας μεταβλητής $W = \frac{R}{\sigma}$
- d_3 : Τυπική απόκλιση της τυχαίας μεταβλητής $W = \frac{R}{\sigma}$
- c_4 : Σταθερά για την (αμερόληπτη) εκτίμηση του σ ως $\hat{\sigma} = \frac{\bar{s}}{c_4}$

Σε βιβλία (π.χ. Montgomery (2005), Grant and Leavenworth (2000)) υπάρχουν πίνακες με τις σταθερές d_2 , d_3 , c_4 . Οι πίνακες αυτοί είναι χρήσιμοι όταν κατασκευάζουμε στο χέρι αυτά τα διαγράμματα, αλλά δεν έχουν κανένα νόημα όταν χρησιμοποιούνται υπολογιστές. Στην πραγματικότητα, όλες αυτές οι σταθερές μπορούν να ληφθούν εύκολα χρησιμοποιώντας την R. Ειδικότερα οι συναρτήσεις `ss.cc.getc4`, `ss.cc.getd2` και `ss.getd3` επιστρέφουν τις τιμές των c_4 , d_2 και d_3 αντίστοιχα παίρνοντας ως μέγεθος δείγματος n .

7.5.2. Διαγράμματα ελέγχου για μεταβλητές

Τα διαγράμματα που θα περιγράψουμε σε αυτό το κομμάτι αφορούν τις συνεχείς μεταβλητές. Παρακολουθούν κατάλληλα τέτοιου είδους μεταβλητές. Για κάθε ομάδα διαγράμματος ελέγχου σχεδιάζονται δύο γραφήματα, ένα για την παρακολούθηση της κεντρικής τάσης και ένα για την παρακολούθηση της διακύμανσης.

Μεμονωμένα διαγράμματα / διαγράμματα κινούμενου εύρους (I/MR chart)

Υπάρχουν φορές που δεν έχουμε ομάδες μετρήσεων για παρακολούθηση, αλλά μεμονωμένα στοιχεία. Αυτό συμβαίνει καθώς δεν υπάρχει νόημα να υπάρχουν ομάδες ή γιατί κάθε στοιχείο παρακολουθείται αυτόματα. Έτσι η κεντρική γραμμή και τα όρια ελέγχου για το μεμονωμένο διάγραμμα ελέγχου υπολογίζονται ως εξής:

Άνω Όριο	$\bar{X} + 3 \frac{\overline{MR}}{d_2}$
Κεντρική Γραμμή	$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n}, \quad i = 1, \dots, n$
Κάτω Όριο	$\bar{X} - 3 \frac{\overline{MR}}{d_2}$

Όπου, \overline{MR} είναι το μέσο κινούμενο εύρος το οποίο υπολογίζεται ως εξής:

$$\overline{MR} = \frac{\sum_{i=2}^k MR_i}{k-1},$$

$$\text{όπου, } MR_i = |x_{i+1} - x_i|, i = 1, 2, \dots$$

Η κεντρική γραμμή και τα όρια ελέγχου για το διάγραμμα κινούμενου εύρους είναι:

Άνω Όριο	$\overline{MR} \times \left(1 + \frac{3d_3}{d_2}\right)$
Κεντρική Γραμμή	\overline{MR}
Κάτω Όριο	$\overline{MR} \times \left(1 - \frac{3d_3}{d_2}\right)$

Εάν το κατώτερο όριο ελέγχου (LCL) έχει αρνητική τιμή, τότε το LCL λαμβάνεται ως μηδέν. Οι σταθερές d_2 και d_3 υπολογίζονται για $n = 2$, καθώς υπολογίζουμε το εύρος μεταξύ δύο διαδοχικών στοιχείων.

Παράδειγμα 7.3. (Εργοστάσιο κατασκευής σανίδων, συνέχεια)

Ένα σχέδιο ελέγχου έχει σχεδιαστεί για να διατηρήσει τις βελτιώσεις που επιτεύχθηκαν μέσω προηγούμενων 6σ πρότζεκτ. Ο κάτοχος Μαύρης Ζώνης θέλει να εκτιμήσει την ολοκλήρωση πολλών πρώτων υλών όπως αυτές λαμβάνονται στο

εργοστάσιο. Κάθε παρτίδα έχει 30 αντικείμενα. Θέλουμε να ελέγξουμε τις μεμονωμένες τιμές, το μέγεθος του δείγματος είναι $n = 1$ και υπάρχουν $k = 30$ ομάδες. Το πλαίσιο δεδομένων `ss.data.pb1` που περιέχεται στο πακέτο *SixSigma* περιέχει τις τιμές υγρασίας για κάθε παρτίδα.

Το πακέτο `qcc` δημιουργεί διαγράμματα ελέγχου. Μόλις δημιουργηθεί το αντικείμενο `qcc`, μπορούμε να εκτελέσουμε δύο ενέργειες πάνω του, μια περίληψη και μια γραφική παράσταση, χρησιμοποιώντας τις γενικές συναρτήσεις `summary` και `plot` αντίστοιχα. Προετοιμάζουμε τα αντικείμενα δεδομένων και αποκτάμε ένα αποτέλεσμα κειμένου με τη γενική συνάρτηση `summary`:

```
require(qcc)

pb.groups.one <- with(ss.data.pb1, qcc.groups(pb.humidity, pb.group))

pb.xbar.one <- qcc(pb.groups.one, type = "xbar.one")

summary(pb.xbar.one)
```

```
Call:
qcc(data = pb.groups.one, type = "xbar.one")

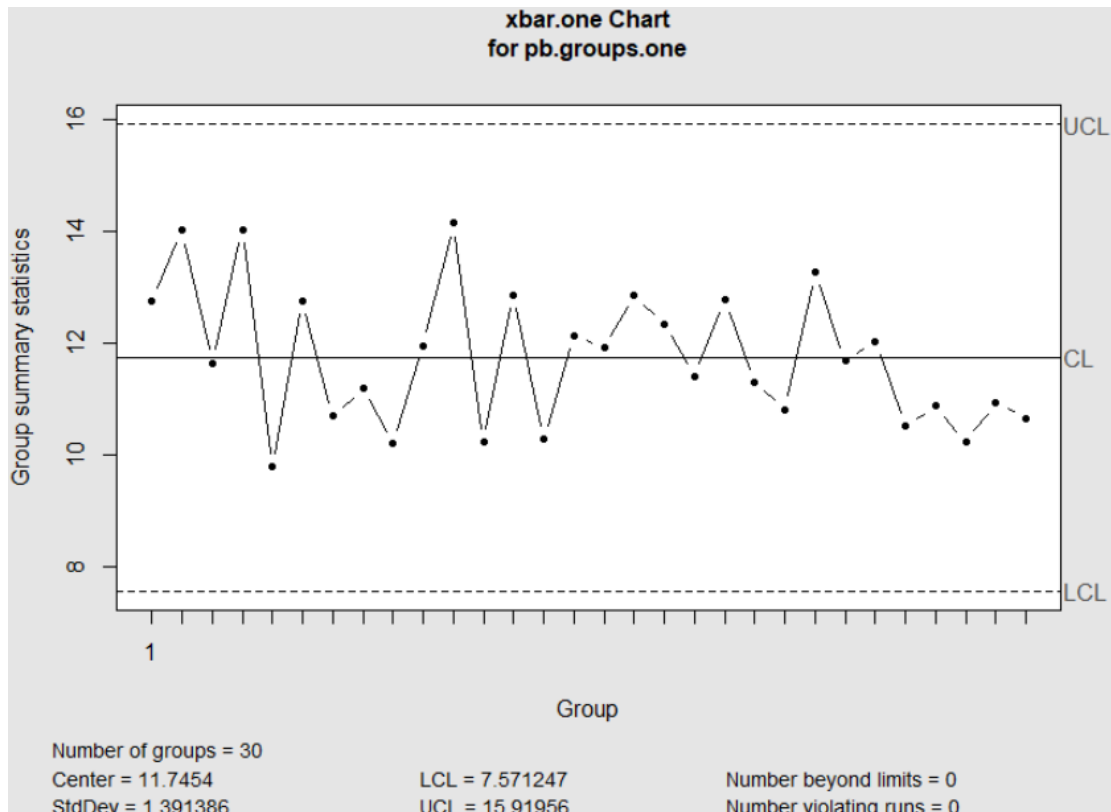
Xbar.one chart for pb.groups.one

Summary of group statistics:
Min.      1st Qu.    Median      Mean      3rd Qu.    Max
9.783    10.720    11.670    11.750    12.760    14.150

Group sample size:    30
Number of groups:    30
Center of group statistics:    11.7454
Standard deviation:    1.391386

Control limits:
      LCL              UCL
      7.571247        15.91956
```

Το διάγραμμα ελέγχου που προκύπτει παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.5.:



Σχήμα 7.5: Διάγραμμα Ελέγχου Μεμονωμένων Τιμών.

Όπως παρατηρούμε δεν υπάρχει κανένα μεμονωμένο σημείο εκτός των ορίων ελέγχου ούτε κάποιο ύποπτο μοτίβο που να οδηγεί σε υπόθεση εκτός ελέγχου διαδικασίας. Σχεδιάζονται 30 μεμονωμένες παρατηρήσεις με την κεντρική γραμμή να βρίσκεται στο 11,7454 και το άνω και κάτω όριο ελέγχου στις τιμές 7,571247 και 15,91956 αντίστοιχα. Η τυπική απόκλιση αντιστοιχεί στην τιμή 1,391386.

Για τη Φάση II, μπορούμε να καταχωρήσουμε την κεντρική γραμμή και τα όρια ελέγχου στην συνάρτηση qcc ως ορίσματα. Αυτό γίνεται ως εξής:

```
plot(qcc(data = pb.groups.one, type = "xbar.one", center = pb.xbar.one$center,
limits = pb.xbar.one$limits))
```

Καθώς χρησιμοποιήσαμε το ίδιο σύνολο δεδομένων με αυτό που χρησιμοποιήσαμε και προηγουμένως για τα όρια ελέγχου το γράφημα που προκύπτει είναι το ίδιο με αυτό που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.5. Για να σχεδιάσουμε ένα γράφημα με τα ίδια όρια ελέγχου και νέα δεδομένα που προκύπτουν από τη

διαδικασία, το μόνο που πρέπει να κάνουμε είναι να αλλάξουμε το όρισμα δεδομένων.

Στο πακέτο *qcc* δεν υπάρχει επιλογή για διάγραμμα κινούμενου εύρους. Για να επιτύχουμε ένα τέτοιο διάγραμμα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε το πακέτο *qAnalyst*⁴. Όπως και με το πακέτο *qcc*, χρειάζεται να δημιουργήσουμε ένα *src* αντικείμενο και στην συνέχεια να καλέσουμε τις γενικές συναρτήσεις. Για περισσότερες λεπτομέρειες, δείτε Cano et al. (2011).

$\bar{X} - R$ διάγραμμα

Η κεντρική γραμμή και τα όρια ελέγχου για το \bar{x} διάγραμμα ελέγχου υπολογίζονται ως εξής:

Ανω Όριο	$\bar{\bar{X}} + \bar{R} \times \frac{3}{d_2\sqrt{n}}$
Κεντρική Γραμμή	$\bar{\bar{X}}$
Κάτω Όριο	$\bar{\bar{X}} - \bar{R} \times \frac{3}{d_2\sqrt{n}}$

Όπου \bar{R} είναι το μέσο εύρος και υπολογίζονται ως:

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^k R_i}{k}, R_i = \max\{x \in X_i\} - \min\{x \in X_i\}$$

⁴ Το πακέτο *qAnalyst* έχει αφαιρεθεί από τον επίσημο κατάλογο (CRAN) των πακέτων για την R. Κυκλοφορούν οι προηγούμενες εκδόσεις μέχρι το 2011, οι οποίες μπορούν να εγκατασταθούν manually από τον ενδιαφερόμενο αναγνώστη.

Οι ακόλουθοι τύποι είναι για τον R διάγραμμα ελέγχου.

Άνω Όριο	$\bar{R} \times \left(1 + \frac{3d_3}{d_2}\right)$
Κεντρική Γραμμή	\bar{R}
Κάτω Όριο	$\bar{R} \times \left(1 - \frac{3d_3}{d_2}\right)$

Το κατώτερο όριο ελέγχου, LCL, ισούται με μηδέν όταν κατά τον υπολογισμό προκύψει αρνητική τιμή. Οι σταθερές d_2 και d_3 υπολογίζονται χρησιμοποιώντας το μέγεθος των ομάδων.

Παράδειγμα 7.4. (Εργοστάσιο κατασκευής σανίδων, συνέχεια)

Στη γραμμή παραγωγής, η υγρασία των πρώτων υλών μετρίεται και πάλι πριν αρχίσει η κατασκευή της σανίδας. Λαμβάνονται 5 δείγματα από κάθε παρτίδα και ο συνολικός αριθμός παρτίδων είναι 20. Τα συγκεκριμένα δεδομένα βρίσκονται στο πλαίσιο δεδομένων *ss.data.pb2* στο πακέτο SixSigma της R.

Χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο κώδικα δημιουργούμε το \bar{x} διάγραμμα για τις 20 ομάδες (παρτίδες) μεγέθους 5. Το Σχήμα 7.7. λαμβάνεται πληκτρολογώντας `plot(pb.xbar)`. Σε περίπτωση που θέλουμε να λάβουμε το s διάγραμμα, πρέπει απλώς να αλλάξουμε την τιμή του ορίσματος στην συνάρτηση `qcc`.

```
pb.groups.xbar <- with(ss.data.pb2, qcc.groups(pb.humidity, pb.group))  
pb.xbar <- qcc(pb.groups.xbar, type = "xbar")  
summary(pb.xbar)
```

Call:
qcc(data = pb.groups.xbar, type = "xbar")

xbar chart for pb.groups.xbar

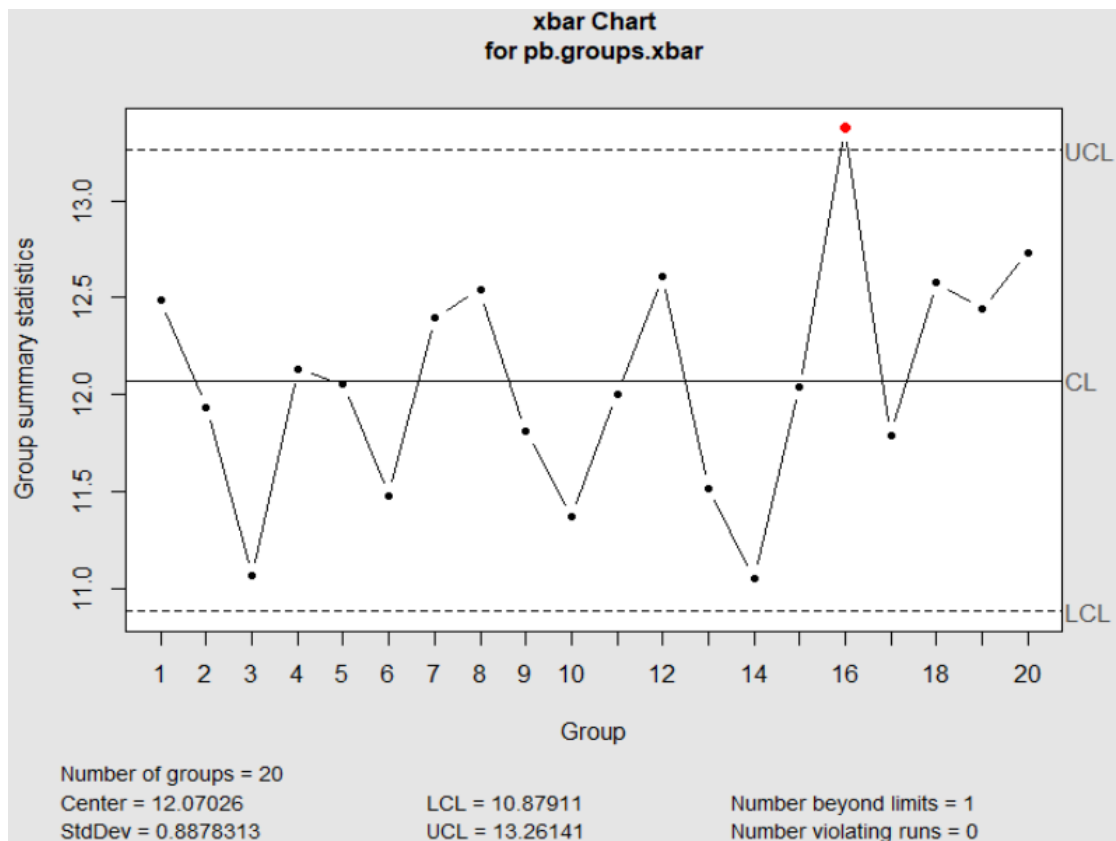
Summary of groups statistics:

Min.	1 st Qu.	Median	Mean	3 rd Qu.	Max
11.05	11.72	12.05	12.07	12.50	13.38

Group sample size: 5
Number of groups: 20
Center of group statistics: 12.07026
Standard deviation: 0.8878313

Control limits:

LCL	UCL
10.87911	13.26141



Σχήμα 7.7.: \bar{X} διάγραμμα ελέγχου.

Υπάρχει ένα σημείο που είναι εκτός των ορίων ελέγχου και συγκεκριμένα πάνω από το άνω όριο ελέγχου. Το σημείο αυτό αντιστοιχεί στην 16^η ομάδα. Επιπλέον στο σχήμα βλέπουμε την τιμή της κεντρικής γραμμής CL = 12.070256 καθώς και τις τιμές

των ορίων ελέγχου, LCL = 10.87911 και UCL = 13.26141. Η τυπική απόκλιση είναι 0.8878313.

$\bar{X} - S$ διάγραμμα

Η κεντρική γραμμή και τα όρια ελέγχου υπολογίζονται ως εξής:

Άνω Όριο	$\bar{s} \times \left(1 + 3 \frac{\sqrt{1 - c_4^2}}{c_4} \right)$
Κεντρική Γραμμή	$\bar{s} = \frac{\sum_{i=1}^k s_i}{k}$
Κάτω Όριο	$\bar{s} \times \left(1 - 3 \frac{\sqrt{1 - c_4^2}}{c_4} \right)$

Όπου s_i είναι η τυπική απόκλιση του δείγματος σε κάθε ομάδα.

7.5.3. Διαγράμματα ελέγχου για ιδιότητες

Τα διαγράμματα που θα περιγράψουμε σε αυτήν την ενότητα είναι κατάλληλα για την παρακολούθηση διακριτών μεταβλητών (ιδιότητες). Το διάγραμμα p είναι ιδανικό όταν το χαρακτηριστικό που θέλουμε να παρακολουθήσουμε και ουσιαστικά να ελέγξουμε είναι ποσοστό. Το διάγραμμα αυτό βασίζεται στη διωνυμική κατανομή. Από την άλλη το διάγραμμα u είναι κατάλληλο για την παρακολούθηση και έλεγχο του αριθμού ελαττωμάτων ανά μονάδα ελέγχου, που βασίζεται στην κατανομή Poisson.

P – chart

Μια τυπική χρήση του διαγράμματος p είναι ο έλεγχος του ποσοστού των ελαττωματικών ανά μονάδα χρόνου, π.χ. τον αριθμό των λανθασμένων αποδείξεων ανά εβδομάδα. Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα μεγέθη δεν είναι ίσα σε όλες τις ομάδες,

και συνεπώς τα όρια ελέγχου γίνονται κλιμακωτά. Επομένως, ίσα μεγέθη ομάδων αντιστοιχούν σε μια συγκεκριμένη περίπτωση των ακόλουθων τύπων. Η κεντρική γραμμή και τα όρια ελέγχου ενός p διαγράμματος υπολογίζονται ως εξής:

Άνω Όριο	$\bar{p} + 3 \sqrt{\frac{\bar{p}(1 - \bar{p})}{n_i}}$
Κεντρική Γραμμή	$\bar{p} = \frac{\sum_{i=1}^k D_i}{\sum_{i=1}^k n_i}$
Κάτω Όριο	$\bar{p} - 3 \sqrt{\frac{\bar{p}(1 - \bar{p})}{n_i}}$

Όπου D_i είναι ο αριθμός των ελαττωματικών στην i ομάδα.

Παράδειγμα 7.5. (Εργοστάσιο κατασκευής σανίδων - συνέχεια)

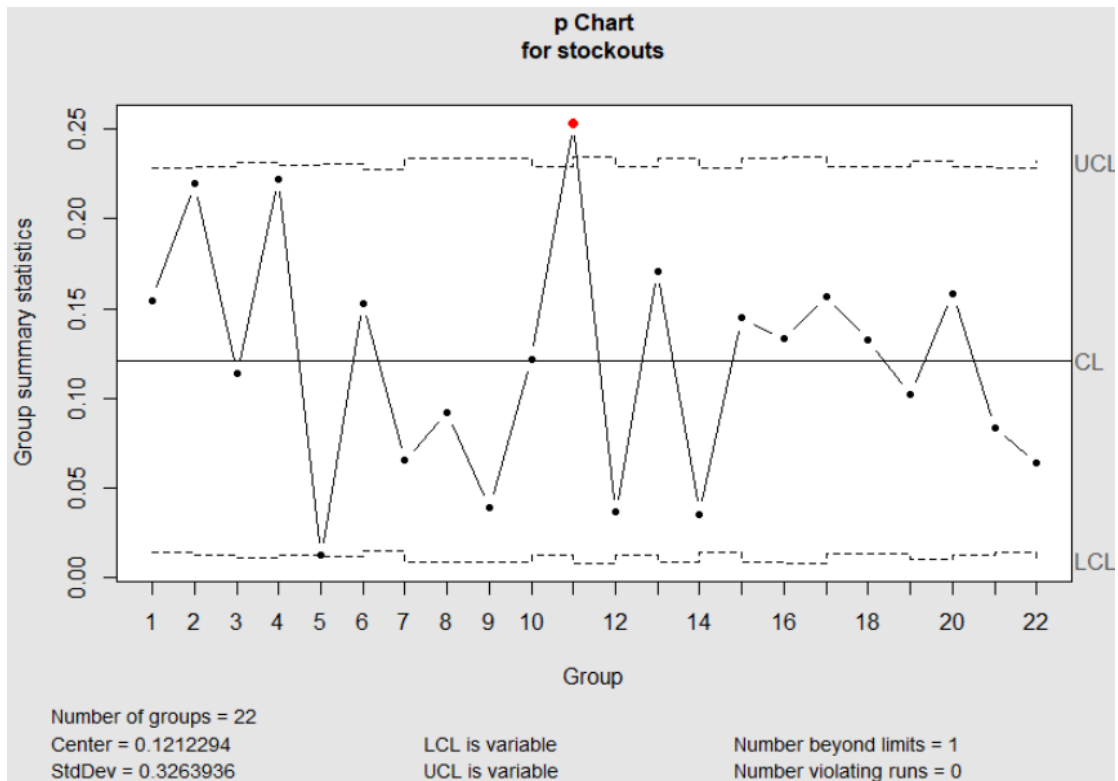
Ένα CTQ χαρακτηριστικό στις διαδικασίες εξυπηρέτησης του εργοστασίου κατασκευής σανίδων είναι το ποσοστό των παραγγελιών που εκτελούνται έγκαιρα (Y). Στο πλαίσιο ενός 6σ πρότζεκτ ανακαλύφθηκε ότι ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν τον χρόνο παράδοσης είναι η έλλειψη κατάλληλων πρώτων υλών, όταν η παραγγελία φτάνει στο εργοστάσιο. Ως εκ τούτου, έχει σχεδιαστεί ένα σχέδιο ελέγχου για την παρακολούθηση και τον έλεγχο του ποσοστού των παραγγελιών που είναι εκτός αποθέματος. Καθώς ο αριθμός των παραγγελιών που λαμβάνονται καθημερινά δεν είναι σταθερός, το διάγραμμα ελέγχου θα παρουσιάζει κλιμακωτά όρια ελέγχου. Το πλαίσιο δεδομένων `ss.data.bp3` στο πακέτο `SixSigma` περιέχει τα ημερήσια αποθέματα και των αριθμών των παραγγελιών σε ένα δεδομένο μήνα 22 ημερών παραγωγής. (Πίνακας 7.1.)

