



Σχολή Θετικών Επιστημών και Τεχνολογίας

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών

Διαχείριση και Τεχνολογία Ποιότητας

Διπλωματική Εργασία

Εφαρμογή τεχνικών ποιοτικού ελέγχου κατά την διαδικασία

βιομηχανικής παραγωγής πλαστικών σωληνώσεων

Γεώργιος Κατσέλας

Επιβλέπων καθηγητής: Αθανάσιος Ρακιτζής

Πάτρα, Μάιος 2025

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του φοιτητή («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίασης στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



Εφαρμογή τεχνικών ποιοτικού ελέγχου κατά την διαδικασία
βιομηχανικής παραγωγής πλαστικών σωληνώσεων

Γεώργιος Κατσέλας

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:

Αθανάσιος Ρακιτζής

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα Στατιστικής
και Ασφαλιστικής Επιστήμης, Πανεπιστήμιο
Πειραιώς

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:

Ζηκόπουλος Χρήστος

Αναπληρωτής Καθηγητής, Τμήμα
Οικονομικών Επιστημών, Α.Π.Θ.

Πάτρα, Μάιος 2025

Στην μνήμη των γονιών μου

Περίληψη

Η παρούσα μελέτη λαμβάνει χώρα σε ένα εργοστάσιο παραγωγής πλαστικών σωλήνων, σε πραγματικό χρόνο με σκοπό να αναδείξει τη χρησιμότητα των στατιστικών μεθόδων για τη βελτίωση της ποιότητας (εξειδικευμένα και μη) σε πραγματικά βιομηχανικά προβλήματα. Στόχος είναι να προκύψουν συμπεράσματα σχετικά με την απόδοση της υπό μελέτη διεργασίας και ταυτόχρονα να οδηγηθεί ο μηχανικός παραγωγής στη λήψη αποφάσεων για την περαιτέρω βελτίωσή της.

Η συγκεκριμένη ΜΔΕ αποτελεί ουσιαστικά μια μελέτη περίπτωσης (case study) και στόχο έχει να αναδείξει τη χρησιμότητα που έχει η εφαρμογή στατιστικών μεθόδων στη βελτίωση μιας παραγωγικής διαδικασίας. Στην ελληνική βιβλιογραφία δεν είναι πάρα πολλές αυτές οι μελέτες, και κυρίως αυτές που χρησιμοποιούν τη μέθοδο Taguchi, οπότε υπάρχει ένα κενό ως προς τη χρήση αυτής της μεθόδου από τους μηχανικούς παραγωγής. Η παρούσα ΜΔΕ φιλοδοξεί να καλύψει (εν μέρει) αυτό το κενό.

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η παρακολούθηση της παραγωγικής διαδικασίας και η εκτίμηση της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων. Αρχικά, θα παρουσιασθεί η παραγόμενη διαδικασία πλαστικών σωλήνων καθώς και τα ποιοτικά εκείνα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την γενικότερη, τελική εικόνα των παραγόμενων προϊόντων. Στην συνέχεια, θα παρουσιασθεί, σε θεωρητικό επίπεδο, ο στατιστικός έλεγχος ποιότητας σε μία παραγωγική διαδικασία, έτσι ώστε να γίνουν αντιληπτές στον μελλοντικό μελετητή έννοιες που θα χρησιμοποιηθούν έμπρακτα στην παρούσα εργασία, όπως ο έλεγχος ποιότητας αποδοχής, εργαλεία και μέθοδοι στατιστικού ελέγχου διεργασιών με έμφαση στα διαγράμματα ελέγχου και ο σχεδιασμός πειραμάτων. Στην συνέχεια, παρουσιάζεται η εφαρμογή του στατιστικού ελέγχου παραγωγικής διαδικασίας στο συγκεκριμένο εργοστάσιο, κάνοντας χρήση εργαλείων και μεθόδων στατιστικού ελέγχου ποιότητας (όπως ανάλυση Pareto, διαγράμματα ελέγχου διεργασίας, πειραματικοί σχεδιασμοί κ.α.). Στο τελευταίο κομμάτι θα εξαχθούν τα συμπεράσματα της μελέτης και οι πιθανοί μελλοντικοί προβληματισμοί.

Λέξεις – Κλειδιά

Εξωθητής, πλαστικοί σωλήνες πολυαιθυλενίου και πολυβινυλοχλωριδίου, διαγράμματα ελέγχου, πειραματικοί σχεδιασμοί Taguchi.

Application of quality control techniques during the industrial production process of plastic pipes

Georgios Katselas

Abstract

This study will be carried out in a plastic pipe manufacturing plant, in real time with the aim of demonstrating the utility of statistical methods for quality improvement (specialized and non-specialized) in real industrial problems. The aim is to reach conclusions about the performance of the process under study and at the same time to lead the production engineer to make decisions for its further improvement.

The current MSc thesis is essentially a case study and aims to highlight the usefulness of the application of statistical methods in the improvement of a production process. In the Greek literature there are not too many of these studies, and especially those that use the Taguchi method, so there is a gap in the use of this method by production engineers. This MSc thesis aspires to fill (partially) this gap.