Πίνακας 7.1. Δεδομένα για το p – διάγραμμα ελέγχου

Pb.group	Pb.humidity	Pb.group	Pb.humidity	Pb.group	Pb.humidity	Pb.group	Pb.humutidy
1	14.32	6	10.44	11	11.36	16	13.87
1	12.22	6	12.35	11	11.56	16	13.78
1	12.42	6	12.42	11	11.21	16	13.56
1	11.81	6	11.70	11	13.57	16	13.10
1	11.69	6	10.48	11	12.30	16	12.57
2	11.35	7	13.87	12	13.35	17	13.31
2	11.24	7	12.90	12	12.58	17	11.85
2	13.23	7	11.65	12	12.42	17	10.00
2	11.82	7	12.59	12	11.14	17	11.12
2	12.03	7	10.98	12	13.57	17	12.68
3	10.86	8	14.37	13	11.85	18	12.13
3	11.01	8	11.60	13	10.84	18	12.74
3	11.69	8	13.27	13	11.75	18	12.95
3	10.70	8	12.08	13	12.24	18	11.90
3	11.05	8	11.37	13	10.91	18	13.19
4	12.18	9	11.40	14	11.57	19	12.39
4	11.71	9	10.33	14	11.34	19	10.90
4	12.13	9	13.49	14	10.93	19	13.47
4	12.11	9	11.47	14	11.49	19	12.97
4	12.52	9	12.36	14	9.93	19	12.48
5	11.93	10	11.71	15	11.62	20	12.38
5	12.07	10	10.98	15	11.32	20	12.99
5	13.83	10	11.91	15	12.32	20	13.31
5	11.35	10	10.30	15	12.96	20	11.74
5	11.10	10	11.93	15	11.97	20	13.24

Το p – διάγραμμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 7.8. σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο κώδικα, κάνοντας χρήση του πακέτου qcc:

```
with(ss.data.pb3, plot(qcc(stockouts, orders, type = "p")))
```



Σχήμα 7.8.: p – διάγραμμα για το παράδειγμα κατασκευής σανίδων.

Παρατηρούμε ότι η 11^η μέρα δίνει σημείο εκτός ελέγχου, και συγκεκριμένα σημείο πάνω από το άνω όριο ελέγχου. Επιπρόσθετα παρατηρούμε ότι τα όρια ελέγχου είναι μεταβλητά, ενώ η κεντρική γραμμή είναι σταθερή και ίση με 0,1212294. Ο αριθμός των ομάδων είναι 22 και η τυπική απόκλιση της εν λόγω διαδικασίας ισούται με 0,3263936.

U – chart

Η κεντρική γραμμή και τα όρια ελέγχου ενός u – διαγράμματος υπολογίζονται με τους παρακάτω τύπους:

Ανω Όριο	$\bar{u} + 3 \sqrt{\frac{\bar{u}}{n_i}}$
Κεντρική Γραμμή	$\bar{u} = \frac{\sum_{i=1}^k D_i}{\sum_{i=1}^k n_i}$
Κάτω Όριο	$\bar{u} - 3 \sqrt{\frac{\bar{u}}{n_i}}$

Όπου D_i είναι ο αριθμός των ελαττωμάτων στην i ομάδα.

Η εντολή για τον σχεδιασμό του διαγράμματος ελέγχου με το πακέτο qcc είναι η ίδια, παίρνοντας ως όρισμα τύπου το «u». Αν και η δομή δεδομένων είναι η ίδια, ο τύπος των δεδομένων είναι εντελώς διαφορετικός καθώς στην προκειμένη περίπτωση είναι: ποσοστό ελαττωματικών από τη μία και αριθμός ελαττωμάτων ανά μονάδα ελέγχου από την άλλη.

7.6. Σύνοψη

Στο κεφάλαιο αυτό, ολοκληρώσαμε ουσιαστικά τον DMAIC κύκλο, καθώς περιγράψαμε το τελευταίο στάδιό του, που είναι η φάση ελέγχου της διαδικασίας. Στην πραγματικότητα παρουσιάσαμε πως χρησιμοποιείται η R για τη φάση ελέγχου. Αρχικά εισαγάγαμε κάποιες βασικές έννοιες για τις στρατηγικές αποφυγής σφαλμάτων και επικεντρωθήκαμε στη Poka – Yoke. Εν συνεχεία είδαμε αναλυτικά πως δημιουργούμε διαγράμματα ελέγχου χρησιμοποιώντας τα κατάλληλα πακέτα που διαθέτει η R. Πιο συγκεκριμένα, πρωτίστως αναφερθήκαμε σε βασικά στοιχεία των διαγραμμάτων ελέγχου, όπως η κεντρική γραμμή και τα όρια ελέγχου. Μιλήσαμε για την στρατηγική δειγματοληψίας και είδαμε πόσο σημαντική είναι στη δημιουργία διαγραμμάτων ελέγχου. Έχοντας πλέον ένα ικανοποιητικό υπόβαθρο, διαχωρίσαμε τα διαγράμματα ελέγχου για μεταβλητές και για ιδιότητες. Για τις μεταβλητές ορίσαμε τα μεμονωμένα / κινούμενου εύρους διαγράμματα ελέγχου (I/MR chart),

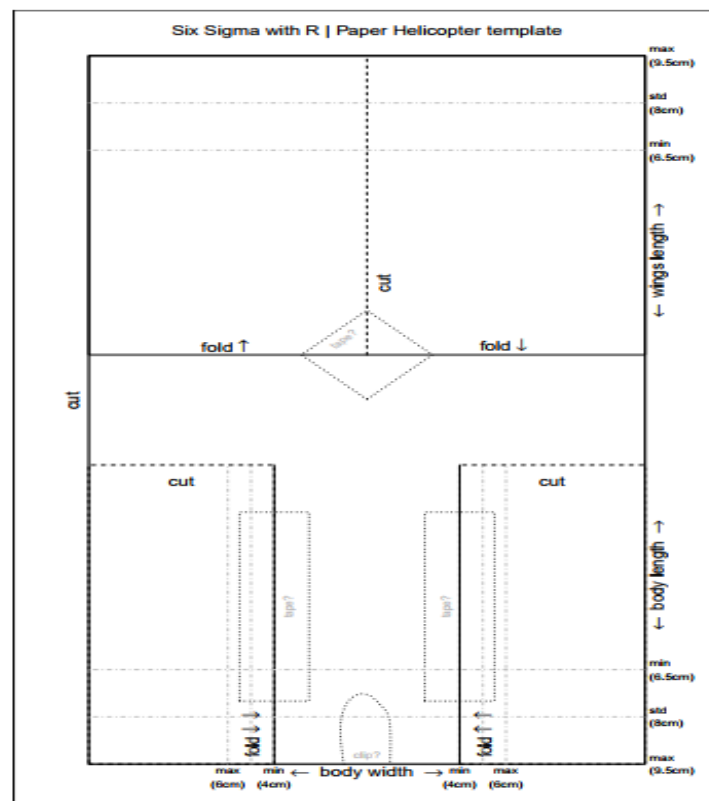
$\bar{X} - R$ διαγράμματα ελέγχου και $\bar{X} - S$ διαγράμματα ελέγχου και δώσαμε για το καθένα ξεχωριστά τους τύπους υπολογισμού της κεντρικής γραμμής και των ορίων ελέγχου. Χρησιμοποιώντας το ίδιο παράδειγμα κατασκευάσαμε με τη βοήθεια της R τα αντίστοιχα διαγράμματα ελέγχου για την κάθε περίπτωση. Για τα διαγράμματα των ιδιοτήτων αναφερθήκαμε στο p -διάγραμμα ελέγχου και στο u -διάγραμμα ελέγχου, όπου το πρώτο είναι κατάλληλο όταν το χαρακτηριστικό που θέλουμε να παρακολουθήσουμε και να ελέγξουμε είναι ποσοστό. Το δεύτερο χρησιμοποιείται όταν θέλουμε να παρακολουθήσουμε και να ελέγξουμε τον αριθμό των ελαττωμάτων ανά μονάδα ελέγχου. Και στην συγκεκριμένη περίπτωση δώσαμε τους τύπους για τον υπολογισμό της κεντρικής γραμμής και των ορίων ελέγχου, καθώς επίσης είδαμε και την αναπαράσταση των εν λόγω διαγραμμάτων χρησιμοποιώντας την R.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8

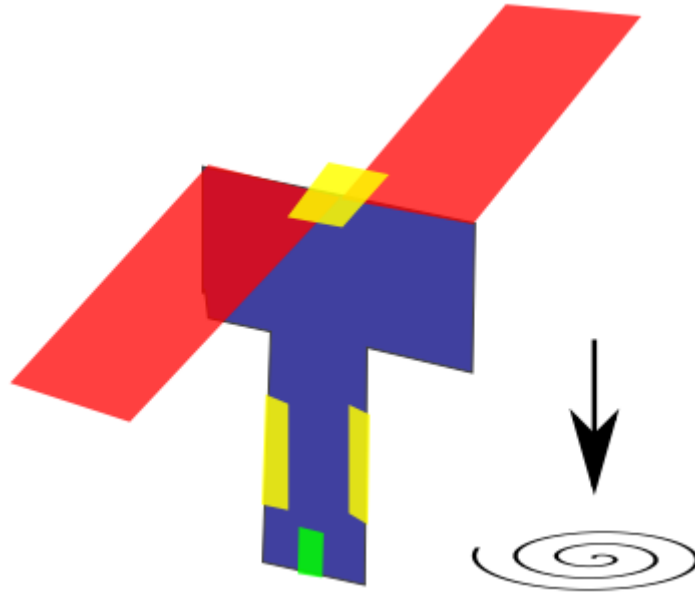
Μια Μελέτη Περίπτωσης

Η μελέτη περίπτωσης (*case study*) που θα πραγματοποιηθεί στην παρούσα διπλωματική είναι ευρέως χρησιμοποιούμενο στη βιβλιογραφία για την ποιότητα. Εμφανίστηκε αρχικά σε μια εργασία του Box G. (1992), ο οποίος χρησιμοποίησε μια πρωτότυπη ιδέα του Kip Rogers της Digital Equipment. Αποτελείται από την κατασκευή ενός χάρτινου ελικοπτέρου του οποίου ο σχεδιασμός ποικίλει στα φτερά και το μήκος του σώματος, στο πλάτος του σώματος, τη χρήση κολλητικής ταινίας κολλημένης στην κατασκευή ή τη συμπερίληψη ενός συνδετήρα στο κάτω μέρος.

Ένα πρότυπο για την κατασκευή ενός ελικοπτέρου χαρτιού μπορεί να ληφθεί χρησιμοποιώντας τη συνάρτηση `ss.heli` που περιέχεται στο πακέτο SixSigma της R. Πληκτρολογώντας `vignette("HelicopterInstructions")` λαμβάνουμε ένα PDF αρχείο στο οποίο υπάρχουν κάποιες οδηγίες για την κατασκευή του ελικοπτέρου και δύο σχήματα.



Σχήμα 8.1: Πρότυπο ελικοπτέρου χαρτιού



Σχήμα 8.2: Διάγραμμα ελικοπτέρου χαρτιού

Οι κίτρινες λωρίδες αντιπροσωπεύουν την κολλητική ταινία και η πράσινη λωρίδα στο κάτω μέρος είναι για τον συνδετήρα. Τα δύο αυτά υλικά είναι προαιρετικά.

Κατά τη διάρκεια του case study, θα περιγράψουμε διαδικασίες, θα λάβουμε μετρήσεις, θα αναλύσουμε δεδομένα, θα γίνει προσπάθεια βελτίωσης διαδικασιών και θα ελέγξουμε τις διαδικασίες που σχετίζονται με το ελικόπτερο χαρτιού. Στόχος είναι να δείξουμε την εφαρμογή του προγράμματος 6σ σε μια διεργασία.

Το χαρακτηριστικό απόκρισης είναι ο χρόνος πτήσης. Η πτητική δοκιμή εκτελείται με πτώση του ελικοπτέρου από κατακόρυφη θέση από ύψος 2 μέτρων και μέτρηση του χρόνου που χρειάζεται για να φτάσει στο πάτωμα. Αυτή η δοκιμή εκτελείται με τη βοήθεια χρονομέτρου.

Για να ξεκινήσουμε το case study κατασκευάσαμε ένα ελικόπτερο χαρτιού με τις παρακάτω διαστάσεις:

- Μήκος φτερών: 9.5 cm
- Πλάτος φτερών: 5.5 cm
- Μήκος σώματος: 9.5 cm
- Πλάτος σώματος: 6 cm

Χρησιμοποιήθηκε επιπλέον κολλητική ταινία στα σημεία που φαίνονται στο Σχήμα 8.2 καθώς επίσης και συνδετήρας στο κάτω μέρος. Ο χρόνος πτήσης του εν λόγω ελικοπτέρου κυμαίνεται στα 2 δευτερόλεπτα. Αφού λοιπόν έχουμε στα χέρια μας ένα ελικόπτερο χαρτιού θα παρουσιάσουμε μια προς μία τις φάσεις του κύκλου DMAIC.

8.1. Φάση Ορισμού:

Στη φάση αυτή θα πραγματοποιηθεί χαρτογράφηση διαδικασίας και ανάλυση της συνάρτησης απώλειας. Αρχικά για να γίνει η χαρτογράφηση διαδικασίας χρειαζόμαστε ένα χάρτη ανώτατου επιπέδου, προσδιορίζοντας τις καταχωρήσεις και τα αποτελέσματα της διαδικασίας. Έπειτα η διαδικασία θα αναλυθεί σε απλούστερα βήματα, όπου εκεί θα αναγνωριστούν οι παράμετροι και τα χαρακτηριστικά. Ολοκληρώνοντας τη χαρτογράφηση διαδικασίας θα παρουσιάσουμε ένα χάρτη διαδικασίας του πρότζεκτ. Για την ανάλυση της συνάρτησης απώλειας, πρέπει να υπολογιστεί το κόστος κακής ποιότητας όταν ο χρόνος πτήσης του ελικοπτέρου δεν πληροί τις προδιαγραφές του πελάτη. Θα κατασκευαστεί επίσης το γράφημα της Taguchi συνάρτησης απώλειας ενώ θα μοντελοποιήσουμε τη συνάρτηση απώλειας προκειμένου να λάβουμε τη μέση απώλεια. Υπολογίζοντας τον αριθμό των ελικοπτέρων που μπορούν να κατασκευαστούν σε ένα μήνα θα λάβουμε και την συνολική απώλεια. Σημειώνεται ότι όλα τα παραπάνω θα γίνουν με τη βοήθεια της R.

Οι καταχωρήσεις (X) της διαδικασίας ορίστηκαν να είναι: **χειριστές, τα εργαλεία, η πρώτη ύλη και οι εγκαταστάσεις**. Το αποτέλεσμα θα είναι το **ελικόπτερο**. Έχοντας λοιπόν αυτά στα χέρια μας, χρησιμοποιώντας τον παρακάτω κώδικα μπορούμε να κατασκευάσουμε τον χάρτη ανώτατου επιπέδου.

```

library(gridGraphics)

grid.roundrect(width = .25,height = unit(1.8, "inches"),x = 0.25)

grid.text("ΚΑΤΑΧΩΡΗΣΕΙΣ (X)\n\nΧΕΙΡΙΣΤΕΣ\nΕΡΓΑΛΕΙΑ\nΠΡΩΤΗ
ΥΛΗ\nΕΓΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ",x = 0.25,
  y = 0.65,
  just = "center")

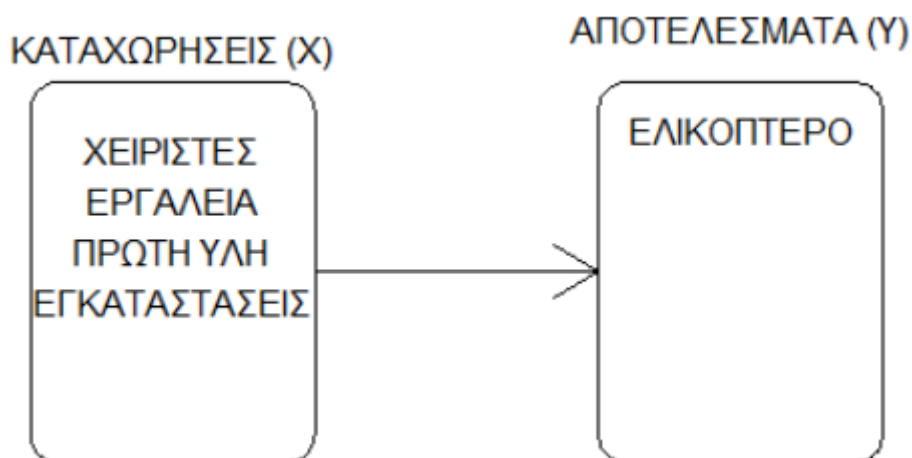
grid.roundrect(width = .25,height = unit(1.8, "inches"),x = 0.75)

grid.text("ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ (Υ)\n\nΕΛΙΚΟΠΤΕΡΟ",
  x = 0.75,
  y = 0.8, just = "center")

grid.lines(x = c(0.375, 0.625),
  y = c(0.5, 0.5),
  arrow = arrow())

```

Όταν τρέξουμε τον παραπάνω κώδικα παίρνουμε το παρακάτω σχήμα, το οποίο ουσιαστικά είναι ένα απλό διάγραμμα του ανώτατου επιπέδου χάρτη. Οι καταχωρήσεις και τα αποτελέσματα προσδιορίζονται εκτός της διαδικασίας ενώ η διαδικασία είναι ένα μαύρο κουτί το οποίο θα αναλυθεί αργότερα.



Σχήμα 8.3: Χάρτης ανώτατου επιπέδου για το ελικόπτερο χαρτιού

Η διαδικασία κατασκευής ενός ελικοπτέρου χαρτιού μπορεί να αναλυθεί στα παρακάτω βήματα:

- Βήμα 1. Επιθεώρηση
- Βήμα 2. Συναρμολόγηση
- Βήμα 3. Έλεγχος

Βήμα 4. Επισήμανση

Υποθέτουμε ότι οι καταχωρήσεις κάθε βήματος, είναι τα αποτελέσματα του προηγούμενου βήματος. Οι καταχωρήσεις για το πρώτο στάδιο είναι τα *xs* που ορίστηκαν προηγουμένως. (χειριστές, εργαλεία, πρώτη ύλη, εγκαταστάσεις). Στη συνέχεια, περιγράφουμε λεπτομερώς τις παραμέτρους και τα αποτελέσματα που αντιστοιχούν σε κάθε βήμα (με την ταξινόμηση των παραμέτρων σε παρενθέσεις).

Πρώτο βήμα: Επιθεώρηση

- Παράμετροι: πλάτος (NC), χειριστής (C), σχέδιο μέτρησης (P), απορρίμματα (P).
- Αποτέλεσμα: Δεκτή επιθεώρηση (Cr)

Δεύτερο βήμα: Συναρμολόγηση

- Παράμετροι: χειριστής (C), κόψιμο (P), διόρθωση (P), πλάτος ρότορα (C), μήκος ρότορα (C), συνδετήρας (C), κολλητική ταινία (C).
- Αποτέλεσμα: Βάρος (Cr)

Τρίτο βήμα: Έλεγχος

- Παράμετροι: χειριστής (C), ρίψη (P), απορρίμματα (P), περιβάλλον (N).
- Αποτέλεσμα: χρόνος πτήσης (Cr)

Τέταρτο βήμα: Επισήμανση

- Παράμετροι: χειριστής (C), ετικέτα (P).
- Αποτέλεσμα: ετικέτα (Cr)

Στη συνέχεια αποθηκεύουμε τις καταχωρήσεις, τα αποτελέσματα και τα βήματα της διαδικασίας σε αντικείμενα στην R. Αυτό μπορεί να γίνει με τις παρακάτω εντολές:

```
inputs <- c("Χειριστές", "Εργαλεία", "Πρώτη ύλη", "Εγκαταστάσεις")
outputs <- c("Ελικόπτερο")
steps <- c("Επιθεώρηση", "Συναρμολόγηση", "Έλεγχος", "Επισήμανση")
```

Έπειτα αποθηκεύουμε τα ονόματα των αποτελεσμάτων κάθε βήματος σε λίστες.

```

input.output <- list()
input.output[[1]] <- list("X's")
input.output[[2]] <- list("Δεκτή επιθεώρηση", "Χειριστές", "Εργαλεία")
input.output[[3]] <- list("Βάρος", "Εργαλεία", "Πρώτη ύλη", "Εγκαταστάσεις")
input.output[[4]] <- list("Χρόνος", "Εγκαταστάσεις")

```

Τέλος αποθηκεύουμε τα ονόματα, τους τύπους των παραμέτρων και τα χαρακτηριστικά με τη βοήθεια των παρακάτω εντολών:

```

parameters <- list()
parameters[[1]] <- list(c("Πλάτος", "NC"),
  c("Χειριστής", "C"),
  c("Σχέδιο μέτρησης", "P"),
  c("Απορρίμματα", "P"))
parameters[[2]] <- list(c("Χειριστής", "C"),
  c("Κόψιμο", "P"),
  c("Διόρθωση", "P"),
  c("Πλάτος ρότορα", "C"),
  c("Μήκος ρότορα", "C"),
  c("Συνδετήρας", "C"),
  c("Κολλητική ταινία", "C"))
parameters[[3]] <- list(c("Χειριστής", "C"),
  c("Ρίψη", "P"),
  c("Απορρίμματα", "P"),
  c("Περιβάλλον", "N"))
parameters[[4]] <- list(c("Χειριστής", "C"),
  c("Ετικέτα", "P"))

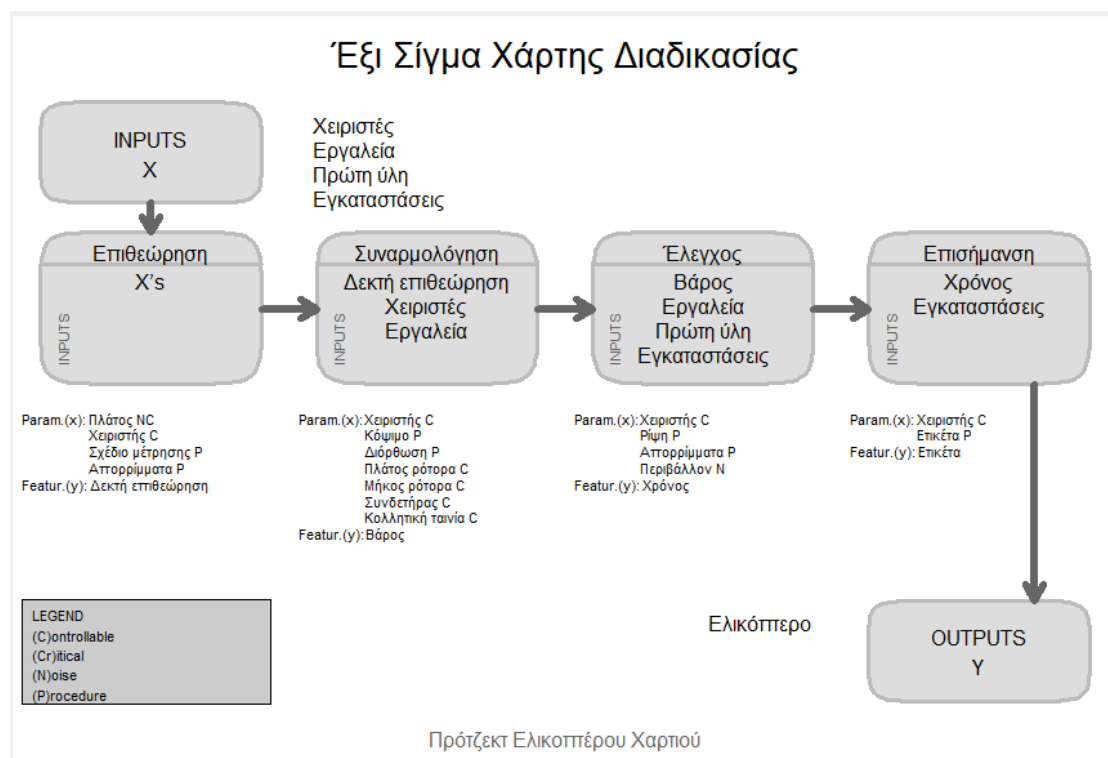
##### Save the features
features <- list()
features[[1]] <- list("Δεκτή επιθεώρηση")
features[[2]] <- list("Βάρος")
features[[3]] <- list("Χρόνος")
features[[4]] <- list("Ετικέτα")

```

Αφού έχουμε πλέον όλα τα δεδομένα σε μεταβλητές, θα προχωρήσουμε στο σχεδιασμό του χάρτη διαδικασίας για το ελικόπτερο χαρτιού. Έτσι λοιπόν καλούμε τη συνάρτηση `ss.pMap` για να σχεδιάσουμε τον χάρτη διαδικασίας. Ο κώδικας στην R είναι:

```
ss.pMap(steps, inputs, outputs, input.output, parameters, features, main = "6σ Χάρτης Διαδικασίας", sub = "Πρότζεκτ Ελικοπτερου Χαρτιου")
```

Το αποτέλεσμα που προκύπτει μετά από αυτή τη διαδικασία φαίνεται στο Σχήμα 8.4, όπου η χρήση της συνάρτησης `ss.pMap` βοήθησε στην αναπαράσταση της όλης διαδικασίας.



Σχήμα 8.4.: Χάρτης Διαδικασίας για το ελικόπτερο χαρτιού

Το σχήμα ξεκινά με τις καταχωρήσεις (Inputs) τα οποία φαίνονται στο πλάι του ορθογώνιου αυτού. Έπειτα το καθένα από τα 4 ορθογώνια που ενώνονται με βέλη, έχει ως τίτλο το κάθε βήμα της διαδικασίας. Στο πρώτο ορθογώνιο οι καταχωρήσεις είναι οι αρχικές καταχωρήσεις της διαδικασίας και συμβολίζονται με Xs. Κάτω από το ορθογώνιο βλέπουμε τις παραμέτρους και τους τύπους των παραμέτρων του 1^{ου} βήματος. Στο δεύτερο ορθογώνιο υπάρχει το αποτέλεσμα του 1^{ου} βήματος (Δεκτή

επιθεώρηση) και οι 2 πρώτες αρχικές καταχωρήσεις της διαδικασίας. Κάτω από το ορθογώνιο βλέπουμε τις παραμέτρους και τους τύπους των παραμέτρων του 2^{ου} βήματος. Στο τρίτο ορθογώνιο υπάρχει το αποτέλεσμα του 2^{ου} βήματος (Βάρος), η τελευταία καταχώρηση του προηγούμενου βήματος (Εργαλεία) και οι 2 τελευταίες αρχικές καταχωρήσεις. Κάτω από το συγκεκριμένο ορθογώνιο υπάρχουν οι παράμετροι και οι τύποι των παραμέτρων του 3^{ου} βήματος. Τέλος στο τελευταίο ορθογώνιο υπάρχει το αποτέλεσμα του 3^{ου} βήματος (Χρόνος) και η τελευταία καταχώρηση του προηγούμενου βήματος. Κάτω από το ορθογώνιο υπάρχουν και πάλι οι παράμετροι και οι τύποι των παραμέτρων του 4^{ου} βήματος. Στο κάτω δεξιά μέρος του σχήματος υπάρχει το τελικό ορθογώνιο με το τελικό αποτέλεσμα της διαδικασίας που είναι το ελικόπτερο.

Ας υποθέσουμε ότι η Κύρια Μαύρη Ζώνη της εταιρείας που κατασκευάζει τα ελικόπτερα χαρτιού, θέλει να αξιολογήσει τη διαδικασία χρόνου πτήσης του ελικοπτέρου. Το CTQ χαρακτηριστικό είναι ο χρόνος πτήσης του ελικοπτέρου από ύψος 2 μέτρων. Η τιμή στόχος είναι 2 δευτερόλεπτα. Τα παρακάτω δεδομένα είναι γνωστά για την εταιρεία:

- Ο πελάτης θα αποδεχθεί το ελικόπτερο αν ο χρόνος πτήσης του είναι ανάμεσα στα 1.5 και 2.5 δευτερόλεπτα.
- Όταν ο χρόνος πτήσης δεν πληροί τις απαιτήσεις, το ελικόπτερο απορρίπτεται και εκτιμάται ότι το κόστος είναι 0.005 ευρώ.

Επομένως έχουμε ότι η τιμή στόχος είναι $Y_0 = 2 \text{ sec}$, η ανοχή της διαδικασίας είναι $\Delta = 0.5 \text{ sec}$ και το κόστος στο $Y_0 + \Delta$ είναι $L_0 = L(Y_0 + \Delta) = 0.005$. Άρα, η τιμή του k είναι:

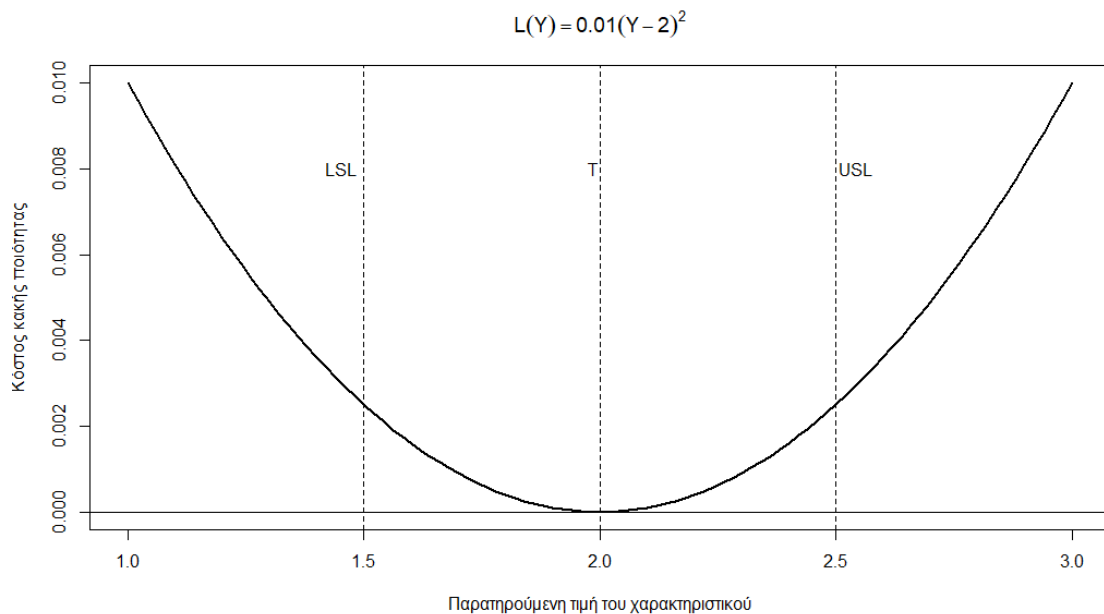
$$k = 0.005/0.5 = 0.01$$

Επομένως η συνάρτηση απώλειας για τη διαδικασία χρόνου πτήσης του ελικοπτέρου είναι $L(Y) = 0.01(Y - 2)^2$ και μπορούμε λοιπόν να κατασκευάσουμε τη γραφική παράσταση της συνάρτησης απώλειας του Taguchi με χρήση της R. Αυτό γίνεται με τις παρακάτω εντολές:

```

curve(0.01*(x-2.0)^2,1.0,3.0,
      lty = 1, lwd = 2, ylab = "Κόστος κακής ποιότητας",
      xlab = "Παρατηρούμενη τιμή του χαρακτηριστικού",
      main = expression (L(Y) == 0.01(Y-2.0)^2))
abline (v=1.5, lty=2)
abline (v=2.5, lty=2)
abline (v=2.0, lty=2)
abline (h=0)
text(2.0, 0.008, "T", adj=1.2)
text(1.5, 0.008, "LSL", adj=1.2)
text(2.5, 0.008, "USL", adj=-0.1)

```



Σχήμα 8. 5.: Συνάρτηση Απώλειας του Taguchi για το ελικόπτερο χαρτιού.

Παρατηρούμε ότι όταν η παρατηρούμενη τιμή του χαρακτηριστικού είναι ακριβώς η τιμή στόχος τότε το κόστος κακής ποιότητας είναι ίσο με το μηδέν. Όσο απομακρυνόμαστε από την τιμή στόχο, αλλά βρισκόμαστε μέσα στα όρια προδιαγραφών το κόστος κακής ποιότητας κυμαίνεται από το 0 μέχρι λίγο πάνω από το 0.002. Όταν όμως βρεθούμε εκτός των ορίων προδιαγραφών, είτε κάτω από το 1.5 sec, είτε πάνω από το 1.5sec, τότε το κόστος κακής ποιότητας αυξάνεται και μπορεί να φτάσει το 0.01 (σε χρηματικές μονάδες).

Για να υπολογίσουμε τη μέση συνάρτηση απώλειας για την εταιρεία κατασκευής ελικοπτέρων χαρτιού θα χρησιμοποιήσουμε ένα δείγμα 20 ελικοπτέρων. Ο χρόνος πτήσης κάθε ελικοπτέρου φαίνεται στον Πίνακα 8.1. Υποθέτουμε επίσης ότι η εταιρεία μπορεί να κατασκευάσει 20000 ελικόπτερα το μήνα. Το δείγμα αυτό το χρειαζόμαστε για να μπορέσουμε να υπολογίσουμε την συνολική απώλεια της διαδικασίας.

Πίνακας 8.1.: Δεδομένα για το χρόνο πτήσης των ελικοπτέρων

2.04	1.92	1.87	1.93
1.99	2.10	2.09	2.07
2.17	1.76	1.98	1.95
1.90	2.20	2.06	2.14
1.99	2.08	2.30	2.04

Τα δεδομένα του Πίνακα 8.1. έχουν προσομοιωθεί και έχουν χρησιμοποιηθεί για λόγους πρακτικής εφαρμογής του $\delta\sigma$.

Για να λάβουμε τα δεδομένα που θέλουμε για τη συνάρτηση απώλειας πληκτρολογούμε την παρακάτω εντολή:

```
ss.lfa(lfa.data = data, lfa.ctq = "time flight", lfa.Delta = 0.5, lfa.Y0 = 2, lfa.L0 = 0.005,
      lfa.size = 20000, lfa.output = "both", lfa.sub = "2 second flight Project" )
```

Με την εντολή αυτή παίρνουμε αποτελέσματα για την τιμή της σταθεράς k , την έκφραση της συνάρτησης απώλειας, την τιμή των μέσων τετραγωνικών διαφορών από τον στόχο, τη μέση απώλεια ανά μονάδα της διαδικασίας και την συνολική απώλεια της διαδικασίας. Αυτά λαμβάνονται καθώς ως όρισμα της `lfa.output` δώσαμε την εντολή `both`. Επιπλέον λαμβάνουμε και τη γραφική παράσταση (Σχήμα 8.6.).

\$lfa.k

[1] 0.02

\$lfa.lf

Expression(bold(L == 0.02 %.(Y-2)^2))

\$lfa.MSD

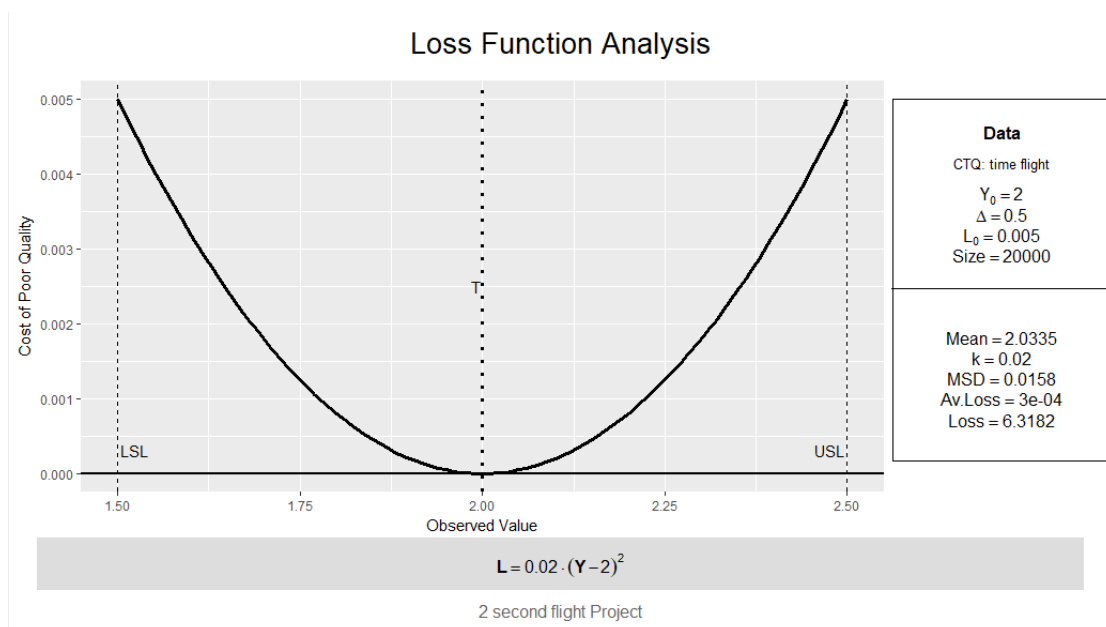
[1] 0.01579555

\$lfa.avLoss

[1] 0.000315911

\$lfa.Loss

[1] 6.31822



Σχήμα 8.6: Γραφική παράσταση της συνάρτησης απώλειας

Στο παραπάνω σχήμα ουσιαστικά βλέπουμε την συνάρτηση απώλειας για το ελικόπτερο χαρτιού. Τα όρια προδιαγραφών και η τιμή στόχος παρουσιάζονται στο γράφημα ως οι 3 κάθετες διακεκομμένες γραμμές. Κάτω από το γράφημα φαίνεται η αλγεβρική έκφραση της συνάρτησης. Στα δεξιά του γραφήματος έχουμε τις καταχωρήσεις των δεδομένων (το CTQ χαρακτηριστικό, την τιμή στόχο, την ανοχή, το κόστος κακής ποιότητας και το μέγεθος της παραγωγής). Στο δεύτερο πινακάκι στα δεξιά του γραφήματος υπάρχουν τα υπολογιζόμενα αποτελέσματα (μέση τιμή, σταθερά k , MSD , μέση απώλεια ανά μονάδα και η συνολική απώλεια).

8.2. Φάση Μέτρησης:

Στη φάση αυτή πραγματοποιείται η ανάλυση μετρητικού συστήματος, η ανάλυση Pareto και η ανάλυση ικανότητας διεργασίας. Αρχικά μέσω της ανάλυσης του μετρητικού συστήματος, θα προσδιορίσουμε και θα ποσοτικοποιήσουμε τις πηγές της διακύμανσης που επηρεάζουν το μετρητικό σύστημα. Η μεταβλητότητα του μετρητικού συστήματος (και οι συνιστώσες αυτής) είναι εξαιρετικά σημαντική στη μεθοδολογία 6σ αφού αν η μεταβλητότητα του μετρητικού συστήματος δεν ελέγχεται, τότε η διαδικασία δεν μπορεί να βελτιωθεί. Με τη χρήση της ανάλυσης Pareto θα προσδιορίσουμε τις πιθανές αιτίες ελαττωμάτων και θα επικεντρωθούμε στις πιο σημαντικές ενώ με το διάγραμμα Pareto θα συμπεράνουμε σε ποιες αιτίες πρέπει να δώσουμε προσοχή ούτως ώστε να έχουμε βέλτιστες βελτιώσεις. Επίσης θα κατασκευάσουμε και ένα διάγραμμα αιτίου -αποτελέσματος. Τέλος με την ανάλυση ικανότητας διεργασίας, έχουμε τη δυνατότητα να μετρήσουμε κατά πόσο η απόδοση της διαδικασίας συμφωνεί με τις απαιτήσεις των πελατών.

Για να πραγματοποιήσουμε ανάλυση μετρητικού συστήματος κατασκευάσαμε 4 διαφορετικά ελικόπτερα χαρτιού (σύμφωνα με το Σχήμα 8.1). Ζητήσαμε από 3 φίλους να μας βοηθήσουν ως χειριστές. Κάθε χειριστής πραγματοποιεί 3 δοκιμές με κάθε πρότυπο ελικοπτερού. Τα δεδομένα δίνονται στον Πίνακα 8.2.

Πίνακας 8.2: Δεδομένα χρόνου πτήσης ελικοπτέρων με τους 3 χειριστές

Χειριστής	Πρότυπο 1	Πρότυπο 2	Πρότυπο 3	Πρότυπο 4
1	2.06	1.75	1.53	1.62
	2.10	1.74	1.51	1.60
	2.07	1.76	1.50	1.61
2	1.98	1.89	1.41	1.64
	2.01	1.87	1.43	1.62
	1.97	1.90	1.45	1.65
3	2.04	1.72	1.49	1.59
	2.02	1.73	1.51	1.61
	2.05	1.70	1.50	1.57

Τα δεδομένα του Πίνακα 8.2. έχουν προσομοιωθεί και έχουν χρησιμοποιηθεί για λόγους πρακτικής εφαρμογής του 6σ.

Επομένως, τα μέρη είναι τα ελικόπτερα ($a = 4$) και οι ελεγκτές είναι οι χειριστές ($b = 3$). Αφού η μέτρηση λαμβάνεται 3 φορές ($n = 3$) έχουμε λοιπόν $4 \times 3 \times 3 = 36$ συνολικά μετρήσεις. Μπορούμε να αποθηκεύσουμε τα δεδομένα σε ένα πλαίσιο δεδομένων με τις παρακάτω εντολές. Τρέχοντας τον παρακάτω κώδικα λαμβάνουμε ένα πλαίσιο δεδομένων (data frame), το οποίο έχουμε ονομάσει `xronos.ptisis`.

```
operator <- factor(rep(1:3, each = 3))
helicopter <- factor(rep(rep(1:4, each = 9),1))
run <- factor(rep(1:3, 4))
data.heli <- c(2.06, 2.10, 2.07, 1.98, 2.01, 1.97, 2.04, 2.02, 2.05, 1.75, 1.74, 1.76, 1.89, 1.87,
1.90, 1.72, 1.73, 1.70, 1.53, 1.51, 1.50, 1.41, 1.43, 1.45, 1.49, 1.51, 1.50, 1.62, 1.60, 1.61,
1.64, 1.62, 1.65, 1.59, 1.61, 1.57)
xronos.ptisis <- data.frame(helicopter, operator, run, data.heli)
```

Για να λάβουμε το output της ανάλυσης του μετρητικού συστήματος μαζί με τα διάφορα γραφήματα για τα δεδομένα του χρόνου πτήσης των ελικοπτέρων πληκτρολογούμε τον παρακάτω κώδικα:

```
my.rr <- ss.rr(var = data.heli, part = helicopter, appr = operator,
data = xronos.ptisis,
main = "6σ μελέτη διαμετρημάτων",
sub = "MSA πρότζεκτ Ελικοπτέρων")
```

```
Complete model (with interaction):
```

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F-value	Pr(>F)
helicopter	3	1.5370	0.5123	43.30	0.000185
Operator	2	0.0052	0.0026	0.22	0.808739
Helicopter:operator	6	0.0710	0.0118	45.32	$6.13e^{-12}$
Repeatability	24	0.0063	0.0003		
Total	35	1.6194			

Alpha for removing interaction: 0.05

```
Gage R&R
```

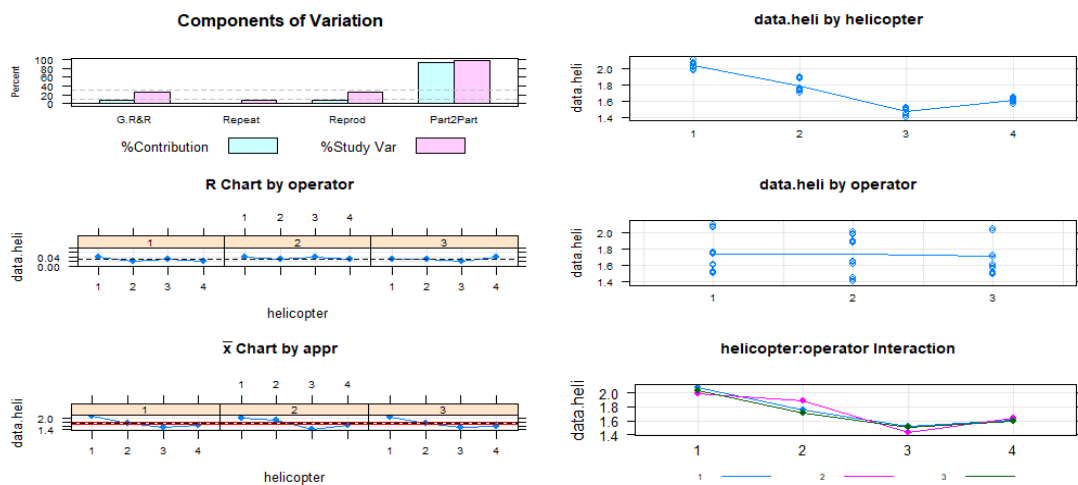
	VarComp	%Contrib
Total Gage R&R	0.0041182099	6.89
Repeatability	0.0002611111	0.44
Reproducibility	0.0038570988	6.46
Operator	0.0000000000	0.00
Helicopter:operator	0.0038570988	6.46
Part - to part	0.0556095679	93.11
Total variation	0.0597277778	100.00

	StdDev	StudyVar	%StudyVar
Total Gage R&R	0.06417328	0.3850397	26.26
Repeatability	0.01615893	0.0969536	6.61
Reproducibility	0.06210555	0.3726333	25.41
Operator	0.00000000	0.0000000	0.00
Helicopter:operator	0.06210555	0.3726333	25.41
Part - to part	0.23581681	1.4149009	96.49
Total variation	0.24439267	1.4663560	100.00

Number of Distinct Categories = 5

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης μετρητικού συστήματος (MSA) δείχνουν ότι το %έυρος ανοχής που οφείλεται στην R&R μελέτη διαμετρημάτων είναι 26.26% το οποίο είναι μικρότερο από το 30%. Επιπλέον ο αριθμός των διαφορετικών κατηγοριών είναι ίσος του 5. Αυτό σημαίνει ότι η σχέση μεταξύ της μεταβλητότητας της R&R μελέτης διαμετρημάτων και της έμφυτης μεταβλητότητας είναι ικανοποιητική. Επομένως μπορούμε να θεωρήσουμε το μετρητικό σύστημα ακριβές. Για να δούμε και γραφικά το παραπάνω συμπέρασμα μπορούμε να αναλύσουμε τα γραφήματα του Σχήματος 8.7 ένα προς ένα.

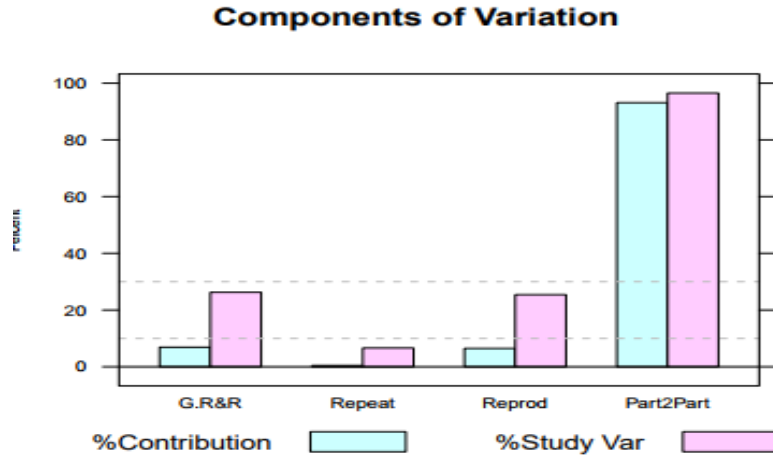
Έξι Σίγμα μελέτη διαμετρημάτων



MSA πρτζεκτ Ελικοπτέρων

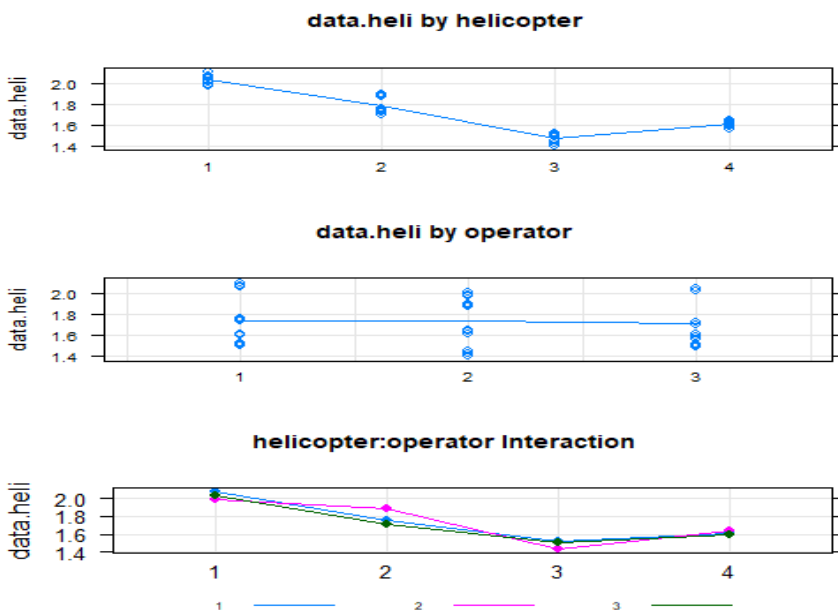
Σχήμα 8.7.: Γραφήματα για την ανάλυση μετρητικού συστήματος για τα ελικόπτερα χαρτιού.

Θα δούμε τώρα αναλυτικά τα γραφήματα του σχήματος 8.7 και τις ερμηνείες τους.



Σχήμα 8.8.: Στοιχεία μεταβλητότητας

Η παραπάνω γραφική παράσταση αποτελεί κομμάτι του σχήματος 8.7. Είναι ένα ραβδόγραμμα, το οποίο αντιπροσωπεύει την συνεισφορά κάθε συστατικού στην συνολική διακύμανση. Είναι σαφές ότι η διαδικασία δεν έχει κάποιο πρόβλημα με την επαναληψιμότητα (Repeat) καθώς η συμβολή και των δύο (%Contribution και %StudyVar) είναι μικρότερη από το 10%. Όσο αφορά την αναπαραγωγιμότητα (Reprod) παρατηρείται ένα πρόβλημα σχετικά με τη συμβολή της καθώς ξεπερνά το 10%. Τέλος το %εύρος ανοχής που οφείλεται στην R&R μελέτη διαμετρημάτων είναι μεταξύ του 10-30%.