The purpose of this thesis is to monitor the production process and assess the quality of the products produced. Initially, the production process of plastic pipes will be presented, as well as those quality characteristics that affect the general, final image of the produced products. Then, at a theoretical level, statistical quality control in a production process will be presented, so that concepts that will be used in practice in this work will be understood by the future researcher, such as tools and methods of statistical process control with an emphasis in control charts and design of experiments. Then, the application of the statistical control of the production process in the specific factory is presented, making use of statistical quality control tools and methods (such as Pareto analysis, process control charts, experimental designs, etc.). In the last part, the conclusions of the study and possible topics for future study will be drawn.

Keywords

Extruder, polyethylene and polyvinyl chloride plastic pipes, control charts, Taguchi experimental designs.

Περιεχόμενα

| | |
|--|-----|
| Περίληψη..... | v |
| Abstract | vi |
| Περιεχόμενα | vii |
| Κατάλογος Σχημάτων | ix |
| Κατάλογος Πινάκων | x |
| Συντομογραφίες & Ακρωνύμια..... | xi |
| 1. Εισαγωγή..... | 1 |
| 1.1 Περιγραφή της εταιρείας | 1 |
| 1.2 Σκοπός της εργασίας | 1 |
| 1.3 Περιορισμοί της έρευνας..... | 2 |
| 2. Παραγωγή πλαστικών σωληνώσεων..... | 3 |
| 2.1 Η γραμμή παραγωγής πλαστικών σωληνώσεων | 3 |
| 2.2 Η χρησιμότητα των πλαστικών σωληνώσεων..... | 9 |
| 2.3 Εργαστηριακοί έλεγχοι πλαστικών σωλήνων | 11 |
| 2.4 Βασικές αιτίες αστοχίας των πλαστικών σωλήνων | 12 |
| 2.5 Το σύστημα των βαρδιών και τα προβλήματα στην παραγωγή και στον ποιοτικό έλεγχο | 14 |
| 2.6 Ο ρόλος της Διοίκησης στην εφαρμογή του Συστήματος Ποιότητας..... | 16 |
| 3. Θεωρητικό υπόβαθρο..... | 18 |
| 3.1 Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας | 18 |
| 3.2 Εργαλεία ποιότητας..... | 21 |
| 3.3 Διαγράμματα ελέγχου..... | 22 |
| 3.4 Πειραματικοί σχεδιασμοί | 27 |
| 4. Μελέτη περίπτωσης | 29 |
| 4.1 Συλλογή δεδομένων..... | 29 |
| 4.2 Εφαρμογή μεθόδων Διασφάλισης Ποιότητας | 30 |
| 4.3 Περιορισμοί..... | 32 |
| 4.4 Διερεύνηση των βασικότερων αιτιών απορριφθέντων προϊόντων..... | 34 |
| 4.4.1 Ανάλυση Pareto - Θεωρητική Προσέγγιση..... | 34 |
| 4.4.2 Ανάλυση Pareto - Μελέτη περίπτωσης..... | 35 |
| 4.5 Διαγράμματα ελέγχου βασικών ποιοτικών χαρακτηριστικών | 44 |
| 4.6 Πειραματικοί σχεδιασμοί για την βελτίωση της παραγωγικής διαδικασίας | 52 |
| 5. Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα..... | 61 |
| 5.1 Συμπεράσματα μελέτη περίπτωσης..... | 61 |
| 5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα..... | 62 |
| 5.2.1 Δυνατότητες επέκτασης στα διαγράμματα ελέγχου..... | 62 |
| 5.2.2 Περαιτέρω αξιοποίηση της μεθοδολογίας Taguchi | 63 |
| Βιβλιογραφικές Αναφορές | 64 |
| Παράρτημα Α: «Πίνακας καταγραφής πάχους πόσιμου σωλήνα Φ32/PN10, PE100, 100m σε τρεις διαφορετικές βάρδιες»..... | 67 |
| Παράρτημα Β: «Συντελεστές για τα διαγράμματα Ελέγχου»..... | 69 |

Κατάλογος Εικόνων

| | |
|---------------------------------------|---|
| Εικόνα 2-1 Σύστημα τροφοδοσίας..... | 3 |
| Εικόνα 2-2 Συσκευή βαρομετρική | 4 |
| Εικόνα 2-3 Εξωθητής..... | 4 |
| Εικόνα 2-4 Συσκευή Ελέγχου | 5 |
| Εικόνα 2-5 Κεφαλή | 5 |
| Εικόνα 2-6 Θάλαμος υποπίεσης..... | 6 |
| Εικόνα 2-7 Συσκευή υπερήχων | 6 |
| Εικόνα 2-8 Θάλαμος ψύξης | 7 |
| Εικόνα 2-9 Τραβηγτικό | 7 |
| Εικόνα 2-10 Εκτυπωτικό..... | 8 |
| Εικόνα 2-11 Κοπτικό | 8 |
| Εικόνα 2-12 Ανακλινόμενη συσκευή..... | 9 |
| Εικόνα 2-13 Ανέμη τυλίγματος..... | 9 |