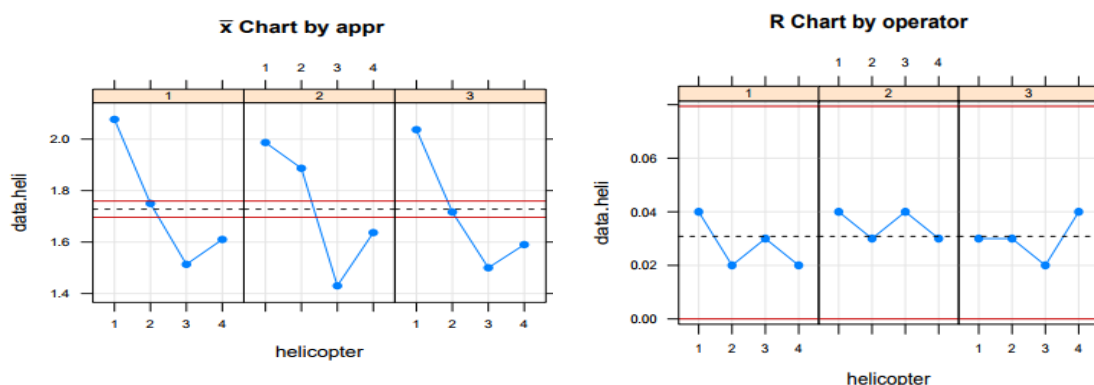


Σχήμα 8.9.: Επιδράσεις ελεγκτών, μερών και αλληλεπίδραση

Τα γραφήματα που φαίνονται πιο πάνω αποτελούν κομμάτι του σχήματος 8.7. Από τα γραφήματα αυτά μπορούμε να εντοπίσουμε αν υπάρχει αλληλεπίδραση μεταξύ των χειριστών και τον προτύπων (που θα ήταν πρόβλημα) ή διαφορές μεταξύ των χειριστών. Στο πρώτο γράφημα (data.heli by helicopter) ο άξονας X αντιπροσωπεύει τα ελικόπτερα και η γραμμή που φαίνεται ενώνει τις μέσες τιμές κάθε προτύπου. Παρατηρούμε ότι ο χρόνος πτήσης του 1^{ου} προτύπου ελικοπτέρου είναι υψηλότερος από τα υπόλοιπα, ενώ αντίθετα ο χρόνος πτήσης του 3^{ου} προτύπου ελικοπτέρου είναι χαμηλότερος. Όμως η μεταβλητότητα των διαφορετικών προτύπων ελικοπτέρων είναι παρόμοια. Επομένως, η διαφορά στους χρόνους πτήσης δεν είναι πρόβλημα για το μετρητικό σύστημα.

Στο δεύτερο γράφημα (data.heli by operator) ο άξονας X αντιπροσωπεύει τους χειριστές. Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν διαφορές μεταξύ των χειριστών. Οι μέσες τιμές και οι μεταβλητότητες δε διαφέρουν, επομένως δεν υπάρχει πρόβλημα για το μετρητικό σύστημα.

Τέλος στο τρίτο γράφημα (helicopter: operator interaction) εντοπίζεται, αν υπάρχει, η αλληλεπίδραση μεταξύ των παραγόντων, χειριστές και ελικόπτερα. Παρατηρούμε ότι οι γραμμές διασταυρώνουν η μία την άλλη, γεγονός που υποδεικνύει ότι (υπάρχει ένδειξη ότι) η αλληλεπίδραση των παραγόντων είναι στατιστικά σημαντική. Αυτό επιβεβαιώνεται και από την τιμή του p – value στο output η οποία ισούται με $6.13e^{-12}$ μικρότερη από οποιοδήποτε επίπεδο σημαντικότητας, επομένως απορρίπτουμε την υπόθεση ότι η αλληλεπίδραση δεν είναι στατιστικά σημαντική.



Σχήμα 8.10: \bar{X} διάγραμμα ελέγχου για εκτιμητή και R διάγραμμα ελέγχου για χειριστή.

Το παραπάνω γράφημα αποτελεί μέρος του σχήματος 8.7. Στο \bar{X} διάγραμμα ελέγχου τα περισσότερα σημεία πρέπει να βρίσκονται εκτός των ορίων ελέγχου. Αυτό γιατί η γραφική παράσταση αντιπροσωπεύει την από μέρος σε μέρος διακύμανση (ίδιος χειριστής, ίδιο πρότυπο). Αν δεν ισχύει αυτό, το μετρητικό σύστημα θεωρείται ανεπαρκές. Στο R διάγραμμα ελέγχου όλα τα σημεία πρέπει να βρίσκονται εντός των ορίων ελέγχου. Οι παραπάνω ισχυρισμοί ισχύουν στην προκειμένη περίπτωση, επομένως το μετρητικό σύστημα θεωρείται ικανοποιητικό.

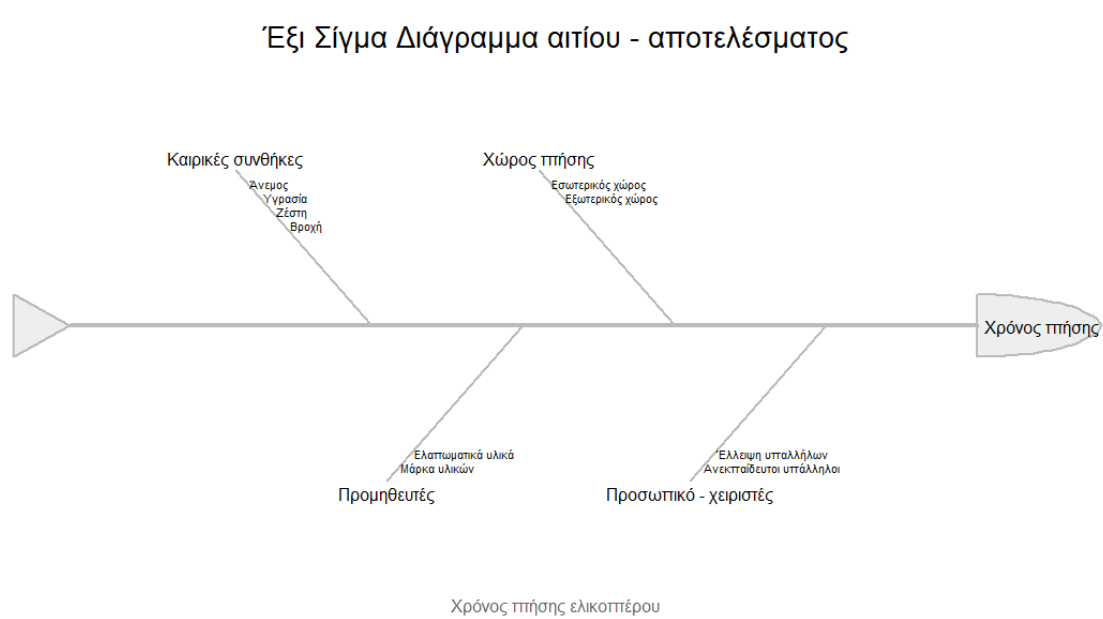
Στη συνέχεια, υποθέτουμε ότι η ομάδα 6σ αναγνώρισε γεγονότα τα οποία μπορούν να προκαλέσουν ελαττώματα στο ελικόπτερο χαρτιού, οδηγώντας το έτσι σε χειρότερους χρόνους πτήσης. Τα γεγονότα αυτά είναι: οι προμηθευτές (ελαττωματικά υλικά, μάρκα υλικών), το προσωπικό (ανεκπαιδευτοι υπάλληλοι, έλλειψη υπαλλήλων), οι καιρικές συνθήκες (άνεμος, υγρασία, ζέστη, βροχή) και ο χώρος πτήσης του ελικοπτέρου (εσωτερικός, εξωτερικός).

Ένα διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος μας επιτρέπει να ταξινομήσουμε τις πληροφορίες με τέτοιο τρόπο ούτως ώστε να καταστεί πιο εύκολη η ερμηνεία τους. Μπορούμε λοιπόν να δημιουργήσουμε ένα διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο κώδικα:

```
b.effect <- ("Χρόνος πτήσης")
b.groups <- c("Καιρικές συνθήκες", "Χώρος πτήσης", "Προσωπικό - χειριστές",
"Προμηθευτές")
b.causes <- vector(mode = "list", length = length(b.groups))
b.causes[1] <- list(c("Άνεμος", "Υγρασία", "Ζέστη", "Βροχή"))
b.causes[2] <- list(c("Εσωτερικός χώρος", "Εξωτερικός χώρος"))
b.causes[3] <- list(c("Ανεκπαιδευτοι υπάλληλοι", "Έλλειψη υπαλλήλων"))
b.causes[4] <- list(c("Μάρκα υλικών", "Ελαττωματικά υλικά"))
ss.ceDiag(b.effect, b.groups, b.causes, main = "6σ Διάγραμμα αιτίου - αποτελέσματος",
sub = "Χρόνος πτήσης ελικοπτέρου")
```

Το διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος που προκύπτει δίνεται στο Σχήμα 8.11. Στο κεφάλι του ψαριού έχουμε το αποτέλεσμα που θέλουμε να ερευνήσουμε. Κάθε

κόκκαλο του ψαριού αντιπροσωπεύει μια ομάδα ενώ κάθε μεμονωμένη αιτία προέρχεται από ένα κύριο ψαροκόκαλο.



Σχήμα 8.11.: Διάγραμμα αιτίου – αποτελέσματος για τον χρόνο πτήσης του ελικοπτέρου.

Η Μαύρη ζώνη της εταιρείας που αναλαμβάνει την κατασκευή των ελικοπτέρων χαρτιού, έχει διερευνήσει τον αριθμό των ανεκπλήρωτων προθεσμιών τα τελευταία 3 χρόνια. Επιπλέον έχει υπολογίσει το κόστος που επιφέρουν αυτές οι καθυστερήσεις στην εταιρεία (πρόσθετο εργατικό δυναμικό, πρόσθετες πληρωμές, πρόσθετα υλικά κ.α.).

Με τον παρακάτω κώδικα αποθηκεύονται τα δεδομένα σε ένα πλαίσιο δεδομένων με έναν παράγοντα του οποίου τα επίπεδα είναι οι πιθανές αιτίες (χρησιμοποιούμε τη λίστα `b.causes` που δημιουργήσαμε πιο πάνω για την κατασκευή του διαγράμματος αιτίου – αποτελέσματος) και δύο μεταβλητές (τον αριθμό των ανεκπλήρωτων προθεσμιών και το εκτιμώμενο κόστος). Οι εντολές στην R είναι:

```
b.data <- data.frame(cause = factor(unlist(b.causes)),
  count = c(5, 1, 3, 2, 3, 18, 15, 30, 20, 44),
  cost = c(150, 20, 50, 30, 50, 180, 100, 200, 150, 265))
```


	cause	count	cost
1	Άνεμος	5	150
2	Υγρασία	1	20
3	Ζέστη	3	50
4	Βροχή	2	30
5	Εσωτερικός χώρος	3	50
6	Εξωτερικός χώρος	18	180
7	Ανεκπαιδευτοι υπάλληλοι	15	100
8	Έλλειψη υπαλλήλων	30	200
9	Μάρκα υλικών	20	150
10	Ελαττωματικά υλικά	44	265

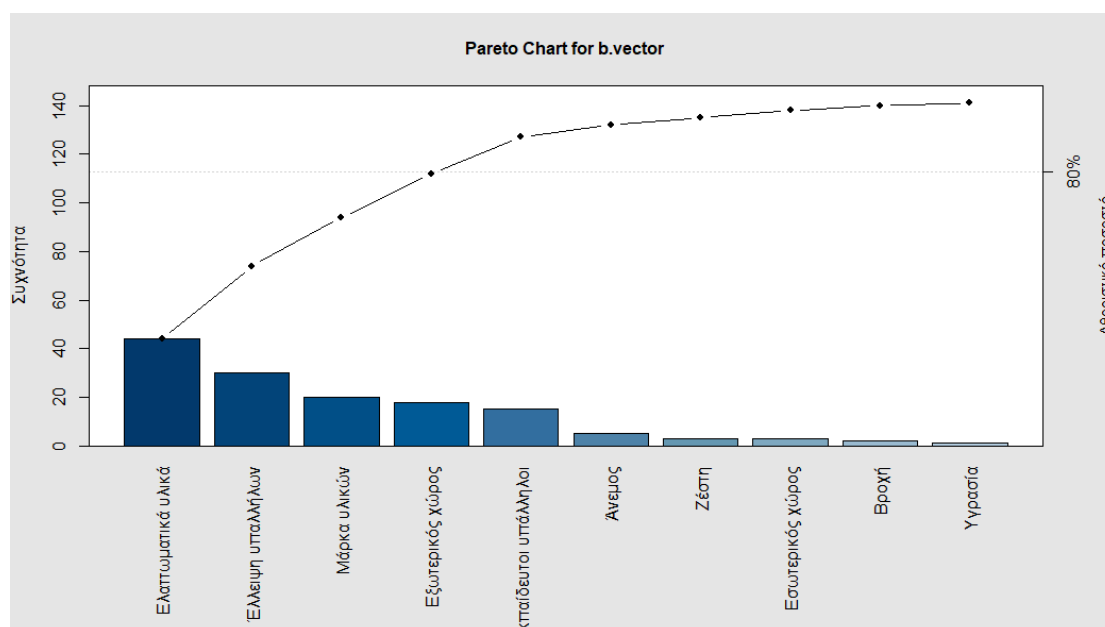
Με τον παρακάτω κώδικα θα λάβουμε τον Πίνακα 8.3 και ένα διάγραμμα Pareto.

```
library(qcc)
b.vector <- b.data$count
names(b.vector) <- b.data$cause
pareto.chart(b.vector, ylab = "Συχνότητα", ylab2 = "Αθροιστικό ποσοστό",
             cumperc = c(80))
```

Πίνακας 8.3: Ανάλυση του διαγράμματος Pareto

	Συχνότητες	Αθροιστικές συχνότητες	Ποσοστά	Αθροιστικά ποσοστά
Ελαττωματικά υλικά	44.00	44.00	31.21%	31.21%
Έλλειψη υπαλλήλων	30.00	74.00	21.28%	52.48%
Μάρκα υλικών	20.00	94.00	14.18%	66.67%
Εξωτερικός χώρος	18.00	112.00	12.77%	79.43%
Ανεκπαιδευτοι υπάλληλοι	15.00	127.00	10.64%	90.07%
Άνεμος	5.00	132.00	3.55%	93.62%
Ζέστη	3.00	135.00	2.13%	95.74%
Εσωτερικός χώρος	3.00	138.00	2.13%	97.87%
Βροχή	2.00	140.00	1.42%	99.29%
Υγρασία	1.00	141.00	0.71%	100.0%

Παρατηρούμε ότι η στήλη με τις συχνότητες είναι οι συχνότητες κάθε αιτίας ταξινομημένες κατά φθίνουσα σειρά. Οι συχνότητες βρίσκονται στο πλαίσιο δεδομένων που είδαμε παραπάνω. Η πρώτη γραμμή στη στήλη με τις αθροιστικές συχνότητες είναι απλώς η συχνότητα. Από τη δεύτερη γραμμή και έπειτα οι αθροιστικές συχνότητες προκύπτουν από το άθροισμα της αθροιστικής συχνότητας με την αμέσως επόμενη συχνότητα. Η στήλη με τα ποσοστά περιλαμβάνει τις τιμές που φαίνονται στο διάγραμμα Pareto (σχήμα 8.12). Τέλος τα αθροιστικά ποσοστά από τη δεύτερη γραμμή και έπειτα προκύπτουν ως το άθροισμα του αθροιστικού ποσοστού με το αμέσως επόμενο ποσοστό. Παρατηρούμε ότι οι 6 από τις 10 αιτίες είναι πάνω από το 80% το αθροιστικό τους ποσοστό.



Σχήμα 8.12.: Διάγραμμα Pareto.

Στην ανάλυση ικανότητας της διαδικασίας μας, ενδιαφερόμαστε να βρούμε το sigma score (Z) της διαδικασίας. Το sigma score μας υποδεικνύει πόσες τυπικές αποκλίσεις μπορούν να «χωρέσουν» ανάμεσα στο μέσο όρο και το όριο προδιαγραφών οποιασδήποτε διαδικασίας. Για να μπορέσουμε λοιπόν να βρούμε το σίγμα χρησιμοποιούμε τα δεδομένα που δίνονται στον Πίνακα 8.1 και τον παρακάτω κώδικα. Το αποτέλεσμα είναι 2.268603, δηλαδή το σίγμα είναι περίπου 2.27 (μικρότερο από 3σ DPMO, δείτε Πίνακα 4.5, Κεφάλαιο 4.4.3.).

```
x <- c(2.04, 1.99, 2.17, 1.90, 1.99,  
      1.92, 2.10, 1.76, 2.20, 2.08,  
      1.87, 2.09, 1.98, 2.06, 2.30,  
      1.93, 2.07, 1.95, 2.14, 2.04)  
ss.ca.z(x, LSL=1.5, USL=2.5)
```

Χρησιμοποιώντας τα δεδομένα που έχουμε λάβει για το χρόνο πτήσης του ελικοπτέρου, θα υπολογίσουμε τους δείκτες ικανότητας C_p και C_{pk} καθώς επίσης και τα αντίστοιχα διαστήματα εμπιστοσύνης, για τη διαδικασία χρόνου πτήσης. Για να γίνει αυτό θα χρησιμοποιήσουμε τις συναρτήσεις `ss.ca.p` και `ss.ca.pk` και πιο συγκεκριμένα τον ακόλουθο κώδικα:

```
ss.ca.cp(x, LSL = 1.5, USL = 2.5)  
ss.ca.cpk(x, LSL = 1.5, USL = 2.5)
```

Οι τιμές που λαμβάνουμε για τους συγκεκριμένους δείκτες ικανότητας είναι:

```
[1] 1.333547  
[1] 1.256201
```

Έτσι μπορούμε να πούμε ότι η διαδικασία χρειάζεται παρακολούθηση καθώς η τιμή του C_p είναι οριακά μεγαλύτερη του 1.33, ενώ η τιμή του C_{pk} είναι μικρότερη από το 1.33. Όμως είναι και οι δύο τιμές μικρότερες από το 1,67 που είναι η επιθυμητή τιμή.

Για να λάβουμε τα αντίστοιχα διαστήματα εμπιστοσύνης για τους δείκτες ικανότητας, χρησιμοποιούμε τον παρακάτω κώδικα, ο οποίος ουσιαστικά είναι ο παραπάνω με την προσθήκη της παραμέτρου `ci` σε καθεμιά από τις συναρτήσεις:

```
ss.ca.cp(x, LSL = 1.5, USL = 2.5, ci=TRUE)  
ss.ca.cpk(x, LSL = 1.5, USL = 2.5, ci=TRUE)
```

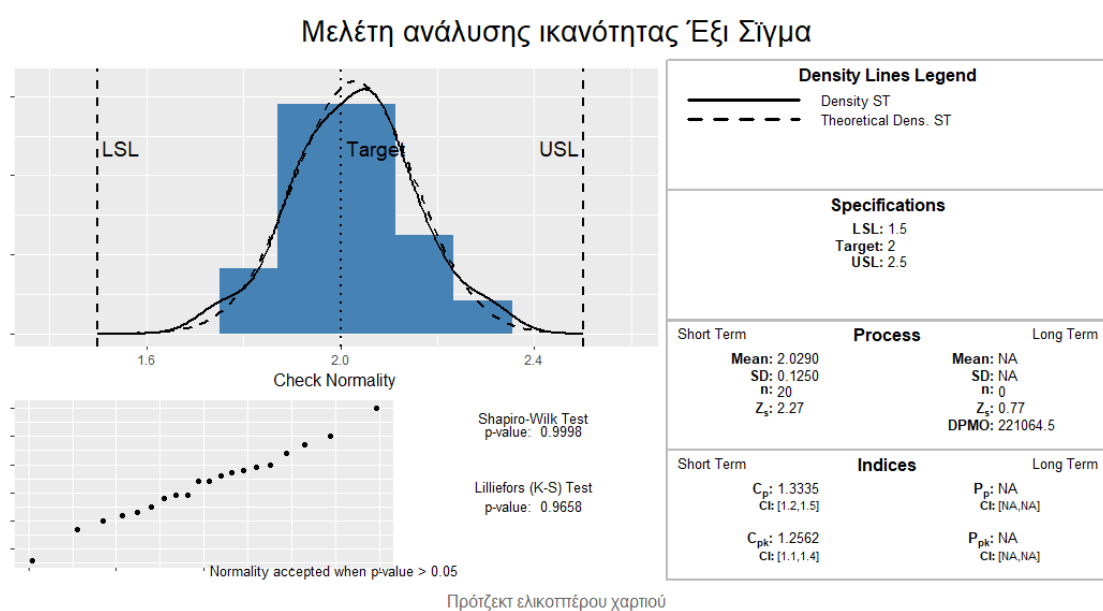
Τα διαστήματα εμπιστοσύνης που προκύπτουν είναι:

```
[1] 0.9130307 1.7535353  
[1] 0.8309161 1.6814859
```

Η τιμή του δείκτη ικανότητας C_p αναμένουμε ότι θα βρίσκεται μέσα στο διάστημα τιμών [0.9130307, 1.7535353] και η αντίστοιχη τιμή του δείκτη ικανότητας C_{pk} ότι θα βρίσκεται στο διάστημα τιμών [0.8309161, 1.6814859].

Ολοκληρώνοντας την ανάλυση Ικανότητας της διεργασίας, θα εξάγουμε και ένα γράφημα που είναι η μελέτη ικανότητας διεργασίας χρησιμοποιώντας τον παρακάτω κώδικα:

```
ss.study.ca(x, LSL = 1.5, USL = 2.5, Target = 2, alpha = 0.5,
  f.main = "Μελέτη ανάλυσης ικανότητας 6σ",
  f.sub = "Πρότζεκτ ελικοπτέρου χαρτιού")
```



Σχήμα 8.13.: Μελέτη Ανάλυσης Ικανότητας

Ουσιαστικά στην παραπάνω γραφική παράσταση βλέπουμε στο άνω αριστερά διάγραμμα, ένα ιστόγραμμα των διαθέσιμων δεδομένων, το οποίο περιλαμβάνει την τιμή στόχο (2) και τα όρια προδιαγραφών (1.5 και 2.5). Η συνεχόμενη γραμμή αντιστοιχεί στη βραχυπρόθεσμη εμπειρική πυκνότητα (κατανομή) και η διακεκομμένη γραμμή αντιστοιχεί στη βραχυπρόθεσμη θεωρητική πυκνότητα (κατανομή).

Το κάτω διάγραμμα είναι ένα Q-Q plot το οποίο χρησιμοποιείται για να διερευνηθούν εάν τα δεδομένα κατανέμονται κανονικά. Η κανονικότητα υπάρχει, όταν τα σημεία είναι περίπου σε μια ευθεία γραμμή. Από το γράφημα έχουμε μια

ένδειξη μη – κανονικότητας των δεδομένων. Επιπλέον δίπλα από το Q-Q plot δίνονται τα δύο πιο κοινά στατιστικά τέστ για την κανονικότητα των δεδομένων. Αυτό των Shapiro – Wilk και των Kolmogorov – Smirnov τεστ. Η κανονικότητα είναι αποδεκτή όταν η τιμή p είναι μεγαλύτερη από το 0.05 (αν π.χ. το ε.σ. στο οποίο διεξάγεται το τεστ είναι στο 5%) Αφού και τα δύο αυτά τέστ δίνουν τιμές μεγαλύτερες από το 0,05 (0,9998 και 0,9658) δεν απορριπτούμε τη μηδενική υποθέση και επομένως μπορούμε να δεχτούμε την κανονικότητα των δεδομένων μας.

Στη δεξιά πλευρά του Σχήματος 8.13. έχουμε τα δεδομένα της ανάλυσης. Πιο συγκεκριμένα, δίνονται τα όρια προδιαγραφών και η τιμή στόχος που εισαγάγαμε στον τύπο της συνάρτησης. Στο κουτί που γράφει Process δίνονται ο μέσος όρος, η τυπική απόκλιση, το μέγεθος του δείγματος και η απόδοση της διαδικασίας βραχυπρόθεσμα. Η απόδοση της διαδικασίας δίνεται και μακροπρόθεσμα. Επιπρόσθετα δίνεται και η τιμή για τα DPMO. Παρατηρούμε διαφορά ανάμεσα στη βραχυπρόθεσμη απόδοση και τη μακροπρόθεσμη απόδοση. Τέλος στο τελευταίο ορθογώνιο παρουσιάζονται οι βραχυπρόθεσμοι δείκτες ικανότητας καθώς επίσης και τα αντίστοιχα διαστήματα εμπιστοσύνης.