Κατάλογος Σχημάτων

| | |
|---|----|
| Σχήμα 4-1 Pareto Chart of Αιτία scrap ανά κιλά scrap μη σταλακτηφόρων σωλήνων | 36 |
| Σχήμα 4-2 Pareto Chart of Αιτία scrap ανά αριθμό εμφάνισης μη σταλακτηφόρων σωλήνων..... | 36 |
| Σχήμα 4-3 Pareto Chart of Αιτία scrap ανά κιλά scrap σταλακτηφόρων σωλήνων | 37 |
| Σχήμα 4-4 Pareto Chart of Αιτία scrap ανά αριθμό εμφάνισης σταλακτηφόρων σωλήνων | 37 |
| Σχήμα 4-5 Probability Plot του ελάχιστου πάχους | 46 |
| Σχήμα 4-6 Probability Plot του μέγιστου πάχους | 46 |
| Σχήμα 4-7 I-MR του ελάχιστου πάχους..... | 47 |
| Σχήμα 4-8 I-MR του μέγιστου πάχους..... | 49 |
| Σχήμα 4-9 Boxplot του ελάχιστου πάχους ανά βάρδια..... | 51 |
| Σχήμα 4-10 Boxplot του μέγιστου πάχους ανά βάρδια..... | 51 |

Κατάλογος Πινάκων

| | |
|---|----|
| Πίνακας 4-1 Σημαντικότερες αιτίες scrap ανά κιλά scrap σε μη σταλακτηφόρους σωλήνες | 38 |
| Πίνακας 4-2 Σημαντικότερες αιτίες scrap ανά αριθμό εμφάνισης σε μη σταλακτηφόρους σωλήνες | 39 |
| Πίνακας 4-3 Συνδυασμός αναλύσεων scrap σε μη σταλακτηφόρους σωλήνες..... | 40 |
| Πίνακας 4-4 Σημαντικότερες αιτίες scrap ανά κιλά scrap σε σταλακτηφόρους σωλήνες.. | 42 |
| Πίνακας 4-5 Σημαντικότερες αιτίες scrap ανά αριθμό εμφάνισης σε σταλακτηφόρους σωλήνες | 43 |
| Πίνακας 4-6 Συνδυασμός αναλύσεων scrap σε σταλακτηφόρους σωλήνες | 44 |
| Πίνακας 4-7 Παράγοντες διεργασίας με τα επίπεδα τους..... | 53 |
| Πίνακας 4-8 Ορθογώνια διαταξη L_{27} πέντε παραγόντων με τρία επίπεδα | 54 |
| Πίνακας 4-9 Αριθμός ελαττωμάτων ανά πείραμα | 55 |
| Πίνακας 4-10 Ανάλυση Taguchi Ελαττωμάτων ανά 100m versus 5 παραγόντων | 56 |
| Πίνακας 4-11 General Linear Model: Ελαττώματα versus 5 παραγόντων | 59 |

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

Πολυαιθυλένιο (PE),
Πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC),
Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας (ΣΕΠ),
Statistical Quality Control (SQC),
Στατιστικός Έλεγχος Διεργασιών (ΣΕΔ),
Statistical Process Control (SPC),
Διάγραμμα Ελέγχου (ΔΕ),
Ανώτερο Όριο Ελέγχου (ΑΟΕ),
Upper Control Limit (UCL),
Κατώτερο Όριο Ελέγχου (ΚΟΕ),
Lower Control Limit (LCL),
Κεντρική Γραμμή (ΚΓ),
Central Line (CL),
Signal to Noise Ratio (S/N),
Analysis of Variance (ANOVA),
Quality Loss Function (QLF).

1. Εισαγωγή

1.1 Περιγραφή της εταιρείας

Η εταιρεία από την οποία θα αντληθούν τα δεδομένα της στατιστικής ανάλυσης αποτελεί κορωνίδα στον τομέα παραγωγής πλαστικών σωλήνων και εξαρτημάτων και γενικότερα είναι μια από τις δυναμικότερες βιομηχανίες στον ελλαδικό χώρο. Η αρχική της δραστηριότητα (στις αρχές της δεκαετίας του '80) ήταν περιορισμένη σε ένα μηχανουργείο 50 m² και η κύρια της ασχολία ήταν η κατασκευή καλουπιών για πλαστικά διαφόρων σχημάτων. Αποτελούσε λοιπόν μια μικρή μεγέθους, οικογενειακή επιχείρηση.

Από τότε όμως πραγματοποιήθηκαν τεράστια άλματα ως ότου σήμερα η εταιρεία παράγει σωλήνες και εξαρτήματα άρδευσης και έχει επεκταθεί στους κλάδους της ύδρευσης, της θέρμανσης και της προστασίας καλωδίων οπτικών ινών. Έχει αξιοσημείωτη γκάμα προϊόντων που ξεπερνά τους 4.000 κωδικούς και η παραγωγική της δυναμικότητα τους 20.000 τόνους το χρόνο. Οι κεντρικές εγκαταστάσεις και η έδρα της είναι στην Θεσσαλονίκη, όμως παραγωγικές μονάδες υπάρχουν και λειτουργούν αδιάλειπτα σε Τουρκία, Συρία και προσφάτως στη Θήβα. Επίσης, εμπορικά δραστηριοποιείται σε ιδιόκτητες αποθήκες στην Αθήνα και στην Ρουμανία.

Η κεντρική διοίκηση λαμβάνει χώρα στις εγκαταστάσεις στην Θεσσαλονίκη και από εκεί λαμβάνονται αποφάσεις και υλοποιούνται τα βήματα που χρειάζονται για την εξέλιξη της εταιρείας και την αύξηση του ανταγωνιστικού της πλεονεκτήματος. Το κύριο μέλημα της είναι να προσφέρει αξιόπιστες λύσεις στον καταναλωτή σε θέματα άρδευσης, ύδρευσης, θέρμανσης αλλά και σε πιο περίπλοκες απαιτήσεις. Για να παραμείνει ανταγωνιστική σε διεθνές περιβάλλον, μιας και εξάγει σε περισσότερες από 70 χώρες, αναπτύσσεται συνεχώς τεχνολογικά, προσπαθεί να εφαρμόσει νέες μεθόδους παραγωγής με στόχο το μειωμένο κόστος και την αυξημένη ποιότητα των παραγόμενων της προϊόντων. Η εταιρεία συγκαταλέγεται στους κορυφαίους στον κλάδο της όχι μόνο στον ελλαδικό χώρο, κάτι που μαρτυρούν οι βραβεύσεις της.

1.2 Σκοπός της εργασίας

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι αρχικώς η παρακολούθηση της παραγωγικής διαδικασίας και η εκτίμηση της ποιότητας των παραγόμενων προϊόντων. Θα εντοπιστούν οι αιτίες εκείνες που προκαλούν τα περισσότερα προβλήματα στην παραγωγή

και θα διερευνηθεί η σχέση μεταξύ των ποιοτικών χαρακτηριστικών των πλαστικών σωληνών με χρήση των στατιστικών εργαλείων βελτίωσης της ποιότητας.

Αρχικά, θα παρουσιασθεί η παραγόμενη διαδικασία πλαστικών σωληνών καθώς και τα ποιοτικά εκείνα χαρακτηριστικά που επηρεάζουν την γενικότερη, τελική εικόνα των παραγόμενων προϊόντων. Έπειτα, θα παρουσιασθεί σε θεωρητικό επίπεδο ο στατιστικός έλεγχος ποιότητας σε μία παραγωγική διαδικασία, έτσι ώστε να γίνουν αντιληπτές στον μελλοντικό μελετητή έννοιες που θα χρησιμοποιηθούν έμπρακτα στην παρούσα εργασία, όπως ο έλεγχος ποιότητας αποδοχής, εργαλεία και μέθοδοι στατιστικού ελέγχου διεργασιών με έμφαση στα διαγράμματα ελέγχου και στον σχεδιασμό πειραμάτων. Στην συνέχεια, παρουσιάζεται η εφαρμογή του στατιστικού ελέγχου παραγωγικής διαδικασίας στο συγκεκριμένο εργοστάσιο, κάνοντας χρήση εργαλείων και μεθόδων στατιστικού ελέγχου ποιότητας (όπως ανάλυση Pareto, διαγράμματα ελέγχου διεργασίας, πειραματικοί σχεδιασμοί κ.α.).

Στο τελευταίο κομμάτι θα εξαχθούν τα συμπεράσματα της μελέτης και οι πιθανοί μελλοντικοί προβληματισμοί.

1.3 Περιορισμοί της έρευνας

Η εταιρεία από την οποία θα αντληθούν τα δεδομένα για την απαραίτητη στατιστική ανάλυση και την εφαρμογή των τεχνικών ποιοτικού ελέγχου είναι μία υπαρκτή, ιδιωτική εταιρεία και όχι μία δημόσια ή ένα εργαστήριο που λειτουργεί για ερευνητικούς ή ακαδημαϊκούς σκοπούς. Αυτό έχει σημασία να αναφερθεί γιατί από αυτό και μόνο προκύπτει ότι δεν υπάρχει η ευελιξία για απεριόριστη άντληση και χρήση δεδομένων παραγωγής σε πραγματικούς χρόνους και επίσης δεν υπάρχει και η δυνατότητα για χρησιμοποίηση αυτών των δεδομένων ιδιαίτερα σε πειραματικούς σχεδιασμούς. Θα ήταν ιδανικό να υπήρχε αυτή η δυνατότητα όμως οι χρόνοι και οι συνθήκες σε μία παραγωγική βιομηχανία δεν βοηθούν σε αυτή την κατεύθυνση, όπως είναι λογικό. Κάποιος μελλοντικός μελετητής ενδεχομένως, υπό άλλες συνθήκες και σε διαφορετικό περιβάλλον, θα μπορούσε να κάνει περισσότερους πειραματικούς σχεδιασμούς χωρίς το άγχος και την πίεση ότι θα βγει η παραγωγική διαδικασία εκτός ελέγχου και ότι δεν θα προκύψουν από αυτούς τους πειραματικούς σχεδιασμούς προϊόντα μη συμμορφούμενα με τις τεχνικές απαιτήσεις της εταιρείας.