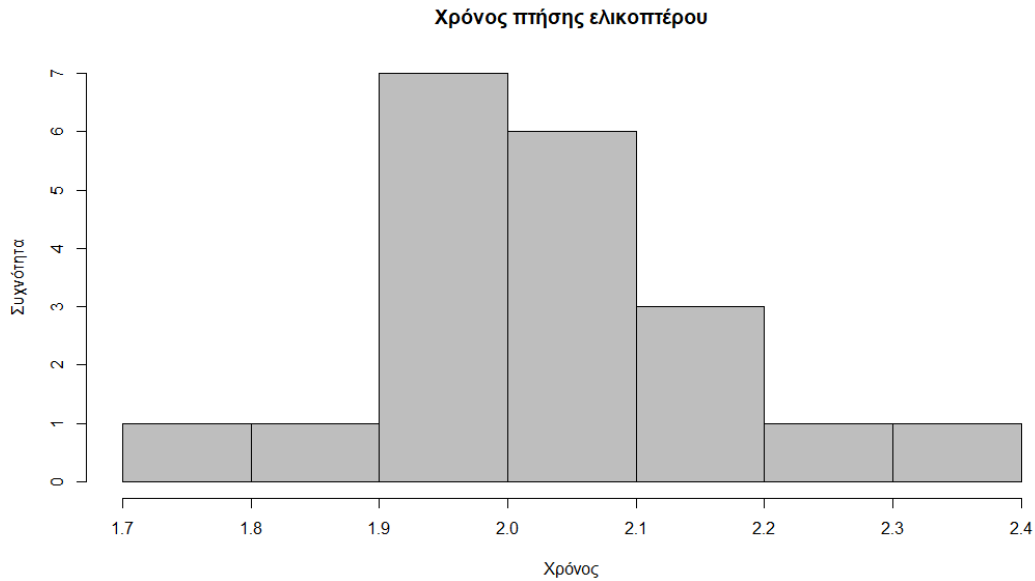
Παρατηρούμε ότι, ο δείκτης ικανότητας $C_{pk} = 1.2562 < 1.33$ γεγονός που υποδηλώνει ότι η διαδικασία χρειάζεται παρακολούθηση.

8.3. Φάση Ανάλυσης

Στη φάση αυτή, τα δεδομένα που έχουμε συλλέξει χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των βασικών καταχωρήσεων της διαδικασίας και της σχέσης τους με τα αποτελέσματα της διαδικασίας. Θα σχεδιάσουμε διάφορα διαγράμματα με χρήση της R για τα δεδομένα του χρόνου πτήσης του ελικοπτέρου χαρτιού καθώς επίσης και τα δεδομένα που υπάρχουν στον Πίνακα 8.2.

Αρχικά με τον παρακάτω κώδικα θα λάβουμε ένα ιστόγραμμα για τα δεδομένα του Πίνακα 8.1.

```
hist(x, main = "Χρόνος πτήσης ελικοπτέρου",  
     xlab = "Χρόνος", ylab = "Συχνότητα", col = "grey")
```



Σχήμα 8.14: Ιστόγραμμα για τα δεδομένα του Πίνακα 1

Παρατηρούμε ότι τα δεδομένα φαίνεται να προέρχονται από κανονική κατανομή με μέσο γύρο στο 2.

Συνεχίζοντας θα βελτιώσουμε το ιστόγραμμα βάζοντας πάνω μια γραμμή πυκνότητας για μια θεωρητική κανονική κατανομή της οποίας η μέση τιμή είναι 2 και η τυπική απόκλιση είναι 0.1. Μια επισημείωση δίπλα από τη γραμμή δείχνει τις παραμέτρους. Αυτό προκύπτει χρησιμοποιώντας τον παρακάτω κώδικα:

```
hist(x, main = "Χρόνος πτήσης ελικοπτέρου",
     xlab = "Χρόνος", ylab = "Συχνότητα", col = "grey", border = "white",
     freq = FALSE, ylim = c(0,7))

curve(dnorm(x,2,0.1), add = TRUE, lty = 2, lwd = 2, col = "blue")

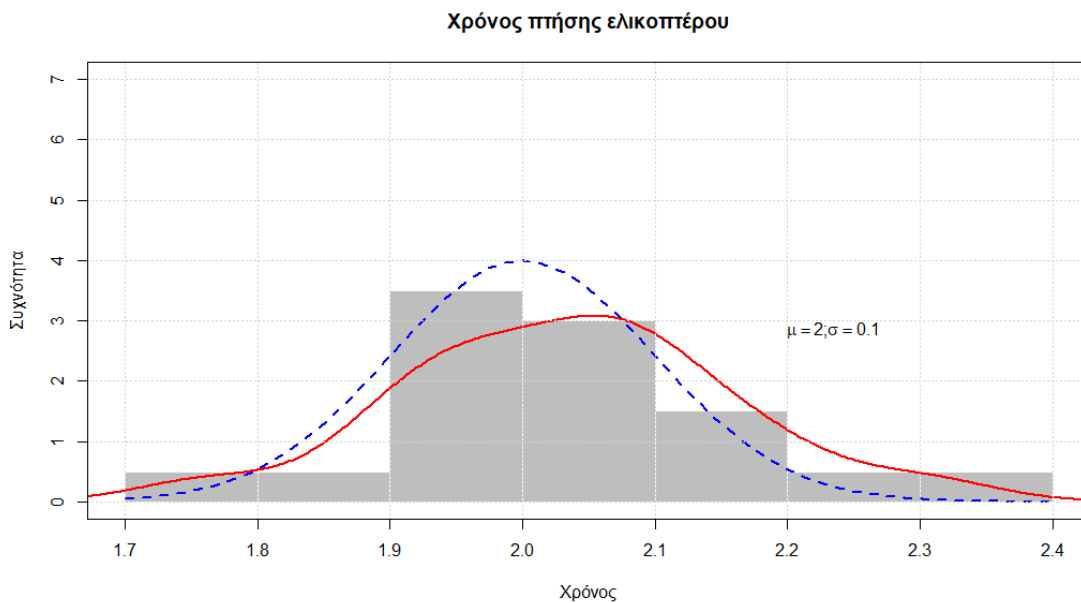
lines(density(x), lwd = 2, col = "red")

text(label = expression(paste(mu ==2, ";", sigma ==0.1, sep = "")), x=2.2, y=3,
     adj = c(0,1))

grid()

box()
```

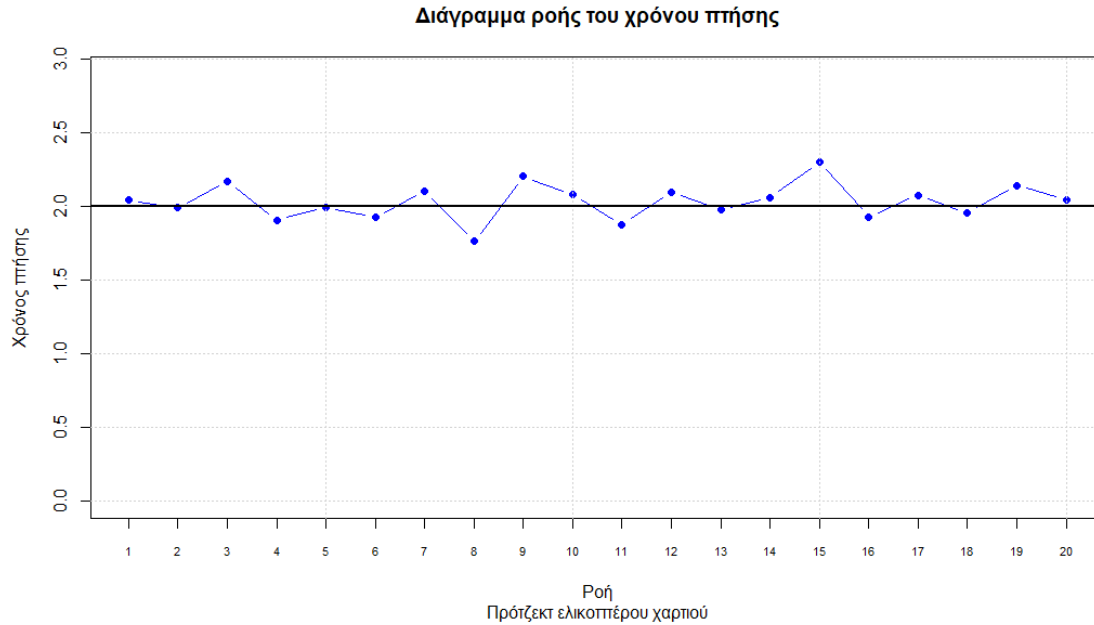
Η συμπαγής γραμμή (κόκκινη) είναι η γραμμή πυκνότητας για τα δεδομένα. Η διακεκομμένη γραμμή (μπλε) είναι η θεωρητική γραμμή πυκνότητας για την κανονική κατανομή. Οι παράμετροι αυτής της θεωρητικής κατανομής παρουσιάζονται σαν επισημείωση δίπλα από τη διακεκομμένη γραμμή.



Σχήμα 8.15. Ιστόγραμμα με γραμμές πυκνότητας (δεδομένα Πίνακα 1).

Στη συνέχεια, θα κατασκευάσουμε ένα διάγραμμα ροής για να ανιχνεύσουμε τυχόν μοτίβα, τα οποία είναι ένδειξη για αλλαγές στη διαδικασία. Οι αλλαγές συνεπάγονται μεταβλητότητα και συνεπώς λιγότερη ποιότητα. Τα δεδομένα που θα χρησιμοποιήσουμε είναι αυτά του Πίνακα 8.1 και ο κώδικας ο ακόλουθος.

```
plot(data$Xronosptisis, type= "b", pch = 16, col = "blue", ylim = c(0, 2.9),
      axes = FALSE, main = "Διάγραμμα ροής του χρόνου πτήσης",
      sub = "Πρότζεκτ ελικοπτέρου χαρτιού",
      xlab = "Ροή", ylab = "Χρόνος πτήσης")
axis(1, at = 1:20, cex.axis = 0.7)
axis(2)
box()
grid()
abline(h = 2, lwd = 2)
```

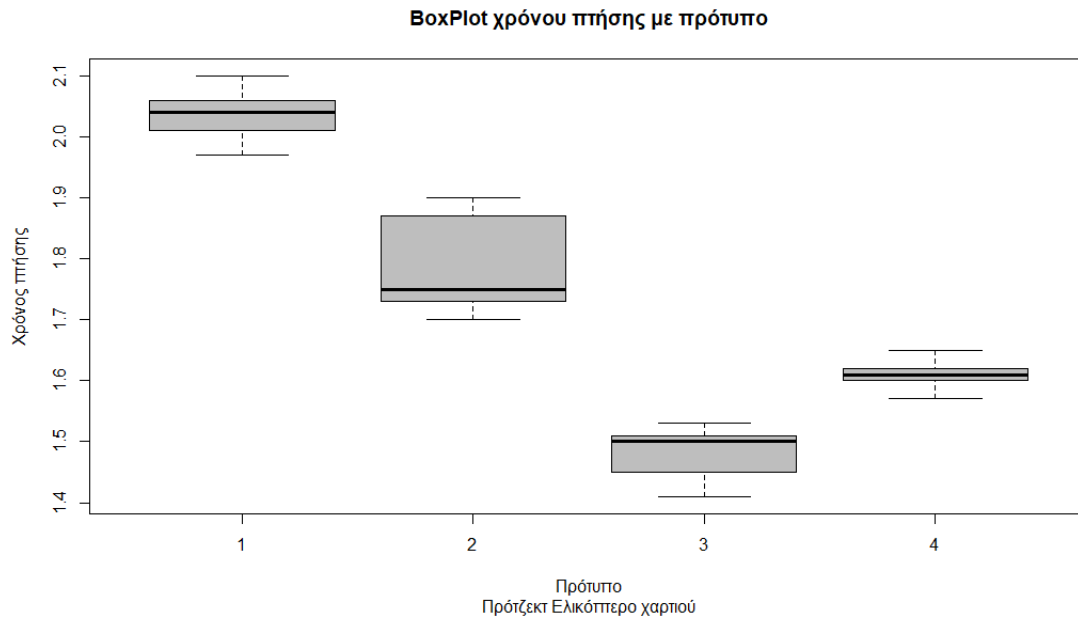


Σχήμα 8.16: Διάγραμμα ροής για τα δεδομένα του πίνακα 8.1

Παρατηρούμε στο γράφημα ότι έχουμε 20 ταξινομημένες παρατηρήσεις ως προς το χρόνο που ελήφθησαν οι μετρήσεις. Δεν παρατηρείται κάποιου είδους μοτίβο (τάση, κύκλος, μετατόπιση) στην εξέλιξη της διαδικασίας. Επομένως μπορούμε να την θεωρήσουμε ικανοποιητική και ότι δε χρήζει κάποιου είδους αναθεώρηση.

Στη συνέχεια θα δημιουργήσουμε ένα boxplot για να διαπιστώσουμε αν υπάρχουν διαφορές μεταξύ των 4 προτύπων ελικοπτερου στο χρόνο πτήσης και να εντοπίσουμε αν υπάρχουν ακραίες τιμές. Για να λάβουμε το boxplot χρησιμοποιούμε τον ακόλουθο κώδικα. Τα δεδομένα είναι αυτά που βρίσκονται στον Πίνακα 8.2.

```
boxplot(Χρονosptisis~Protyπο, data=protyπα, col = "grey",
        main = "BoxPlot χρόνου πτήσης με πρότυπο",
        sub = "Πρότζεκτ Ελικόπτερο χαρτιού",
        xlab = "Χρόνος πτήσης",
        ylab = "Πρότυπο")
```

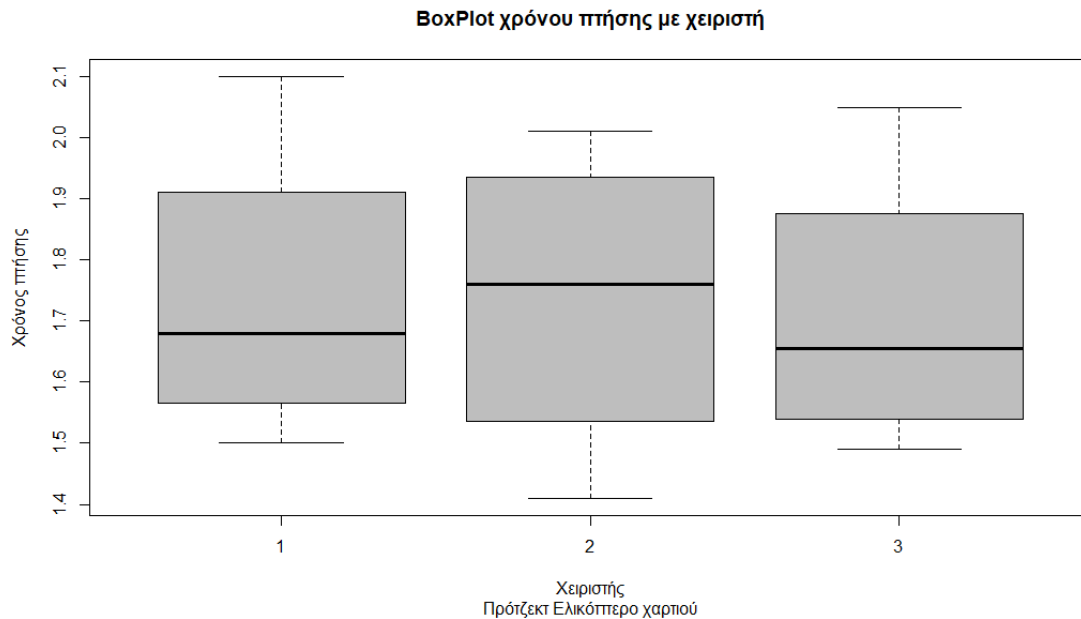



Σχήμα 8. 17: Boxplot για τα δεδομένα του Πίνακα 8.2 για τα πρότυπα.

Ο χρόνος πτήσης του 2^{ου} προτύπου είναι περισσότερο απλωμένος (μεγαλύτερη μεταβλητότητα) από τα υπόλοιπα πρότυπα. Αντίθετα ο χρόνος πτήσης του 4^{ου} προτύπου είναι πολύ μαζεμένος (μικρότερη μεταβλητότητα). Επιπλέον παρατηρούμε διαφορές στους χρόνους πτήσης των τεσσάρων προτύπων. Τέλος δεν υπάρχουν ακραίες τιμές και τα δεδομένα κυρίως στο πρότυπο 2 και 3 δεν είναι καθόλου κεντραρισμένα (συμμετρικά).

Θα δημιουργήσουμε τώρα ένα boxplot για να διαπιστώσουμε αν υπάρχουν διαφορές μεταξύ των 3 χειριστών του ελικοπτερου στο χρόνο πτήσης και να εντοπίσουμε αν υπάρχουν ακραίες τιμές. Τα δεδομένα είναι αυτά που βρίσκονται στον Πίνακα 8.2 και ο κώδικας είναι ο ακόλουθος.

```
boxplot(Χρονosptisis~Χειριστής, data=protypa, col = "grey",
  main = "BoxPlot χρόνου πτήσης με χειριστή",
  sub = "Πρότζεκτ Ελικόπτερο χαρτιού",
  xlab = "Χρόνος πτήσης",
  ylab = "Χειριστής")
```



Σχήμα 8.18: Boxplot για τα δεδομένα του Πίνακα 2 για τους χειριστές.

Παρατηρούμε ότι τα δεδομένα του χρόνου πτήσης των ελικοπτέρων με τον 2^ο χειριστή είναι ελαφρώς πιο απλωμένα από τους άλλους 2 και πιο κεντραρισμένα. Επίσης παρατηρούμε ότι δεν υπάρχουν ακραίες τιμές.

8.4. Φάση Βελτίωσης

Στη φάση αυτή θα προσδιορίσουμε τις αιτίες που επηρεάζουν την απόδοση της διαδικασίας και του χρόνου πτήσης του ελικοπτέρου. Θα διεξάγουμε ένα πείραμα για να ανακαλύψουμε τις σχέσεις αιτίου – αποτελέσματος μεταξύ των παραγόντων που προσδιορίσαμε.

Ας υποθέσουμε πως έπειτα από μελέτη που πραγματοποιήθηκε καταλήξαμε στο συμπέρασμα ότι οι αιτίες που επηρεάζουν την απόδοση της διαδικασίας και του χρόνου πτήσης του ελικοπτέρου είναι: **το μήκος των φτερών, το μήκος σώματος και το πλάτος σώματος**. Έτσι θα διεξαχθεί ένα πείραμα για να καθοριστούν τα βέλτιστα επίπεδα των τριών βασικών διαστάσεων του ελικοπτέρου. Οι υπόλοιπες διαστάσεις και τα εξαρτήματα (κολλητική ταινία και συνδετήρας) δε λαμβάνονται υπόψη καθώς δεν επηρεάζουν τον χρόνο πτήσης του ελικοπτέρου. Επομένως έχουμε 3 παράγοντες με 2 επίπεδα ο κάθε παράγοντας (“-” και “+”). Για να καταγράψουμε τα δεδομένα, μπορούμε να κατασκευάσουμε ένα φύλλο δεδομένων χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο κώδικα:

```

Helicopter.Design <- expand.grid(mikos.fterwn = gl(2,1,labels = c("-", "+")),
                                mikos.swmatos = gl(2,1,labels = c("-", "+")),
                                platos.swmatos = gl(2,1,labels = c("-", "+")),
                                score = NA)

Helicopter.Design

```

Σημειώνεται ότι έχουμε 8 διαφορετικά πειράματα (πτητικές δοκιμές) που περιλαμβάνουν όλους τους πιθανούς συνδυασμούς των τριών παραγόντων σε δύο επίπεδα.

	Mikos.fterwn	Mikos.swmatos	Platos.swmatos	score
1	-	-	-	NA
2	+	-	-	NA
3	-	+	-	NA
4	+	+	-	NA
5	-	-	+	NA
6	+	-	+	NA
7	-	+	+	NA
8	+	+	+	NA

Μόλις σχεδιαστεί το πείραμα, προχωράμε στην τυχαιοποίηση του. Μπορούμε να προσθέσουμε μια στήλη στον πίνακα σχεδιασμού, με την σειρά των δοκιμών να είναι τυχαία, και να ταξινομήσουμε τις γραμμές του πίνακα σχεδιασμού ακολουθώντας μια τυχαία σειρά με τον παρακάτω κώδικα:

```

Helicopter.Design$ord <- sample(1:8, 8)
Helicopter.Design [order(Helicopter.Design$ord),]

```

Έτσι λαμβάνουμε τον παρακάτω πίνακα σχεδιασμού:

	Mikos.fterwn	Mikos.swmatos	Platos.swmatos	score	ord
3	-	+	-	NA	1
7	-	+	+	NA	2
2	+	-	-	NA	3
1	-	-	-	NA	4
8	+	+	+	NA	5
5	-	-	+	NA	6
4	+	+	-	NA	7
6	+	-	-	NA	8

Στην συνέχεια γίνεται μια πτητική δοκιμή των ελικοπτέρων (οι ειδικοί που θα βαθμολογήσουν την κάθε δοκιμή δε γνωρίζουν τις διαστάσεις που χρησιμοποιούνται για κάθε πρότυπο ελικοπτέρου). Οι βαθμολογίες για καθεμία από τις οκτώ (2^3) πτητικές δοκιμές σε κάθε αναπαραγωγή του πειράματος φαίνονται στον Πίνακα 8.4. Για να εκτελέσουμε ANOVA στην R, διατηρούμε τα δεδομένα σε ένα πλαίσιο δεδομένων όπου κάθε σειρά αντιστοιχεί σε ένα από τα μεμονωμένα πειράματα. Χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο κώδικα αποκτάμε ένα R *data.frame* με δεδομένα από τον Πίνακα 8.4.

Πίνακας 8.4. : Βαθμολογίες πτητικών δοκιμών ελικοπτέρου

ΑΑ	Αναπαραγωγή 1	Αναπαραγωγή 2
Δοκιμή 1	3.30	3.77
Δοκιμή 2	4.02	4.80
Δοκιμή 3	2.51	3.42
Δοκιμή 4	6.83	7.51
Δοκιμή 5	3.02	3.49
Δοκιμή 6	5.19	4.32
Δοκιμή 7	4.41	3.98
Δοκιμή 8	7.29	7.04

Τα δεδομένα του Πίνακα 8.4. έχουν προσομοιωθεί και έχουν χρησιμοποιηθεί για λόγους πρακτικής εφαρμογής του 6σ.

Ο κώδικας με τον οποίο λαμβάνουμε τα δεδομένα για τις πτητικές δοκιμές είναι:

```

ss.data <- data.frame(rep1 = rep(1:2, each = 8),
                      rbind(helicopter.Design[, -6], helicopter.Design[, -6]))
ss.data$score <- c(3.30, 3.77, 4.02, 4.80, 2.51, 3.42, 6.83, 7.51, 3.02, 3.49, 5.19, 4.32,
                  4.41, 3.98, 7.29, 7.04)

```

	rep	mikosfterwn	mikosswmatos	platosswmatos	score	ord
1	1	-	-	-	3.40	4
2	1	+	-	-	4.02	1
3	1	-	+	-	2.51	3
4	1	+	+	-	6.83	8
5	1	-	-	+	3.02	5
6	1	+	-	+	5.19	2
7	1	-	+	+	4.41	7
8	1	+	+	+	7.29	6
9	2	-	-	-	3.77	4
10	2	+	-	-	4.80	1
11	2	-	+	-	3.42	3
12	2	+	+	-	7.51	8
13	2	-	-	+	3.49	5
14	2	+	-	+	4.32	2
15	2	-	+	+	3.98	7
16	2	+	+	+	7.04	6

Επιπλέον έχουμε τη δυνατότητα να πάρουμε το μέσο όρο για κάθε πτητική δοκιμή:

```

aggregate(score~mikos.fterwn+mikos.swmatos+platos.fterwn, FUN = mean,
          data=ss.data)

```

	Mikos.fterwn	mikos.swmatos	platos.swmatos	score
1	-	-	-	3.535
2	+	-	-	4.410
3	-	+	-	2.965
4	+	+	-	7.170
5	-	-	+	3.255
6	+	-	+	4.755
7	-	+	+	4.195
8	+	+	+	7.165

Η καλύτερη πτητική δοκιμή φαίνεται να είναι αυτή με το υψηλό επίπεδο του μήκους των φτερών και του μήκους του σώματος και χαμηλό επίπεδο στο πλάτος του σώματος. Πρέπει όμως να εφαρμόσουμε ένα γραμμικό μοντέλο και να κάνουμε μια ANOVA για να βρούμε τα σημαντικά αποτελέσματα (κύριες επιδράσεις ή/και αλληλεπιδράσεις). Χρησιμοποιούμε την συνάρτηση lm για να φτιάξουμε το μοντέλο:

```
doe.model1 <- lm(score~mikos.fterwn+mikos.swmatos+platos.swmatos+
                 mikos.fterwn*mikos.swmatos+mikos.fterwn*platos.swmatos+
                 mikos.swmatos*platos.swmatos+
                 mikos.fterwn*mikos.swmatos*platos.swmatos, data = ss.data)
summary (doe.model1)
```

```

Call:
lm(formula = score ~ mikos.fterwn+mikos.swmatos+platos.swmatos+
mikos.fterwn*mikos.swmatos+mikos.fterwn*platos.swmatos+
mikos.swmatos*platos.swmatos+ mikos.fterwn*mikos.swmatos*platos.swmatos,
data = ss.data)

Residuals:
Min          1Q          Median          3Q          Max
-0.4540    -0.2612         0.000         0.2612         0.4550

Coefficients:
              Estimate      Std. Error    t value    Pr(>|t|)
(Intercept)      3.5350         0.3233     10.934    4.34e-06 ***
mikos.fterwn+      0.8750         0.4572      1.914    0.092007 .
mikos.swmatos+    -0.5700         0.4572     -1.247    0.247797
platos.swmatos +  -0.2800         0.4572     -0.612    0.557288
mikos.fterwn+:mikos.swmatos+ 3.3300         0.6466      5.150    0.000875 ***
mikos.fterwn+:platos.swmatos+ 0.6250         0.6466      0.967    0.362073
mikos.swmatos+:platos.swmatos+1.5100         0.6466      2.335    0.047772 *
mikos.fterwn+:mikos.swmatos+:platos.swmatos+ -1.8600         0.9145     -2.034    0.076385 .
Signif. codes:  0 '***' 0.01 '**' 0.05 '.' 0.1 '.' 1

Residuals standard error: 0.4572 on 8 degrees of freedom
Multiple R – Squared: 0.9578, Adjusted R Squared: 0.9208
F – statistic: 25.93 on 7 and 8 DF, p-value: 6.84e-05

```

Εξετάζοντας τα p – value, μπορούμε να καταλάβουμε, με υψηλό επίπεδο εμπιστοσύνης, ότι οι κύριες επιδράσεις των τριών παραγόντων δεν είναι στατιστικά σημαντικές, όμως η αλληλεπίδραση του μήκους των φτερών με το μήκος σώματος είναι στατιστικά σημαντική.