2. Παραγωγή πλαστικών σωληνώσεων

2.1 Η γραμμή παραγωγής πλαστικών σωληνώσεων

Ο εξοπλισμός και τα μηχανήματα σε μία γραμμή παραγωγής σωλήνων αποτελούνται από τα εξής μέρη:

- Σύστημα τροφοδοσίας

Το σύστημα τροφοδοσίας βρίσκεται πάντοτε στην αρχή της γραμμής παραγωγής και τις περισσότερες φορές είναι τοποθετημένο σε ξεχωριστό χώρο. Ανάλογα με το είδος της γραμμής παραγωγής και το μέγεθός της, το σύστημα τροφοδοσίας μπορεί να αποτελείται από ένα ή περισσότερα σιλό, μέσα στα οποία αποθηκεύεται αρχικά το υλικό, μεγάλους δοσομετρητές (dozers), στα οποία γίνεται η μίξη των διαφορετικών υλικών για να πραγματοποιηθεί η τελική συνταγή και αντλίες υποπίεσης, οι οποίες μέσω σωληνώσεων οδηγούν το υλικό από το χώρο της τροφοδοσίας στην χοάνη, η οποία βρίσκεται πάνω από τον εξωθητή. Ο χειρισμός και ο έλεγχος του συστήματος τροφοδοσίας γίνεται από εξειδικευμένο προσωπικό, το οποίο ασχολείται αποκλειστικά με την τροφοδοσία και δεν έχει σχέση με την υπόλοιπη γραμμή παραγωγής αν και συνεργάζεται και επικοινωνεί στενά με το υπόλοιπο προσωπικό.



Εικόνα 2-1 Σύστημα τροφοδοσίας

- Βαρομετρητής (Gravimetric)

Ο βαρομετρητής είναι εγκατεστημένος στο κάτω μέρος της χοάνης του υλικού και πριν την είσοδο του υλικού στον εξωθητή. Ουσιαστικά ελέγχει αυτόματα, με την κατάλληλη παραμετροποίηση, την κατάλληλη ποσότητα που πρέπει να περάσει μέσα στον εξωθητή σε απόλυτο συντονισμό με την ταχύτητα περιστροφής του κοχλία του εξωθητή και την

ορισμένη, από τον χειριστή, προδιαγραφή του βάρους ανά μέτρο σωλήνα του παραγόμενου προϊόντος.



Εικόνα 2-2 Συσκευή βαρομετρητή

- Εξωθητής (extruder)

Την καρδιά της γραμμής παραγωγής σωλήνων αποτελεί ο εξωθητής. Μόλις το υλικό πέσει από τη χοάνη και τον βαρομετρητή στην είσοδο του εξωθητή, ένας περιστρεφόμενος κοχλίας, ο οποίος βρίσκεται μέσα σε ένα μεταλλικό σωλήνα, που ονομάζεται κανόνι, τον εξωθεί προς την έξοδο της κεφαλής. Σε διάφορα σημεία ο κοχλίας θερμαίνεται με ηλεκτρικές αντιστάσεις και αντίστοιχα ψύχεται με τη βοήθεια ανεμιστήρων έτσι ώστε να επιτυγχάνονται κάθε φορά οι επιλεγμένες, από τον χειριστή, θερμοκρασίες. Το υλικό σε όλη τη διάρκεια της διαδρομής μέσα στο κοχλία μετατρέπεται σε μια ουσιαστικά λιωμένη πάστα και αποκτά τέτοια πίεση ώστε να μπορέσει να βγει από την κεφαλή.



Εικόνα 2-3 Εξωθητής

- Σύστημα ελέγχου (Monitoring)

Όλες οι γραμμές παραγωγής περιλαμβάνουν συστήματα παρακολούθησης και ελέγχου λειτουργίας όλης της γραμμής με την βοήθεια οθόνης, η οποία βρίσκεται στο μπροστινό μέρος του εξωθητή. Επιγραμματικά, ο χειριστής μπορεί να ελέγξει και να τροποποιήσει τις θερμοκρασίες τήξης στον φούρνο και στην κεφαλή, τις ταχύτητες περιστροφής του

κοχλία και του τραβηχτικού, την υποπίεση στον θάλαμο υποπίεσης, ρυθμίσεις για το βάθος κοπής του κοπτικού κ.α.



Εικόνα 2-4 Συσκευή Ελέγχου

- Κεφαλή (Die)

Οι κεφαλές μήτρας είναι απαραίτητες για τη διαμόρφωση του τελικού προϊόντος. Είναι τοποθετημένες αμέσως μετά τον κοχλία του εξωθητή, οπότε το λιωμένο πλαστικό υλικό περνάει μέσα από αυτή με πίεση και έτσι αποκτά το υλικό το επιθυμητό σωληνοειδές σχήμα. Είναι πλαισιωμένες με μία σειρά από ηλεκτρικές αντιστάσεις ούτως ώστε να επιτυγχάνεται η συνεχόμενη θέρμανση του υλικού.



Εικόνα 2-5 Κεφαλή

- Δεξαμενή κενού (Vacuum tank)

Το λιωμένο υλικό, μόλις βγαίνει με πίεση από την κεφαλή του εξωθητή, μπαίνει κατευθείαν στον θάλαμο υποπίεσης και έρχεται σε άμεση επαφή αρχικά με την καλύμπρα του θαλάμου αυτού. Αν και το λιωμένο υλικό βγαίνει από την κεφαλή σε στρόγγυλη μορφή, στην καλύμπρα παίρνει την τελική της διατομή και αρχίζει να ψύχεται. Ο θάλαμος

υποπίεσης εν αντιθέσει με τους επόμενους θαλάμους ψύξης βρίσκεται υπό πίεση, η οποία βοηθάει το σωλήνα να πάρει την τελική του, στρογγυλή μορφή.