Τώρα μπορούμε να απλοποιήσουμε το μοντέλο μας, εξαιρώντας τις μη σημαντικές επιδράσεις, αλληλεπιδράσεις. Έτσι το μοντέλο με τις σημαντικές επιδράσεις είναι:

```

doe.model2 <- lm(score~mikos.fterwn+mikos.swmatos+ mikos.fterwn*mikos.swmatos,
data = ss.data)

summary(doe.model2)

```

```

Call:
lm(formula = score~mikos.fterwn+mikos.swmatos+ mikos.fterwn*mikos.swmatos,
    data = ss.data)

Residuals:
Min          1Q          Median          3Q          Max
-1.0700     -0.2812      0.00000      0.3506      0.8300

Coefficients:
              Estimate      Std. Error    t value    Pr(>|t|)
(Intercept)    3.3950         0.2655     12.788    2.37e-08 ***
mikos.fterwn+  1.1875         0.3574      3.163    0.008175 **
mikos.swmatos + 0.1850         0.3754     -0.493    0.631075
mikos.fterwn+:mikos.swmatos+ 2.4000         0.5309      4.520    0.000702 ***
---
Signif. codes:  0 '***'  0.01 '**'  0.05 '.'  0.1 '.'  1

Residuals standard error: 0.5309 on 12 degrees of freedom
Multiple R-squared: 0.9146, Adjusted R-squared: 0.8933
F-statistic: 42.84 on 3 and 12 DF, p-value: 1.094e-06

```

Επίσης μπορούμε να λάβουμε τους συντελεστές του μοντέλου με την συνάρτηση `coef`:

```

coef(doe.model2)

(Intercept)    mikos.fterwn+    mikos.swmatos+    mikos.fterwn+:mikos.swmatos+
3.3950         1.1875           0.1850            2.4000

```

Επομένως, το στατιστικό μοντέλο για το πείραμά μας είναι:

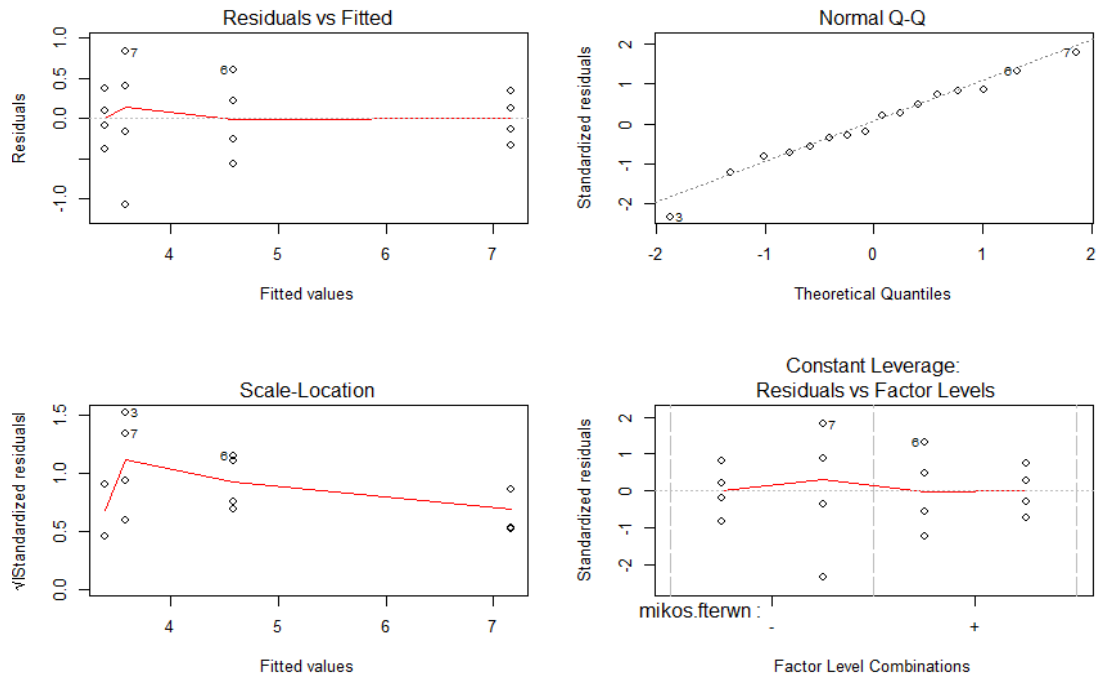
$$\widehat{score} = 3.3950 + 1.1875 \times (\text{μήκος φτερών}) + 0.1850 \times (\text{μήκος σώματος}) + 2.400 \times (\text{μήκος φτερών}) * (\text{μήκος σώματος})$$

Τα διαγνωστικά του μοντέλου μπορούν να γίνουν με ανάλυση των καταλοίπων. Μπορούμε να σχεδιάσουμε τα πρότυπα γραφήματα για γραμμικά μοντέλα με τον παρακάτω κώδικα:

```

par(mfrow=c(2,2))
plot(doe.model2)
box("outer")

```

Σχήμα 8.19.: Διαγνωστικοί Έλεγχοι για το πείραμα των πτητικών δοκιμών.

Από τα παραπάνω γραφήματα, δεν υπάρχουν σαφή μοτίβα στα κατάλοιπα. Από το γράφημα Normal Q – Q φαίνεται να μην υπάρχει απόκλιση από την υπόθεση της κανονικότητας των μετρήσεων.

Για να επιβεβαιώσουμε την κανονικότητα των καταλοίπων χρειάζεται και ένας στατιστικός έλεγχος. Ας δοκιμάσουμε δύο από τους στατιστικούς ελέγχους, αυτούς των Shapiro – Wilk και Kolmogorov – Smirnov.

```
shapiro.test(residuals(doe.model2))
library(nortest)
lillie.test(residuals(doe.model2))
```

Τα αποτελέσματα των δύο αυτών τεστ κανονικότητας φαίνονται πιο κάτω.

Shapiro – Wilk normality test

```
data: residuals(doe.model2)  
W=0.98273, p – value =0.9815
```

Lilliefors (Kolmogorov – Smirnov) normality test

```
data: residuals(doe.model2)  
D =0.089866, p- value = 0.9799
```

Από τα παραπάνω p – value τα οποία είναι μεγαλύτερα από οποιοδήποτε επίπεδο σημαντικότητας, δεν απορρίπτουμε την κανονικότητα των καταλοίπων.

8.5. Φάση Ελέγχου

Στη φάση αυτή πρέπει να παρακολουθούνται τα κέρδη που προέκυψαν από τις προηγούμενες τέσσερις φάσεις. Επιπλέον οι νέες συνθήκες της διαδικασίας πρέπει να τεκμηριώνονται. Το πιο αντιπροσωπευτικό εργαλείο ελέγχου είναι τα διαγράμματα ελέγχου.

Στην αρχή του συγκεκριμένου 6σ πρότζεκτ οι καταχωρήσεις της διαδικασίας ήταν οι χειριστές, τα εργαλεία, η πρώτη ύλη και οι εγκαταστάσεις. Επομένως θα κατασκευάσουμε τα διαγράμματα ελέγχου για αυτές τις μεταβλητές.

Ουσιαστικά ο κάτοχος Μαύρης Ζώνης της εταιρείας κατασκευής ελικοπτέρων χαρτιού θέλει να ελέγξει τον αριθμό των χειριστών που υπάρχουν σε κάθε εργοστάσιο και αν αυτός ο αριθμός προκαλεί προβλήματα (καθυστερήσεις) στις πτητικές δοκιμές που εκτελούνται. Ας υποθέσουμε ότι η εταιρεία έχει 10 εργοστάσια και ο αριθμός των χειριστών σε κάθε εργοστάσιο δίνεται στον Πίνακα 8.5. Ο κώδικας για να λάβουμε το διάγραμμα ελέγχου για τις μεμονωμένες τιμές καθώς επίσης και μια περίληψη είναι ο παρακάτω.

```
require(qcc)  
ergostasio.xbar.one <- with(data_xeiristes, qcc.groups(xeiristes, ergostasio))  
ergostasio.xbar.one <- qcc(ergostasio.xbar.one, type = "xbar.one")  
summary(ergostasio.xbar.one)
```

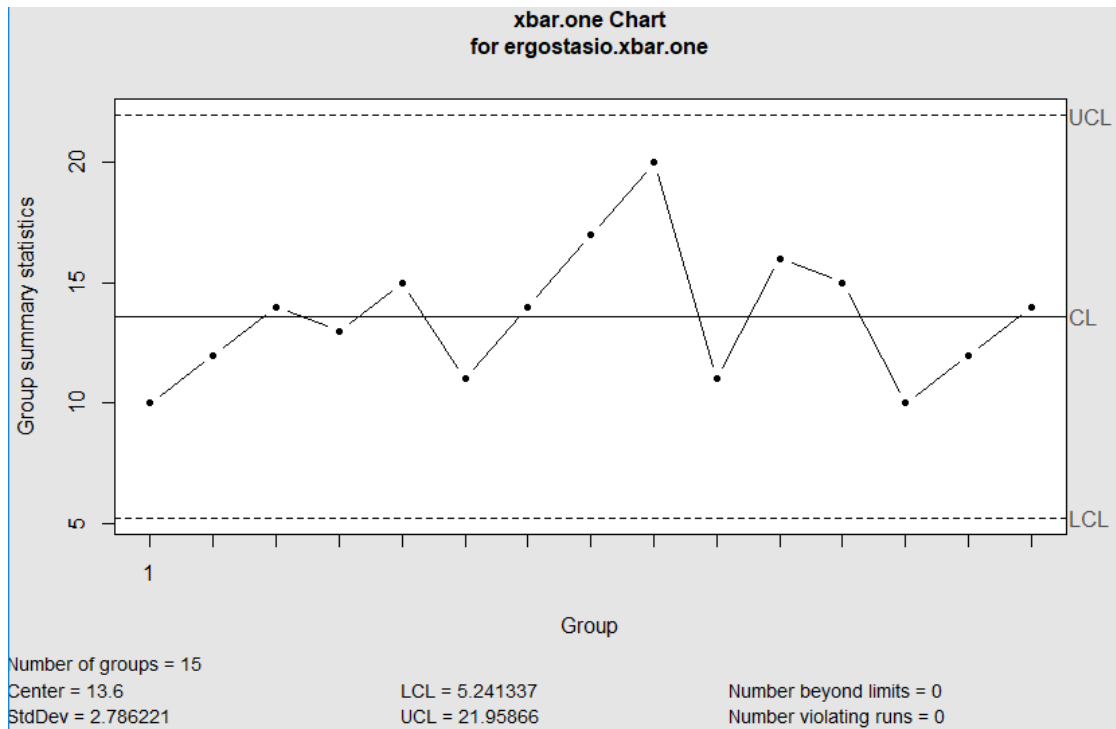
Πίνακας 8.5: Αριθμός χειριστών σε κάθε εργοστάσιο

Εργοστάσιο	Χειριστές
1	10
2	12
3	9
4	13
5	15
6	7
7	14
8	17
9	20
10	11

Τα δεδομένα του Πίνακα 8.5. έχουν προσομοιωθεί και έχουν χρησιμοποιηθεί για λόγους πρακτικής εφαρμογής του βσ.

Call: qcc(data = ergostasio.xbar.one, type = "xbar.one")					
Xbar.one chart for ergostasio.xbar.one					
Summary of group statistics:					
Min.	1 st Qu.	Median	Mean	3 rd Qu.	Max
10.0	11.5	14.0	13.6	15.0	20.00
Group sample size:	15				
Number of groups:	15				
Center of group statistics:	13.6				
Standard deviation:	2.786221				
Control limits:					
	LCL		UCL		
	5.241337		21.95866		

Το διάγραμμα ελέγχου που προκύπτει παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.20.:



Σχήμα 8.20: Διάγραμμα Ελέγχου Μεμονωμένων Τιμών.

Όπως παρατηρούμε δεν υπάρχει κανένα μεμονωμένο σημείο εκτός των ορίων ελέγχου ούτε κάποιο ύποπτο μοτίβο που να οδηγεί σε υπόθεση εκτός ελέγχου διαδικασίας. Σχεδιάζονται 15 μεμονωμένες παρατηρήσεις με την κεντρική γραμμή να βρίσκεται στο 13.6 και το άνω και κάτω όριο ελέγχου στις τιμές 5.241337 και 21.95886 αντίστοιχα. Η τυπική απόκλιση αντιστοιχεί στην τιμή 2.786221.

Στη γραμμή παραγωγής, μετριέται ο αριθμός των πρώτων υλών (χαρτί, κολλητική ταινία, συνδετήρας) προτού αρχίσει η κατασκευή των ελικοπτέρων. Για το λόγο αυτό, λαμβάνονται 5 δείγματα από κάθε παρτίδα και ο συνολικός αριθμός των παρτίδων είναι 10. Τα δεδομένα αυτά παρουσιάζονται στον Πίνακα 8.6. Με τον παρακάτω κώδικα θα λάβουμε το \bar{X} διάγραμμα ελέγχου για τις 10 ομάδες (παρτίδες) μεγέθους 5.

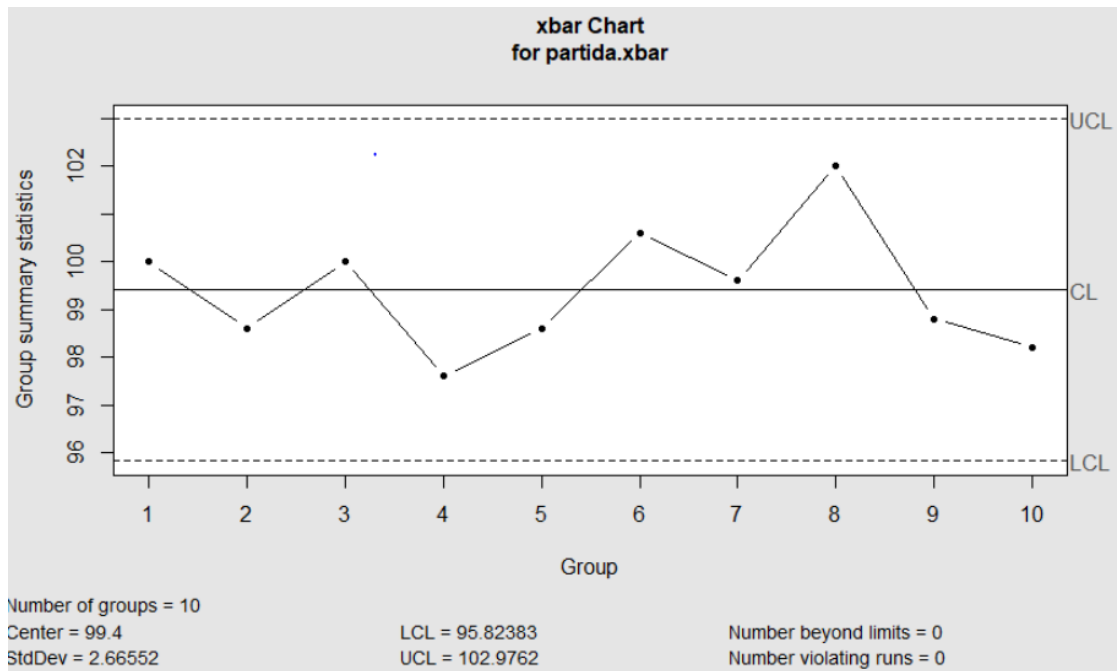
```
partida.xbar <- with(prwtesiles, qcc.groups(prwtesiles, partida))
partida.xbar <- qcc(partida.xbar, type = "xbar")
summary(partida.xbar)
plot(partida.xbar)
```

Πίνακας 8.6: Αριθμός πρώτων υλών σε κάθε παρτίδα

Παρτίδα	Πρώτες Υλες	Παρτίδα	Πρώτες Υλες
1	100	6	100
	98		100
	102		101
	101		100
	99		102
2	97	7	99
	96		99
	99		99
	100		100
	101		101
3	104	8	101
	99		102
	95		105
	102		103
	100		99
4	100	9	97
	101		100
	93		106
	96		95
	98		96
5	97	10	100
	101		101
	103		97
	95		99
	97		94

Τα δεδομένα του Πίνακα 8.6. έχουν προσομοιωθεί και έχουν χρησιμοποιηθεί για λόγους πρακτικής εφαρμογής του 6σ.

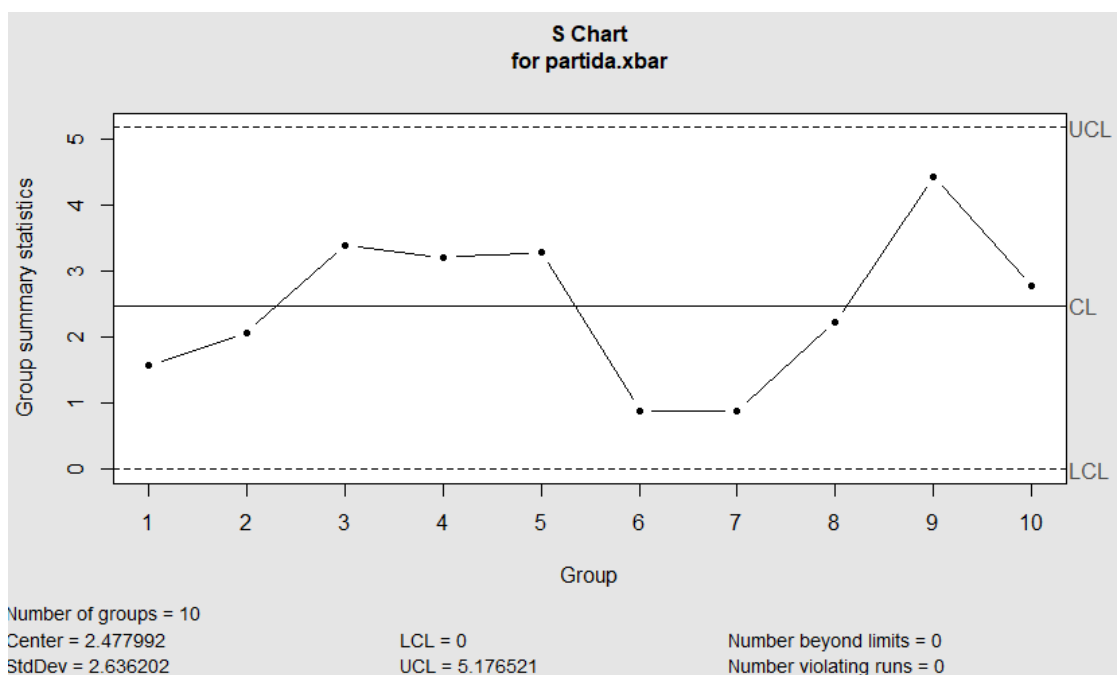
Call:					
qcc(data = partida.xbar, type = "xbar")					
xbar chart for partida.xbar					
Summary of groups statistics:					
Min.	1 st Qu.	Median	Mean	3 rd Qu.	Max
97.6	98.6	99.2	99.4	100.0	102.0
Group sample size:	5				
Number of groups:	10				
Center of group statistics:	99.4				
Standard deviation:	2.66552				
Control limits:					
LCL	UCL				
95.82382	102.9762				



Σχήμα 8.21.: \bar{X} διάγραμμα ελέγχου

Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει κάποιο σημείο εκτός των ορίων ελέγχου. Στο σχήμα παρουσιάζονται επίσης η κεντρική γραμμή $CL = 99.4$ και τα όρια ελέγχου $LCL = 95.82383$ και $UCL = 102.9762$.

Με τον ίδιο κώδικα που δώσαμε πιο πάνω, αλλάζοντας απλώς την τιμή του ορίσματος στη συνάρτηση qcc από "xbar" σε "S" θα πάρουμε το S διάγραμμα ελέγχου. Δίνεται στο Σχήμα 8.22.



Σχήμα 8.22: S διάγραμμα ελέγχου

Παρατηρούμε ότι δεν υπάρχει κάποιο σημείο εκτός των ορίων ελέγχου. Στο σχήμα παρουσιάζονται επίσης η κεντρική γραμμή $CL = 2.477992$ και τα όρια ελέγχου $LCL = 0$ και $UCL = 5.176521$. Η τυπική απόκλιση είναι 2.636202.

Ένα CTQ χαρακτηριστικό στη διαδικασία κατασκευής ελικοπτέρου χαρτιού είναι το ποσοστό των παραγγελιών που εκτελούνται έγκαιρα (Y). Στο πλαίσιο ενός 6σ πρότζεκτ ανακαλύφθηκε ότι ένας από τους παράγοντες που επηρεάζουν τον χρόνο παράδοσης είναι η έλλειψη κατάλληλων πρώτων υλών, όταν η παραγγελία φτάνει στο εργοστάσιο. Ως εκ τούτου, έχει σχεδιαστεί ένα διάγραμμα ελέγχου για την παρακολούθηση και τον έλεγχο του ποσοστού των παραγγελιών που είναι εκτός αποθέματος. Καθώς ο αριθμός των παραγγελιών που λαμβάνονται καθημερινά δεν είναι σταθερός, το διάγραμμα ελέγχου θα παρουσιάζει μεταβλητά όρια ελέγχου. Ο Πίνακας 8.7 περιέχει τα ημερήσια αποθέματα και των αριθμών των παραγγελιών 20 ημερών παραγωγής.

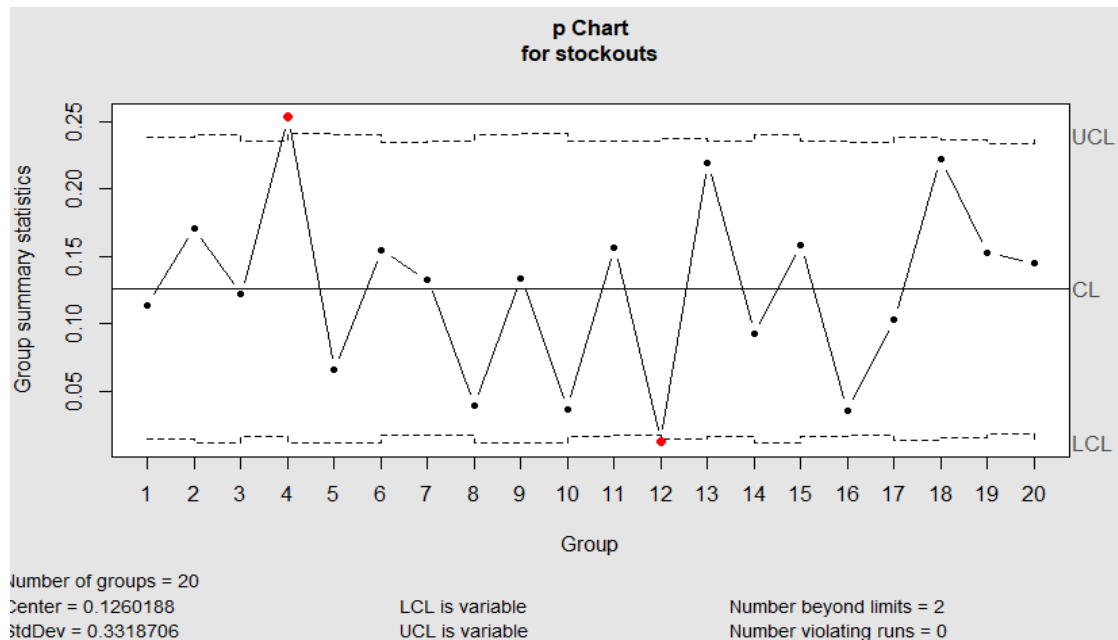
Πίνακας 8.7: Δεδομένα για τα αποθέματα και τον αριθμό των παραγγελιών

Ημέρα	Αποθέματα	Αριθμός παραγγελιών
1	9	79
2	13	76
3	10	82
4	19	75
5	5	76
6	13	84
7	11	83
8	3	76
9	10	75
10	3	82
11	13	83
12	1	80
13	18	82
14	7	76
15	13	82
16	3	84
17	8	78
18	18	81
19	13	85
20	11	76

Τα δεδομένα του Πίνακα 8.7. έχουν προσομοιωθεί και έχουν χρησιμοποιηθεί για λόγους πρακτικής εφαρμογής του βσ.