Εικόνα 2-6 Θάλαμος υποπίεσης

- Συσσκευή υπερήχων (Ultrasonic)

Η συσκευή υπερήχων είναι μόνιμα εγκατεστημένη στην έξοδο του θαλάμου υποπίεσης και αφού κατάλληλα ρυθμιστεί και παραμετροποιηθεί από τον χειριστή κάνει αυτόματες και συνεχόμενες μετρήσεις σε διάφορα σημεία και με διάφορους μεθόδους, ανάλογα με τον τύπο της συσκευής. Οι μετρήσεις αυτές είναι για κρίσιμα ποιοτικά χαρακτηριστικά του σωλήνα όπως το πάχος του, η διάμετρος του, η εκκεντρότητα του, το οβάλ του κ.α. Παρέχει άμεσα τις απαραίτητες αυτές πληροφορίες στον χειριστή έτσι ώστε να μπορέσει ο ίδιος να ρυθμίσει κατάλληλα τα στοιχεία της μηχανής, με αποτέλεσμα να προκύπτει το επιθυμητό προϊόν έγκαιρα, πριν αυτό φτάσει στο τέλος της γραμμής παραγωγής.



Εικόνα 2-7 Συσσκευή υπερήχων

- Δεξαμενές ψύξης (Cooling tanks)

Στο μέσο περίπου της γραμμής παραγωγής υπάρχει ένα σετ από μάνια ψύξης τα οποία ουσιαστικά ψύχουν τον παραγόμενο σωλήνα μιας και αυτός βγαίνει σε αρκετά μεγάλη θερμοκρασία από την κεφαλή του εξωθητή. Ο αριθμός των μάνιων αυτών εξαρτάται από

την μέγιστη ταχύτητα που μπορεί να έχει η γραμμή παραγωγής και την μέγιστη διάμετρο των παραγόμενων προϊόντων.



Εικόνα 2-8 Θάλαμος ψύξης

- Τραβηχτικό (Haul-off)

Απαραίτητο μέρος, με πολύ κρίσιμη λειτουργία, της γραμμής παραγωγής αποτελεί το τραβηχτικό το οποίο ουσιαστικά ωθεί το σωλήνα, με την βοήθεια περιστρεφόμενων ερπυστριών, από την έξοδο του από την κεφαλή προς το τέλος της γραμμής. Η ώθηση αυτή γίνεται σε απόλυτο συντονισμό με την εξέλαση του λιωμένου πλαστικού από την κεφαλή. Οι παραμικρές διακυμάνσεις της ταχύτητας του τραβηχτικού επηρεάζουν ποιοτικά χαρακτηριστικά του σωλήνα όπως το πάχος και την διάμετρο. Το τραβηχτικό θα πρέπει να εφαρμόζει συγκεκριμένη πίεση στην επιφάνεια του σωλήνα έτσι ώστε ο σωλήνας ούτε να πατινάρει αλλά ούτε να συμπιέζεται πολύ έτσι ώστε να χάνεται η στρογγυλότητα του.



Εικόνα 2-9 Τραβηχτικό

- Εκτυπωτικό (Jet printer)

Το μηχάνημα σήμανσης, το οποίο συνήθως τοποθετείται μετά το τραβηχτικό είναι υπεύθυνο για τη σήμανση του σωλήνα. Το μήνυμα, το οποίο αναγράφεται στο σωλήνα, περιέχει όλες τις απαραίτητες πληροφορίες για το πελάτη, όπως το υλικό από το οποίο

κατασκευάστηκε ο σωλήνας, το πρότυπο ποιότητας το οποίο ικανοποιεί, η ημερομηνία και η ώρα παραγωγής και διάφορα άλλα επιμέρους ποιοτικά χαρακτηριστικά όπως το ονομαστικό πάχος, η ονομαστική διάμετρος, η πίεση λειτουργίας και άλλα. Κατά βάση η εκτύπωση πραγματοποιείται με εκτυπωτές inkjet, ενώ σε εξαιρετικές περιπτώσεις, όπως η παραγωγή σωλήνων φυσικού αερίου πραγματοποιείται με θερμοτυπωτικά μηχανήματα.



Εικόνα 2-10 Εκτυπωτικό

- Κοπτικό (Saw)

Επίσης ένα σημαντικό μέρος της γραμμής παραγωγής αποτελεί το κοπτικό ιδιαίτερα σε παραγωγές σωλήνων μεγάλης διαμέτρου ή σε παραγωγή ευθύγραμμων σωλήνων (βεργών). Αντίστοιχα σε σωλήνες μικρής διαμέτρου ή σε σωλήνες που παρασκευάζονται από χαμηλής πυκνότητας πολυαιθυλένιο (LDPE) δεν είναι απαραίτητη η εγκατάσταση κοπτικού στη γραμμή παραγωγής. Μετά από το κατάλληλο προγραμματισμό του χειριστή, το κοπτικό αυτόματα ενεργοποιεί τη λειτουργία του συγκρατώντας με μορσέτα (σιαγόνες) την επιφάνεια του σωλήνα και ένα περιστρεφόμενο μαχαίρι κάνει την κοπή. Σε όλη την διάρκεια της κοπής, το κοπτικό κινείται με την ίδια ταχύτητα που κινείται και ο σωλήνας έτσι ώστε να μην φρενάρεται η κίνηση του σωλήνα.