Το p -διάγραμμα που παρουσιάζεται στο Σχήμα 8.23. σχεδιάστηκε χρησιμοποιώντας τον ακόλουθο κώδικα.

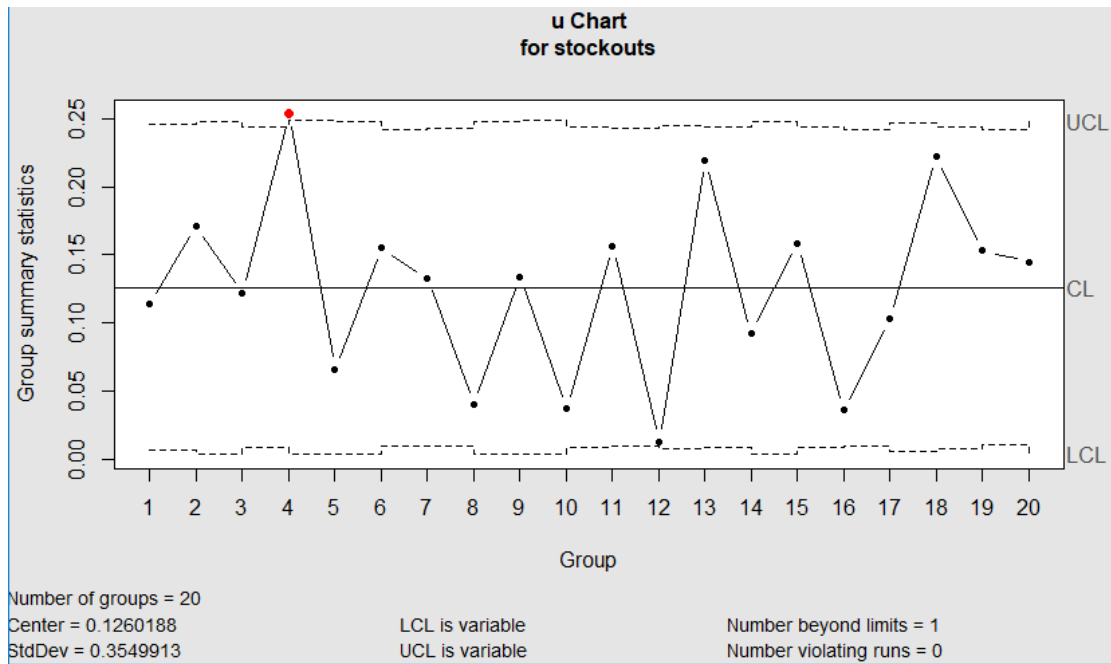
```
with(data8, plot(qcc(stockouts, orders, type = "p")))
```

Σχήμα 8.23.: p – διάγραμμα

Παρατηρούμε ότι η 4^η και η 12^η μέρα δίνουν σημεία εκτός ελέγχου, και συγκεκριμένα η 4^η ημέρα σημείο πάνω από το άνω όριο ελέγχου και η 12^η ημέρα σημείο κάτω από το κάτω όριο ελέγχου. Επιπρόσθετα παρατηρούμε ότι τα όρια ελέγχου είναι μεταβλητά, ενώ η κεντρική γραμμή είναι σταθερή και ίση με 0,1260188. Ο αριθμός των ομάδων είναι 20 και η τυπική απόκλιση της εν λόγω διαδικασίας ισούται με 0,3318706.

Η εντολή για τον σχεδιασμό του διαγράμματος ελέγχου με το πακέτο qcc είναι η ίδια, παίρνοντας ως όρισμα τύπου το «u». Το αποτέλεσμα φαίνεται στο Σχήμα 8.24. Στην προκειμένη περίπτωση έχουμε να κάνουμε με αριθμό ελαττωμάτων ανά μονάδα ελέγχου και όχι με ποσοστό ελαττωματικών όπως στο p-διάγραμμα ελέγχου.



Σχήμα 8.24: u – διάγραμμα ελέγχου

Παρατηρούμε ότι η 4^η μέρα δίνει σημείο εκτός ελέγχου, και συγκεκριμένα σημείο πάνω από το άνω όριο ελέγχου. Επιπρόσθετα παρατηρούμε ότι τα όρια ελέγχου είναι μεταβλητά, ενώ η κεντρική γραμμή είναι σταθερή και ίση με 0,1260188. Ο αριθμός των ομάδων είναι 20 και η τυπική απόκλιση της εν λόγω διαδικασίας ισούται με 0,3549913.

8.6. Σύνοψη

Χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα 6σ είχαμε σκοπό τη βελτίωση της διαδικασίας κατασκευής ελικοπτέρου χαρτιού. Αρχικά προσδιορίστηκαν ποιες είναι οι καταχωρήσεις της διαδικασίας και ορίστηκε ότι το CTQ χαρακτηριστικό της είναι ο χρόνος πτήσης του ελικοπτέρου και ορίστηκε να είναι στα 2sec. Στην συνέχεια προσδιορίστηκαν οι αιτίες που προκαλούν ελαττώματα και εντοπίστηκαν οι πιο σημαντικές από αυτές. Αφού ξέρουμε ποιες αιτίες επηρεάζουν το χρόνο πτήσης του ελικοπτέρου θα είμαστε πιο προσεκτικοί με αυτές όταν κατασκευάζουμε το ελικόπτερο και όταν εκτελούμε πτητική δοκιμή. Πραγματοποιώντας ανάλυση ικανότητας της διαδικασίας είδαμε ότι χρειάζεται παρακολούθηση. Μέσω διαγραμμάτων είδαμε ότι υπάρχουν διαφορές στο χρόνο πτήσης ανάλογα με τον χειριστή και το πρότυπο. Για να αποφασίσουμε πιο πρότυπο είναι το ιδανικό,

πραγματοποιήσαμε ένα πείραμα, όπου οι κύριοι παράγοντες ήταν το μήκος φτερών, μήκος σώματος και πλάτος σώματος. Από το πείραμα καταλήξαμε ότι η καλύτερη πτητική δοκιμή είναι αυτή με το υψηλό επίπεδο μήκος φτερών και μήκος σώματος και χαμηλό επίπεδο πλάτος σώματος. Έτσι λοιπόν όταν κατασκευάζουμε ελικόπτερο θα έχουμε υπόψη μας να ακολουθούνται αυτές οι διαστάσεις. Επειδή στις αρχικές καταχωρήσεις ήταν και οι χειριστές και η πρώτη ύλη μέσω διαγραμμάτων ελέγχου παρακολουθούσαμε αν ο αριθμός των χειριστών ανά εργοστάσιο είναι ικανοποιητικός και δεν προκαλεί αλλαγές στη διαδικασία. Επίσης ελέγξαμε αν η έλλειψη κατάλληλων πρώτων υλών, όταν η παραγγελία φτάνει στο εργοστάσιο επιφέρει αλλαγές. Παρακολουθήσαμε λοιπόν το ποσοστό των παραγγελιών που είναι εκτός αποθέματος σε 20 ημέρες παραγωγής. Είδαμε ότι σε κάποιες μέρες είχαμε σημεία εκτός των ορίων ελέγχου. Καταλαβαίνουμε λοιπόν ότι είναι σημαντικό να υπάρχουν οι κατάλληλες πρώτες ύλες στο εργοστάσιο κατά τη διάρκεια κατασκευής του ελικοπτέρου.

Συνοψίζοντας το πρόγραμμα 6σ βελτίωσε τη διαδικασία καθώς είδαμε ποιοι παράγοντες προκαλούν ελαττώματα στην κατασκευή του ελικοπτέρου και κατ' επέκταση στο χρόνο πτήσης του. Επομένως θα είμαστε προσεκτικοί με τους εν λόγω παράγοντες. Προσδιορίστηκαν επίσης οι ιδανικές διαστάσεις του ελικοπτέρου και έτσι δε θα χρειάζεται να φτιάχνουμε διάφορα πρότυπα μέχρι να βρεθεί το ιδανικό. Επίσης οι διάφοροι χειριστές επηρεάζουν το χρόνο πτήσης του, και έτσι θα επικεντρωθούμε σε αυτούς που οι χρόνοι πτήσης τους δεν έχουν μεγάλες διαφορές ο ένας από τον άλλο. Έτσι η εταιρεία θα εστιάσει την προσοχή της στα παραπάνω για να βελτιώσει τη διαδικασία.

Κεφάλαιο 9

Κριτική - Σχόλια έναντι του 6σ

9.1. Διαγράμματα ελέγχου και σχεδιασμός πειραμάτων

Τα διαγράμματα ελέγχου είναι εξαιρετικά σημαντικά στην προσπάθεια να διασφαλίσουμε ότι η διαδικασία είναι εντός ελέγχου. Χρησιμοποιούνται όμως και πριν την πραγματοποίηση ενός πειράματος για να προσδιορίσουν τις μεταβλητές που θα χρησιμοποιηθούν σε ένα πείραμα. Η πιο πάνω διατύπωση αποτυπώνεται από τους Hale- Bannete και Lin (1997), οι οποίοι έδειξαν πως ένα πριονωτό μοτίβο σε ορισμένα διαγράμματα ελέγχου, οδήγησε στον προσδιορισμό ενός αποτελέσματος θέσης σε μια διαδικασία ζωγραφικής, έτσι ώστε η θέση να είναι μια από τις μεταβλητές που χρησιμοποιήθηκαν σε ένα επόμενο πείραμα.

Αυτή η ίδια γενική ιδέα συζητήθηκε από τον Czitrom (1997), ο οποίος δήλωσε «οι ευκαιρίες για βελτίωση της διαδικασίας που προσδιορίζονται κατά τη διάρκεια του στατιστικού ελέγχου μπορούν να αντιμετωπιστούν χρησιμοποιώντας μια παθητική συλλογή δεδομένων ή ένα σχεδιασμένο πείραμα.» (Ο όρος παθητική συλλογή δεδομένων που οφείλεται στον Lynch (βλέπε Lynch και Markie, 1997) αναφέρεται στην συλλογή δεδομένων όταν δεν υπήρξε καμία παρέμβαση στη διαδικασία.)

Είναι επίσης σημαντικό οι διαδικασίες να ελέγχονται όταν πραγματοποιείται ο σχεδιασμένος πειραματισμός.

Οι Box, Bisgraad και Fung (1990) συνέστησαν ότι μια διαδικασία πρέπει να φτάσει στην καλύτερη δυνατή κατάσταση ελέγχου προτού εκτελεστεί ένα πείραμα, και μετά να χρησιμοποιηθούν αποκλεισμοί και τυχαιοποίηση. Εάν γνωρίζαμε ότι οι μέσες τιμές μίας ή περισσότερων μεταβλητών διαδικασίας άλλαξαν και αυτές οι αλλαγές επηρεάζουν την απόδοση της διαδικασίας, θα θέλαμε να βεβαιωθούμε ότι πραγματοποιήσαμε ένα πείραμα με τέτοιο τρόπο ώστε οι τυποποιημένες και οι πειραματικές διαδικασίες να συγκρίνονται, όταν οι μέσες τιμές αυτών των μεταβλητών διαδικασίας ήταν σταθερές.

9.2. 6σ προγράμματα

Ένας τρόπος για να εξηγήσουμε πως μπορούν να χρησιμοποιηθούν μαζί διαφορετικά στατιστικά εργαλεία για τη βελτίωση της ποιότητας είναι να εξετάσουμε το 6σ πρόγραμμα της Motorola, το οποίο υιοθετήθηκε και από άλλες κορυφαίες εταιρείες.

Το 1988, η Motorola Inc., έγινε ένας από τους αποδέκτες του Εθνικού Βραβείου Ποιότητας Malcolm Baldrige, ενός βραβείου που καθιερώθηκε το 1987 για να βελτιώσει τον ανταγωνισμό της Αμερικανικής βιομηχανίας με άλλες χώρες και ιδίως την Ιαπωνία. Η Motorola αποδίδει μεγάλο μέρος της επιτυχίας της στο πρόγραμμα 6σ, το οποίο είναι ένα πρόγραμμα για τη βελτίωση της ποιότητας. Σε μια συνέντευξη που δημοσιεύθηκε το 1995 (Bemowski, 1995), ο Gary Tooker, Διευθύνων Σύμβουλος της Motorola Inc., δήλωσε: «Έχουμε εξοικονομήσει αρκετά δισεκατομμύρια δολάρια, το περασμένο έτος, λόγω της προσοχής μας στη βελτίωση της ποιότητας και των 6σ πρωτοβουλιών». Ομοίως το 1997 δηλώθηκε ότι η General Electric ελπίζει να εξοικονομήσει 7 – 10 δισεκατομμύρια δολάρια κατά την επόμενη δεκαετία. (Περιοδικό Wall Street, 13 Ιανουαρίου 1997).

Η Motorola μοιράστηκε αργότερα πληροφορίες σχετικά με το 6σ πρόγραμμά της. Συγκεκριμένα, στελέχη της IBM επισκέφθηκαν τη Motorola το 1989 για να μελετήσουν την προσέγγισή της. Ένα χρόνο αργότερα, η Διεύθυνση Εφαρμογής Συστημάτων της IBM βραβεύθηκε με το βραβείο Baldrige. Ο St. Clair (1995) περιέγραψε την IBM εφαρμογή ενός 6σ προγράμματος.

Ο McFadden (1993) συζήτησε τις υποθέσεις στις οποίες βασίζεται η 6σ προσέγγιση.

1. Κανονικότητα
2. Γνωστές τιμές του μέσου όρου και της τυπικής απόκλισης της διαδικασίας.
3. Οι δείκτες ικανότητας διεργασίας C_p και C_{pk} θεωρούνται παράμετροι και όχι στατιστικά δείγματα.
4. Οι μη συμμορφώσεις είναι ανεξάρτητες.

5. Μια αλλαγή στον μέσο όρο της διαδικασίας της τάξης του 1,5 σίγμα είναι πιθανόν να συμβεί, αλλά οι 6σ διαδικασίες βρίσκονται σε κατάσταση στατιστικού ελέγχου.

Αναλύοντας τις παραπάνω υποθέσεις, καταλήγουμε στα εξής: μια κανονική κατανομή δε θα εφαρμοστεί ποτέ σε μια καμία μεταβλητή μέτρησης, αφού το εύρος μιας κανονικής τυχαίας μεταβλητής είναι από το μείον άπειρο μέχρι το συν άπειρο, και οι αρνητικές μετρήσεις είναι προφανώς μη εφικτές. Εξ ορισμού, οποιαδήποτε μεταβλητή μέτρησης πρέπει να έχει κάποια ασυμμετρία, δεδομένου ότι οι τιμές κοντά στο μηδέν είναι πιο πιθανόν να εμφανιστούν παρά οι τιμές που είναι κοντά στο συν άπειρο. Έτσι δεν μπορούμε να έχουμε μια κανονική κατανομή. Η υπόθεση της (κατά προσέγγιση) κανονικότητας θα πρέπει πάντα να ελέγχεται.

Δεν είναι ρεαλιστικό να υποθέσουμε ότι ο μέσος όρος και η τυπική απόκλιση της διαδικασίας είναι γνωστά και επομένως είναι εξίσου μη ρεαλιστικό να παραλείψουμε να καταλάβουμε ότι οι C_p και C_{pk} πρέπει να εκτιμηθούν, και οι εκτιμητές που χρησιμοποιήθηκαν έχουν δειγματοληπτική μεταβλητότητα.

Αν και η υπόθεση ανεξαρτησίας των μη συμμορφούμενων περιστατικών και μη συμμορφούμενων μονάδων γενικά φτιάχτηκε όταν χρησιμοποιούνται τα διαγράμματα ελέγχου, εντούτοις συχνά παραβιάζεται.

Ο προφανής λόγος για την τελευταία υπόθεση συζητήθηκε από τον Tadikamalla (1994), ο οποίος αμφισβήτησε πως μια μετατόπιση 1,5 σίγμα μπορεί να «επιτραπεί». Ο συγγραφέας αναφέρθηκε σε μια εσωτερική δημοσίευση της Motorola του M. J. Harry, στην οποία ο τελευταίος ισχυρίστηκε ότι μια μέση διαδικασία θα μπορούσε να αλλάξει από μια παρτίδα στην άλλη, με τη μέση μεταβολή να είναι περίπου 1,5 σίγμα. Ο Harry ισχυρίστηκε ότι αυτός ο ισχυρισμός υποστηρίζεται από βιβλία και άρθρα των A. Bender, D. H. Evans και J. Gilson (Bender; 1962, Evans; 1975, Gilson; 1951). Ωστόσο όπως εξηγείται από τον Tadikamalla (1994), αυτές οι τελευταίες πηγές εξετάζουν την επιθυμητή τιμή της τυπικής απόκλισης κάθε στοιχείου σε ένα σωρό από στοιχεία, έτσι ώστε το μισό πλάτος μιας καθορισμένης ανοχής, να είναι τριπλάσια από την τυπική απόκλιση για το συγκρότημα του σωρού. Ο Bender (1962) πρότεινε ότι το 1.5

θα χρησιμοποιηθεί ως πολλαπλασιαστής των πιθανών μετατοπίσεων στα μέσα των μεμονωμένων στοιχείων.

Εάν για παράδειγμα, ένα συγκρότημα του σωρού, έχει 5 στοιχεία, αυτό ισοδυναμεί με την υπόθεση ότι η μέση μεταβολή στους μέσους όρους για τα 5 στοιχεία είναι 0.3 σίγμα ($0.3 \times 1.5 = 5$). Αυτό προφανώς είναι εντελώς διαφορετικό από το να υποθέσουμε ότι ο κάθε μέσος όρος αλλάζει έως και 1.5 σίγμα. Σε γενικές γραμμές, είναι λογικό να πιστεύουμε ότι μια διαδικασία μπορεί να μετατοπιστεί, αν πούμε 0.3 σίγμα, και να θεωρείται ακόμη «υπό έλεγχο» καθώς τίποτα δεν είναι πραγματικά σταθερό με την πάροδο του χρόνου.

Είναι γνωστό ότι μόλις εμφανιστεί κάτι λάθος στη βιβλιογραφία (ή στην προκειμένη «στην πρακτική χρήση»), είναι σχεδόν βέβαιο ότι θα διαιωνιστεί σε κάποιο βαθμό. Αυτό αποδεικνύεται από τον McFadden (1993), ο οποίος παρέθεσε τον Evans (1975) ως αναφορά για την υπόθεση ότι ο μέσος όρος ενός στοιχείου μπορεί να αλλάξει έως και 1.5 σίγμα. Ομοίως και οι Noguera και Nielsen (1992) δήλωσαν: «Η επιλογή του 1.5σ από την Motorola βασίστηκε τόσο σε θεωρητικούς όσο και σε πρακτικούς λόγους. Θεωρητικά, ένα \bar{X} διάγραμμα δεν ανιχνεύει γρήγορα μια μετατόπιση της διαδικασίας, μέχρι το μέγεθος της μετατόπισης είναι $\pm 1.5\sigma$ (με βάση το μέγεθος του δείγματος $n = 4\dots$). Η επιλογή αυτή επαληθεύτηκε επίσης εμπειρικά από την Motorola». Φυσικά ένα \bar{X} διάγραμμα δεν θα εντοπίσει γρήγορα μια μετατόπιση της διαδικασίας ακόμη και όταν η μετατόπιση είναι περίπου 2σ , δεδομένου ότι αυτό θα αποτελούσε μετατόπιση $1\sigma_{\bar{x}}$, και μια τέτοια μετατόπιση θα ανιχνεύεται κατά μέσο όρο, μετά από 44 σχεδιαζόμενα σημεία.

Αυτή η σύγχυση προφανώς οδήγησε κάποιες εταιρείες να πιστεύουν ότι μια αλλαγή 1.5 σίγμα στο μέσο όρο είναι αναμενόμενη. Με μια τέτοια προσδοκία, είναι εύκολο να καταλάβουμε γιατί ορισμένες εταιρείες έχουν δώσει χαμηλή προτεραιότητα στον έλεγχο των διαδικασιών. Εφόσον χρησιμοποιούνται διαγράμματα ελέγχου ή και άλλες τεχνικές ελέγχου διαδικασίας για να κρατήσουμε μια μέση διαδικασία σε κατάσταση στατιστικού ελέγχου θα είναι γενικά ευκολότερο από τη μείωση της μεταβλητότητας της διαδικασίας. Οι τεχνικές ελέγχου διαδικασίας

θα πρέπει σίγουρα να χρησιμοποιηθούν καθώς η εταιρεία προσπαθεί να επιτύχει 6σ πρόγραμμα.

Κάτι που δεν συζητείται συχνά είναι ότι η εφαρμογή Six Sigma είναι σημαντική για τις εταιρείες που επιδιώκουν την καινοτομία. Οι Allen και Davenport (2009) δήλωσαν: «Οι οργανισμοί που εφάρμοσαν αρχικά 6σ σε τουλάχιστον μερικές από τις επιχειρηματικές τους περιοχές, ήταν επιτυχείς στο 90% του χρόνου στην εισαγωγή της καινοτομίας μέσα στον οργανισμό τους. Οι οργανισμοί που επιδιώκουν την καινοτομία εν απουσία οποιασδήποτε εφαρμογής του ελέγχου των διαδικασιών, ήταν επιτυχείς λιγότερο από το 35% του χρόνου». Αυτό αντικρούεται από την ακόλουθη δήλωση του Morris (2006): «Ένα από τα κύρια προβλήματα της 6σ, λένε ο Holland και άλλοι επικριτές, είναι ότι έχει σχεδιαστεί ίσα ίσα για να καθορίσει μια υπάρχουσα διαδικασία, επιτρέποντας ελάχιστα περιθώρια για νέες ιδέες ή μια εντελώς διαφορετική προσέγγιση». (Η αναφορά είναι από τον Charles Holland, του οποίου η εταιρεία παροχής συμβουλευτικών υπηρεσιών «υιοθετεί μια ανταγωνιστική διαδικασία βελτίωσης της ποιότητας»).

Επιπλέον τα 6σ προγράμματα δεν είναι μόνο για μεγάλες εταιρείες καθώς μπορούν να επωφεληθούν εταιρείες οποιουδήποτε μεγέθους. Οι Parody και Voelkel (2006), για παράδειγμα, συζήτησαν την έναρξη 6σ προγραμμάτων σε μικρές εταιρείες.

Άρθρα στα οποία αναφέρεται το «6σ» δηλώνουν ότι αυτό αντιστοιχεί σε 3.4 μη συμμορφούμενες μονάδες ανά εκατομμύριο. Αυτό ισχύει μόνο κάτω από κάποιες μη ρεαλιστικές συνθήκες. Πρώτο, βασίζεται στην παραδοχή της κανονικότητας, η οποία όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, είναι μόνο μια προσέγγιση στην πραγματικότητα και βασίζεται επίσης στην υπόθεση ότι η διαδικασία έχει πραγματικά μετακινηθεί ακριβώς 1.5 σίγμα και παραμένει εκεί, με τα όρια προδιαγραφών να θεωρούνται 6σ μακριά από τη μέση διαδικασία, εάν δεν υπήρξε μετατόπιση της διαδικασίας. Έτσι, αυτό στην πραγματικότητα είναι 4.5 sigma ικανότητα. Για την πραγματική έξι sigma ικανότητα (δηλαδή, ο μέσος όρος της διαδικασίας είναι σταθερός) θα υπήρχαν 2 μη συμμορφούμενες μονάδες ανά δισεκατομμύριο, υπό την προϋπόθεση της κανονικότητας.

Πρέπει να επισημανθεί ότι η Motorola δεν «επιτρέπει» μια αλλαγή 1.5 sigma στο μέσο, ή μια μετατόπιση οποιουδήποτε άλλου καθορισμένου ποσού. Αντίθετα, η εταιρεία πιστεύει στη διατήρηση των κεντρικών κατανομών.