Εικόνα 2-11 Κοπτικό

- Βάση ή κλίση

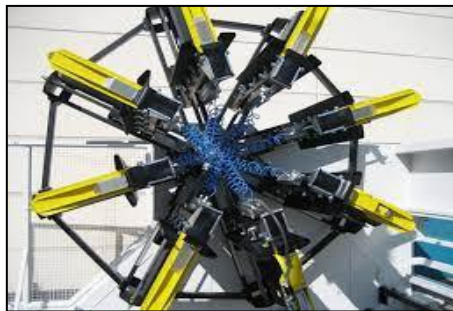
Σε περίπτωση που οι παραγόμενοι σωλήνες έχουν την μορφή της βέργας, απαιτείται η ύπαρξη κάποιας μορφής τραπεζιού, όπου θα στοιβάζονται αρχικά οι βέργες, θα παλετοποιούνται και στην συνέχεια θα αποθηκεύονται με την μεταφορά τους με περονοφόρα μηχανήματα (κλαρκ).



Εικόνα 2-12 Ανακλινόμενη συσκευή

- Ανέμη τυλίγματος (Winder)

Στο τέλος της γραμμής είναι εγκατεστημένη ανέμη τυλίγματος, σε περίπτωση που το τελικό προϊόν θα αποθηκευτεί και να διανεμηθεί σε μορφή κουλούρας.



Εικόνα 2-13 Ανέμη τυλίγματος

2.2 Η χρησιμότητα των πλαστικών σωληνώσεων

Στις μέρες οι πλαστικοί σωλήνες έχουν αντικαταστήσει σε πολύ μεγάλο βαθμό τους μεταλλικούς, μιας και έχουν ευρύ φάσμα εφαρμογών. Αυτό οφείλεται στην ευελιξία, στην αντοχή και στην οικονομική τους αποδοτικότητα. Οι πιο σημαντικές χρήσεις των πλαστικών σωληνών περιγράφονται παρακάτω:

- Παροχή νερού

Οι πλαστικοί σωλήνες χρησιμοποιούνται για να μεταφέρεται αρχικά το νερό από την αρχική του πηγή στα σημεία που επεξεργάζεται μέχρι τον τελικό καταναλωτή, οι οποίοι είναι οικιακές, εμπορικές ή βιομηχανικές εγκαταστάσεις. Προτιμώνται υλικά όπως το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC) και το πολυαιθυλένιο (PE) εξαιτίας της πολύ καλής αντοχής στην διάβρωση και την πολύ μεγάλη διάρκεια ζωής.

- Λύματα και αποχέτευση

Οι πλαστικοί σωλήνες επίσης χρησιμοποιούνται σε συστήματα αποχέτευσης και μεταφοράς λυμάτων και όμβριων υδάτων σε αντίθετη φορά από το πόσιμο ή νερό χρήσης, δηλαδή απομακρύνοντας το από τις κατοικημένες και εμπορικές περιοχές. Είναι ιδανικοί για αυτή την χρήση μιας και είναι ελαφροί, εύκολοι στην εγκατάσταση με πολύ καλές χημικές αντοχές.

- Άρδευση

Στη γεωργία, παρόλο που οι απαιτήσεις των καλλιεργειών αυξάνονται με την πάροδο των ετών, οι πλαστικοί σωλήνες εξακολουθούν και αποτελούν εγγύηση για την διαχείριση και διανομή του πολύτιμου, για την γεωργία, νερού. Είναι ευέλικτοι και ανθεκτικοί και λύνουν τα χέρια των καλλιεργητών, οπότε είναι εφικτός ο σχεδιασμός και η εγκατάσταση συστημάτων για την κάλυψη των απαιτήσεων των καλλιεργειών.

- Διανομή αερίου

Οι πλαστικοί σωλήνες, ιδιαίτερα οι σωλήνες πολυαιθυλενίου (PE) σε κίτρινη ή πορτοκαλί, υποχρεωτικά για την χώρα μας, απόχρωση, χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά φυσικού αερίου και άλλων αερίων όπως το προπάνιο και το βουτάνιο. Προσφέρουν εξαιρετική χημική αντοχή, υψηλή αντοχή και ευελιξία, καθιστώντας τα κατάλληλα για δίκτυα διανομής αερίου.

- Συστήματα Θέρμανσης και Ψύξης

Σε εφαρμογές θέρμανσης και ψύξης, οι πλαστικοί σωλήνες χρησιμοποιούνται για τη μεταφορά ζεστού και κρύου νερού σε συστήματα θέρμανσης, συστήματα κρύου νερού και μονάδες κλιματισμού. Τα υλικά που χρησιμοποιούνται, όπως το πολυαιθυλένιο (PE) και το δικτυωμένο πολυαιθυλένιο (crosslinked PE - PEX), αποτελούν εξαιρετική λύση από άποψη ικανότητας στην μεταφορά της θερμότητας και είναι ανθεκτικά στη διάβρωση.