Θα πρέπει να σημειωθεί ότι οι 6σ προσπάθειες της Motorola δεν περιορίστηκαν μόνο στα κατασκευασμένα προϊόντα. Ο Klaus (1997) περιέγραψε το διαγωνισμό Συνολικής Ικανοποίησης Πελατών της Motorola, ο οποίος αφορούσε το ήμισυ των εργαζόμενων της Motorola. Ο στόχος ήταν να δοθεί ένα κίνητρο για συνεχή βελτίωση. Όπως εξηγείται από τον Gary Tooker στον Bemowski (1995), η έννοια / στόχος εφαρμόστηκε επίσης στην υποστήριξη και την παροχή υπηρεσιών. Ειδικότερα, το τμήμα οικονομικών προσαρμόστηκε γρήγορα στην στρατηγική 6σ, με τα βιβλία να κλείνουν περίπου τρεις ημέρες, μετά τον μήνα, ενώ προηγουμένως είχαν πάρει μερικές εβδομάδες.

Δεν έχουν όλοι την αίσθηση ότι το 6σ μπορεί εύκολα να εφαρμοστεί σε μη κατασκευαστικές διαδικασίες. Ο Gary Wendt, πρώην πρόεδρος της GE Capital, ανέφερε ότι «δεν είναι τόσο εύκολο να πούμε ότι δεν υπάρχουν ελαττώματα σε ένα δάνειο αυτοκινήτου». (πηγή: Wall Street Journal, January 13, 1997).

Φαίνεται ασφαλές να υποθέσουμε ότι η χρήση του 6σ και των σχετικών προγραμμάτων σε μη κατασκευαστικές διαδικασίες, θα αυξηθεί με βραδύτερο ρυθμό από ότι η κατασκευαστικές διαδικασίες.

9.2.1. Στοιχεία ενός 6σ προγράμματος

Ο McFadden (1993) περιέγραψε τα στοιχεία ενός 6σ προγράμματος, το οποίο περιελάμβανε τη χρήση των στατιστικών εργαλείων που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια.

Το πρόγραμμα περιλαμβάνει σχεδιασμό πειραμάτων, επαναληψιμότητα και αναπαραγωγιμότητα (R&R μελέτη διαμετρημάτων), παλινδρόμηση, συσχέτιση, ελέγχους υποθέσεων, αντιμετώπιση προβλημάτων και ανάλυση αποτελεσμάτων (FMEA), στατιστικό έλεγχο διαδικασίας (SPC) και άλλα στατιστικά και μη στατιστικά εργαλεία. Ορισμένες εταιρείες έχουν θεσπίσει την 6σ εκπαίδευση, έχουν όμως αγνοήσει, ως ένα βαθμό, την SPC ως απαραίτητη συνιστώσα οποιουδήποτε 6σ

προγράμματος, ή έχουν καταστρέψει μια σειρά από βήματα που πρέπει να εκτελεστούν. Όπως ορίστηκε στο 1ο κεφάλαιο, είναι επικίνδυνο να διεξαχθούν σχεδιασμένα πειράματα χωρίς να προσπαθήσουμε να διατηρήσουμε τις διαδικασίες σε κατάσταση στατιστικού ελέγχου. Ο Harry (1998) έδωσε μια ακολουθία βημάτων η οποία πρέπει να ακολουθείται σε ένα 6σ πρόγραμμα, αλλά ο έλεγχος της διαδικασίας ήταν στο 12ο βήμα. Κάπως παρόμοια, ο Hoerl (1998) καταχώρησε το SPC και το προχωρημένο SPC να καλύπτονται την 4η εβδομάδα ενός 6σ εκπαιδευτικού προγράμματος, με τον σχεδιασμό πειραμάτων να καλύπτεται την 3η εβδομάδα.

Αντίθετα ο Hoerl (2001) κατέγραψε ένα δείγμα προγράμματος σπουδών μαύρης ζώνης (από τους Hahn, Hill, Hoerl and Zinkgraf, 1999) και έδωσε ένα προτεινόμενο πρόγραμμα σπουδών μαύρης ζώνης με ένα βιομηχανικό προσανατολισμό. Οι Hahn, Doganaksoy και Stanard το 2001 πρότειναν 10 προσθήκες στα 6σ προγράμματα και ο Voelkel (2002) επισήμανε ότι οι στατιστικές μέθοδοι που είναι πιο εξεζητημένες από εκείνες που συνήθως καλύπτονται στα 6σ εκπαιδευτικά προγράμματα θα είναι χρησιμότερες.

Ένα πρόβλημα με αυτά τα διάφορα προγράμματα κατάρτισης είναι ότι πολλά διαφορετικά εργαλεία παρουσιάζονται σε ένα εκπαιδευτικό πρόγραμμα που είναι μόνο λίγες εβδομάδες. Κανείς δεν πρόκειται να γίνει ειδικός σε ένα δύο στατιστικά εργαλεία μέσα σε τόσο σύντομο χρονικό διάστημα, πολύ λιγότερο σε ένα σωρό στατιστικά ή μη στατιστικά εργαλεία. Το τελικό αποτέλεσμα, βεβαίως, είναι ότι οι συμμετέχοντες στο πρόγραμμα κατάρτισης λαμβάνουν μόνο μια εισαγωγή στο θέμα, όμως αυτοί και πιθανώς οι εργοδότες τους αναμφισβήτητα παρασύρονται στο να πιστέψουν ότι έχουν γίνει «μάστερ» στο αντικείμενο, αν ολοκληρώσουν με επιτυχία το εκπαιδευτικό πρόγραμμα. Δεν αποτελεί έκπληξη το γεγονός ότι πολλά από τα εργαλεία απορρίπτονται στην συνέχεια. Τον Νοέμβριο/ Δεκέμβριο του 2009 το iSixSigma Magazine περιέχει τα αποτελέσματα έρευνας στην οποία συμμετείχαν πάνω από 800 επαγγελματίες 6σ. Οι συμμετέχοντες ρωτήθηκαν: «Πιο εργαλείο πιστεύεται είναι το πιο χρησιμοποιούμενο σε μελέτες βελτίωσης της διαδικασίας;» Το FMEA (Αντιμετώπιση προβλημάτων και ανάλυση αποτελεσμάτων) χρησιμοποιείται πιο πολύ (κατά το 8,1% των συμμετεχόντων) με τις στατιστικές και

το δεδομένο σχεδιασμό δεδομένων πειραμάτων να είναι δεύτερο με 4,8%. Η έννοια 6σ έχει πολλές κριτικές, όπως στο προηγούμενο άρθρο του Morris (2006), αλλά η στοχαστική χρήση ενός συνδυασμού στατιστικών και μη στατιστικών εργαλείων θα επιτρέψει οποιαδήποτε λειτουργία οργάνωσης πιο αποτελεσματικά από ότι θα λειτουργούσε χωρίς τη χρήση τέτοιων εργαλείων.

Ο στόχος θα πρέπει να είναι πάντα, η βελτίωση της ποιότητας με τη μείωση της μεταβλητότητας. Είναι προφανές ότι δεν υπάρχει ένα ενιαίο 6σ εκπαιδευτικό πρόγραμμα καθώς τα εργαλεία που χρησιμοποιούνται εξαρτώνται από τις συγκεκριμένες εφαρμογές που απαιτούνται. Αυτό ασφαλώς θα ποικίλει, μεταξύ των βιομηχανιών, μεταξύ των εταιρειών, εντός των βιομηχανιών και φυσικά θα ποικίλει επίσης σημαντικά μεταξύ των εταιρειών για διαφορετικές εφαρμογές (βιομηχανία έναντι μη βιομηχανίας).

9.2.2. 6σ εφαρμογές και προγράμματα

Οι Dellot και Gupta (1990) περιέγραψαν μια μελέτη για τη βελτίωση της συνοχής χαλκού σε διαφορετικές και παρόμοιες πλακέτες κυκλωμάτων έτσι ώστε να επιτευχθεί η ποιότητα 6σ. Οι Koons, Meyer και Kurowski (1992) περιέγραψαν τον τρόπο με τον οποίο ο DOE, η παλινδρόμηση και η προσομοίωση χρησιμοποιήθηκαν μαζί σε 6σ εργασία στην Motorola Lighting, Inc.

Ο Hoerl (1998) έδωσε σημαντική εικόνα για τη χρήση των 6σ προγραμμάτων και της κατάρτισης στην GE.

9.2.3. Η έννοια 6σ για την ικανοποίηση των πελατών

Οι Fontenot, Behara και Gresham (1994) εξήγησαν την εφαρμογή της έννοιας 6σ στην εκτίμηση της έκτασης της ικανοποίησης των πελατών από την ομάδα Texas Instruments' Defense Systems and Electronics. Το άρθρο είναι ενδιαφέρον, παρόλο που ο αναγνώστης συναντά ορισμένες ανακρίβειες όπως για παράδειγμα «Το 6σ είναι ένας τρόπος μέτρησης της πιθανότητας ότι οι εταιρείες μπορούν να παράγουν κάποια δεδομένη μονάδα ενός προϊόντος (ή υπηρεσίας) με μόνο 3,4 ελαττώματα ανά ένα εκατομμύριο μονάδες ή λειτουργίες». Δεδομένου ότι η 6σ ιδέα για τα δεδομένα

μέτρησης περιλαμβάνει τα όρια προδιαγραφών, ο τρόπος με τον οποίο η έννοια 6σ μπορεί να χρησιμοποιηθεί με δεδομένα χαρακτηριστικών ενδέχεται να μην φαίνεται προφανής. Οι συγγραφείς περιέγραψαν την προσαρμογή αντιστοιχίζοντας το ποσοστό των δυσαρεστημένων πελατών με την πιθανότητα ουράς για τα δεδομένα μέτρησης. Επέβαλαν όμως την ιδέα αλλαγής $\pm 1.5\sigma$, η οποία είναι ασφαλώς ανεφάρμοστη για τα δεδομένα χαρακτηριστικών. Θα ήταν πιο λογικό να χρησιμοποιήσουμε το ποσοστό των δυσαρεστημένων πελατών για να καθορίσουμε την τιμή του k σε k - σίγμα, χωρίς την αλλαγή (και βεβαίως το ίδιο πράγμα για τα δεδομένα μέτρησης).

Φυσικά οι εταιρείες θα μπορούσαν απλώς να καταγράφουν τα μέρη ανά εκατομμύριο «ελαττώματα» (δηλαδή δυσαρεστημένους πελάτες) με μετατροπή σε k - σίγμα. Οι Miller και Casavant (1994) περιέγραψαν αυτή την προσέγγιση και τον σχεδιασμό τέτοιων τιμών σε ένα γράφημα που ονομαζόταν «ελαττώματα ανά διάγραμμα μονάδων».

9.2.4. Φτωχό 6σ (Lean Six Sigma -LSS)

Ο ερχομός του 6σ ακολουθήθηκε από αυτό που ονομάζεται Φτωχό 6σ. Ο όρος αυτός αναφέρεται στο συνδυασμό της φτωχής βιομηχανίας με τις 6σ ιδέες. Ο όρος «φτωχή βιομηχανία» αναφέρεται γενικά στη μείωση αποβλήτων και κόστους παραγωγής. Ο West (2009) αναφέρθηκε στο LSS γενικά και στην επικράτησή του στα δημοσιευμένα άρθρα. Επίσης οι Smith (2003) και Jing (2009) αναφέρθηκαν τόσο στο Φτωχό 6σ, όσο και στο 6σ αλλά και στον συνδυασμό των δύο.

9.2.5. Σχετικά προγράμματα / άλλες εταιρείες

Αναμένουμε από τις εταιρείες να έχουν εφαρμόσει τις δικές τους εκδόσεις του προγράμματος της Motorola. Ο Craig (1993) περιγράφει την 6σ Διαδικασία Σχεδιασμού Ποιότητας που εφαρμόστηκε από τα DuPont Connector Systems. Ο συντάκτης έκανε 2 σημαντικά σημεία:

1. Η διαδικασία δεν έχει τελικό σημείο
2. Οι προσδοκίες των πελατών μπορούν να αλλάξουν γρήγορα και να απαιτήσουν ένα αναθεωρημένο σχέδιο ποιότητας.

Ο Rich (1997) ανέφερε το Texas Instruments Defense System and Electronics Center «το οποίο είναι υπεύθυνο για την εξέλιξη και την ανάπτυξη στατιστικών εργαλείων και τεχνικών για τον οργανισμό». Ο οργανισμός έχει πάνω από 100 «6σ μαύρες ζώνες». Το «μαύρο χρώμα της ζώνης» υποδηλώνει το επίπεδο εκπαίδευσης που έχει λάβει ένας υπάλληλος. Διάφορες άλλες εταιρείες, όπως η General Electric, υιοθέτησαν την ίδια πρακτική.

Οι μικρές εταιρείες έχουν επίσης επιτύχει στην εφαρμογή προγραμμάτων 6σ. Ο Landes (1995) ανέφερε ότι η Wainwright Industries, βραβευμένη με το βραβείο Baldrige το 1994, έστειλε σε ένα από τους πελάτες της πάνω από 20 εκατομμύρια τεμάχια κατά τη διάρκεια μιας τριετίας χωρίς να διαπιστωθεί κάποιο ελάττωμα. Μάλλον αξιοσημείωτο, αν στην πραγματικότητα όλα αυτά τα τεμάχια ήταν χωρίς ελαττώματα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10

ΑΝΑΚΕΦΑΛΑΙΩΣΗ

Το πρόγραμμα 6σ έχει αναδειχθεί ως μια σημαντική καινοτομία και ουσιαστικά είναι ένα πρότυπο ποιότητας, το οποίο μεταφράζει την εμπλεκόμενη επιστημονική μεθοδολογία σε έναν απλό τρόπο εφαρμογής της επιστημονικής μεθόδου σε έναν οποιονδήποτε οργανισμό. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε πολλούς οργανισμούς καθώς δεν απαιτεί αλλαγές στην ιεραρχική δομή, αλλά μόνο λειτουργικές προσαρμογές.

Όπως είδαμε και στη μελέτη περίπτωσης (Κεφάλαιο 8) η εφαρμογή του 6σ προγράμματος βοηθά στη βελτίωση διαδικασιών. Αυτό είναι εφικτό καθώς μέσω των φάσεων του κύκλου DMAIC, προσδιορίζονται οι αιτίες που προκαλούν ελαττώματα στη διαδικασία. Εστιάζουμε την προσοχή μας στις πιο σημαντικές και προσπαθούμε να τις περιορίσουμε. Εκτελώντας διάφορα πειράματα καταλήγουμε στα ιδανικά επίπεδα των παραγόντων που επηρεάζουν τη διαδικασία. Τέλος έχουμε τη δυνατότητα να παρακολουθούμε συνεχώς τη διαδικασία και να εντοπίσουμε έγκαιρα τυχόν αλλαγές.

Η χρήση κώδικα του ανοικτού λογισμικού της R αποτελεί ένα εξαιρετικά χρήσιμο εργαλείο στην επίτευξη του 6σ προγράμματος. Μέσω των προγραμμάτων και των εντολών της μπορούμε να πραγματοποιήσουμε τις φάσεις του κύκλου. Παίρνουμε αποτελέσματα και γραφήματα τα οποία μπορούμε να τα ερμηνεύσουμε και να καταλήξουμε σε συμπεράσματα. Προτιμάτε η R γιατί είναι δωρεάν και μπορεί να εγκατασταθεί σε οποιοδήποτε οργανισμό, καθώς επίσης και γιατί είναι εύχρηστη με πολλές δυνατότητες.

Εφαρμόζοντας μια επιχείρηση ένα 6σ πρόγραμμα εξοικονομεί αρκετά δισεκατομμύρια δολάρια (π.χ. Motorola Inc.) και είναι μια εξαιρετική επιλογή σε εταιρείες που επιδιώκουν την καινοτομία. Δεν εφαρμόζεται μόνο σε μεγάλες εταιρείες, καθώς και μικρές εταιρείες μπορούν να το εφαρμόσουμε με επιτυχία.

Είναι όμως σημαντικό, οι εταιρείες που εφαρμόζουν το 6σ πρόγραμμα να έχουν εκπαιδεύσει κατάλληλα το προσωπικό τους. Η σύντομη εκπαίδευση σε ένα πρόγραμμα κατάρτισης δεν είναι επαρκής, καθώς κανείς δε μπορεί να μάθει όλα όσα πρέπει για το 6σ πρόγραμμα σε μερικές εβδομάδες. Χρειάζεται προσοχή στις εταιρείες που το εφαρμόζουν, να υπάρχει το κατάλληλο προσωπικό το οποίο θα έχει τις κατάλληλες γνώσεις ούτως ώστε να μπορέσει να εφαρμόσει με επιτυχία το 6σ πρόγραμμα και να επιφέρει βελτιώσεις στις διαδικασίες της εταιρείας.

Βιβλιογραφία

ΕΛΛΗΝΙΚΗ:

- [1]. Αντζουλάκος Δ. (2007): Στατιστικός έλεγχος ποιότητας, Πανεπιστημιακές σημειώσεις, Πειραιάς.
- [2]. Ταγαράς Γ. (2001): Στατιστικός έλεγχος ποιότητας, Εκδόσεις Ζητή.

ΞΕΝΟΓΛΩΣΣΗ:

- [1]. Allen T.T. (2010) Introduction to Engineering Statistics and Lean Six Sigma – Statistical Quality Control and Design of Experiments and Systems, New York: Springer
- [2]. Automotive Industry Action Group (AIAG) (2010) Measure Systems Analysis Reference Manual, 4th edition, Chrysler, Ford, General Motors Supplier Quality.
- [3]. Bender F (1962) Benderizine Tolerance-A Simple Practical Probability Method Of Handling Tolerance For Limit-Stack-ups, Graphic science, pp. 17-21.
- [4]. Box G. (1992) Teaching Engineers Experimental Design with a paper helicopter. Quality Engineering, 4(3), pp 453-459.
- [5]. Box G., Bisgaard S. & Fung C. (1990) Designing Industrial Experiments, Madison, Wi: BBBBF Books.
- [6]. Box, G., & Jones, S. (1992). Designing Products that are Robust to the Environment. Total Quality Management, 3(3), pp.265–285.
- [7]. Box G., Hunter J. & Hunter W. (2005) Statistics for Experimenters Design, Innovation and Discovery, Hoboken, NJ: Wiley.
- [8]. Breyfogle F.W. (1999) Implementing Six sigma Smarter Solutions using Statistical Methods, 2nd edition, John Wiley & Sons, New York.
- [9]. Cano, E. L., Moguerza, J. M., & Redchuk, A. (2012). SixSigma: Six Sigma tools for Quality Improvement. R package version 0.6.0.
- [10]. Crawley, M. J. (2007) The R Book. UK: Wiley.
- [11]. Dale B. G. (1999) Total Management Quality, Blueprint, Blackwell Publishers, USA.

- [12]. Delott C. & Gupta P. (1990) Characterization of Copper Planting Process for Ceramic Substrates, *Quality Engineering*,2,pp.269-284.
- [13]. Evans D. (1975) Statistical Tolerancing: the State of Art, Part I:Background, *Journal of Quality Technology*,7, pp.1-12.
- [14]. Evans J. & Lindsay W. (2008) *The management and Control of Quality*, Thomson South-Western USA.
- [15]. Ezekiel M. & Fox K. A. (1959) *Methods of Correlation and Regression Analysis, Linear and Curvilinear*, 3rd edition, Oxford, England.
- [16]. Fontenot G., Behara R. & Cresham A. (1994) Six Sigma in Customer Satisfaction, *ASQC, Quality Progress* 27(6), pp 73-76.
- [17]. Gilson J. (1951) *A New Approach to Engineering Tolerances*, Machinery Publishing Co, London.
- [18]. Hahn G.J., Hill W. J., Hoerl R. W. & Zinkgraf S.A. (1999) The Impact of Six Sigma Improvement – A Glance into the Future of Statistics. *The American Statistician*, 53(3), pp.208-215.
- [19]. Hale-Bannet C. & Lin D. K. J. (1997) From SPC to DOE: A Case Study at Meco, Inc, *Quality Engineering*, 9(3), pp.489-502.
- [20]. Hardeo Sahai & Mohammed I. Ageel (2000) *The analysis of Variance, Fixed, Random and Mixed Models*, Springer Science & Business Media.
- [21]. Harry, M., & Schroeder, R. (1999) *Six Sigma: The Breakthrough Management Strategy Revolutionizing the world's top Corporations*. New York: Doubleday Business.
- [22]. Hoerl R. W. (1998) Six Sigma and the Future of the Quality Profession, *Quality Progress*, pp.35-44.
- [23]. Hoerl R.W. (2001): Six Sigma Black Belts: What do they need to know? *Journal of Quality Technology*, 33(4), pp.391-406.
- [24]. Ishikawa K. (1990) *Introduction to Quality Control*, Japan.
- [25]. ISO (2011) *ISO 13053-1:2011-Quantitative Methods in Process Improvement-Six Sigma-Part 1: DMAIC Methodology*. Geneva: International Organization for Standardization.
- [26]. ISO (2009) *ISO/TS 16949: Quality Management Systems—Particular Requirements for the Application of ISO 9001:2008 for Automotive Production*

and Relevant Service Part Organizations. Geneva: International Organization for Standardization.

- [27]. Joseph M. Juran (1989) *Juran on Leadership for Quality*, New York, The Free Press.
- [28]. Juran J. & Defeo J. (2010) *Juran's Quality Handbook: The Complete Guide to Performance Excellence*, New York.
- [29]. Kiermeier A. (2008) Visualizing and Assessing Acceptance Sampling Plans: The R package –Acceptance Sampling *Journal of Statistical Software*, 26(6),pp.1-20.
- [30]. Kotz S. & Johnson N. L. (1993) *Process Capability Indices*: CRC press.
- [31]. Koons G., Meyer S. & Kurowski M. (1992) Evaluating Design Sensitivity using DOE and Simulation, *ASQC Quality Congress Transactions*, pp 711-717, Milwaukee, WI, American Society for Quality Control.
- [32]. Landes L. (1995) Leading the Duck at Mission Control, *Quality Progress*, 28(6), pp 43-48.
- [33]. Leavenworth R.S. & Grant E.L. (2000) *Statistical Quality Control*, McGraw-Hill Education, India.
- [34]. Lynch R. O. & Markle (1997) Understanding the Nature of Variability in a Dry Etch Process. In V.Czitrom and P.D. Spagon, eds. *Statistical Case Studies for Industrial Process Improvement*, Chapter 7, American Statistical Association and Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [35]. McFadden F. R. (1993) Six Sigma Quality Programs, *Quality Progress*, 26(6), pp.37-42.
- [36]. Millers E. J. & Casavant C. (1994) Continuous Improvement through Satisfaction. *ASQC Quality Congress Transactions*, pp 210-217, Milwaukee, WI, American Society for Quality Control.
- [37]. Morris B. (2006: New Rule, Look out not in, *Fortune*, July.
- [38]. Montgomery D. (2005) *Introduction to Statistical Quality Control* (6th edition), New York, Wiley.
- [39]. Noguera J. & Nielsen (1992) Implementing Six-Sigma for Interconnect Technology, *ASQC Quality Congress Transactions*, pp 538-544, Milwaukee, WI, American Society for Quality Control.

- [40]. Oakland John S. (1999) *Statistical Process Control*, 4th edition Butterworth – Iteinemann, Oxford, UK.
- [41]. Parody R. J. & Voelkel J. G. (2006) *Six Sigma Start up at Small Companies*, *Quality Progress*, 30(6), pp.33-36.
- [42]. Priscilla E. Greenwood & Michael S. Nikulin (1996) *A Guide to Chi-Squared Testing (Wiley Series in Probability and Statistics)*, 1st edition, New York.
- [43]. Rath & Strong (2003) *Six Sigma Leadership Handbook*, AON Management Consulting.
- [44]. Rich A.B. (1997) *Continuous Improvement: the key to Future Success*, *Quality Progress*, 30(6), pp 33-36.
- [45]. Rupert G., Miller Jr. (1997) *Beyond ANOVA: Basics of Applied Statistics*, CRC Press.
- [46]. Ryan T. P. (2001) *Statistical Methods for Quality Improvement: Wiley Series in Probability and Statistics*.
- [47]. Sarkar, D. (2008) *Lattice: Multivariate Data Visualization with R*. New York: Springer. <http://lmdvr.r-forge.r-project.org>, ISBN 978-0-387-75968-5.
- [48]. Searle S., Casella G. & McCulloch C. (2006) *Variance Components Wiley Series in Probability and Statistics*, New York, Wiley.
- [49]. Smith B. (2003) *Lean and Six Sigma- A one two Punch*. *Quality Progress*, 36(4), pp.37-41.
- [50]. St. Clair, J.F. (1995) *Safety Measurement, Towards Continuous Improvement ASQC 49th Annual Quality Proceedings*, pp 150-158, Milwaukee, WI, American Society for Quality Control.
- [51]. Taguchi G., Chowdhury S. & Wu Y. (2005) *Taguchi's Quality Engineering Handbook*, USA, Wiley.
- [52]. Tadikamalla P.R. (1994) *The Confusion Over Six-Sigma Quality*, *Quality Progress*, 27(11), pp 83-85.
- [53]. Voelkel J. G. (2002) *Something's Missing*. *Quality Progress*, pp. 98-101.
- [54]. West A. H. (2009) *"Has Six Sigma been a Good Thing?"*, *Quality Progress*, 42(9), pp.23-27.