- Βιομηχανικές διεργασίες

Οι πλαστικοί σωλήνες χρησιμοποιούνται επίσης στον τομέα της βιομηχανίας, και συγκεκριμένα στην μεταφορά χημικών ουσιών, στην επεξεργασία τροφίμων και στην παραγωγή φαρμακευτικών σκευασμάτων. Παρέχουν αξιόπιστη και ανθεκτική λύση στη διάβρωση για τη μεταφορά υγρών και αερίων σε περιβάλλοντα με ιδιαίτερες απαιτήσεις.

- Ηλεκτρικοί αγωγοί

Ορισμένοι πλαστικοί σωλήνες, όπως το πολυβινυλοχλωρίδιο (PVC), χρησιμοποιούνται ως ηλεκτρικοί αγωγοί για την προστασία και την οργάνωση των ηλεκτρικών καλωδίων σε κτίρια και άλλες κατασκευές.

Συνοπτικά, πρέπει να αναφερθεί ότι οι πλαστικοί σωλήνες έχουν πολυάριθμες εφαρμογές σε διάφορους τομείς της οικονομίας και της καθημερινότητας. Η υψηλή τους αντοχή, η ευελιξία στον σχεδιασμό και την εγκατάσταση και η οικονομική τους αποδοτικότητα αποτελούν χαρακτηριστικά της εφαρμογής των πλαστικών σωλήνων, που τους καθιστά ιδανικούς για χρήση σε διάφορους κλάδους. Αυτό έχει ως συνέπεια να συμβάλουν στην αποτελεσματική ανάπτυξη υποδομών και στη βελτιωμένη παροχή υπηρεσιών σε διάφορους κλάδους (Plastics Pipe Institute, 2008; ΕΛΟΤ, 2024).

2.3 Εργαστηριακοί έλεγχοι πλαστικών σωλήνων

Οι εργαστηριακοί έλεγχοι των πλαστικών σωληνώσεων περιγράφονται κυρίως από τα διεθνή πρότυπα EN 12201 για σωλήνες πολυαιθυλενίου και από το EN 1452 για σωλήνες από πολυβινυλοχλωρίδιο. Τα πρότυπα αυτά για πλαστικούς σωλήνες και εξαρτήματα που προορίζονται για τη μεταφορά ζεστού και κρύου νερού υπό πίεση επιβάλλουν διάφορες εργαστηριακές δοκιμές, οι οποίες περιγράφονται παρακάτω:

- Μηχανικές δοκιμές: Αυτές αξιολογούν την αντοχή και την ανθεκτικότητα των σωλήνων, όπως η αντοχή σε εφελκυσμό, η αντοχή στην κρούση και η αντίσταση στην υδροστατική πίεση.
- Δοκιμές διαστάσεων: Αυτές διασφαλίζουν ότι οι σωλήνες πληρούν τις απαιτούμενες διαστάσεις και ανοχές όπως καθορίζονται στο πρότυπο.
- Χημικές δοκιμές: Αυτές επαληθεύουν τη σύνθεση και την ποιότητα των πρώτων υλών που χρησιμοποιούνται στη διαδικασία παραγωγής, διασφαλίζοντας ότι πληρούν τις απαιτούμενες προδιαγραφές.

- Υδραυλικές δοκιμές: Αυτές αξιολογούν την απόδοση των σωλήνων κάτω από διαφορετικές συνθήκες ροής, όπως αντίσταση στο σφυρί νερού και απώλεια πίεσης.
- Περιβαλλοντικές δοκιμές: Αυτές αξιολογούν την αντίσταση των σωλήνων σε διάφορους περιβαλλοντικούς παράγοντες, όπως η υπεριώδης ακτινοβολία, η εναλλαγή της θερμοκρασίας και η χημική αντίσταση.
- Δοκιμές συστήματος διαχείρισης ποιότητας: Αυτές διασφαλίζουν ότι ο κατασκευαστής διαθέτει ένα αποτελεσματικό σύστημα διαχείρισης ποιότητας, σύμφωνα με τις οδηγίες του ISO 9001 ή παρόμοιων προτύπων (European Committee for Standardization, 2011; European Committee for Standardization, 2009).

2.4 Βασικές αιτίες αστοχίας των πλαστικών σωλήνων

Αφού παραχθούν οι πλαστικοί σωλήνες δεν σημαίνει απαραίτητα, όπως συμβαίνει με όλα τα βιομηχανικά προϊόντα, ότι δεν θα παρουσιάσουν προβλήματα είτε ακόμα στον χώρο αποθήκευσης τους είτε κατά την χρήση τους από τον πελάτη. Αυτά τα προβλήματα μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις βασικές κατηγορίες, ανάλογα με τον τύπο προέλευση τους. Βασικά, θα μπορούσε να ειπωθεί ότι σχετίζονται με τα υλικά κατασκευή τους, με την ίδια την διαδικασία παραγωγής και με το περιβάλλον ή με άλλους εξωτερικούς παράγοντες.

- Ζητήματα που σχετίζονται με υλικά:
 - Υποβάθμιση υλικών: Με την πάροδο του χρόνου, τα πλαστικά υλικά μπορεί να αποδομηθούν λόγω της πολύχρονης τους έκθεσης σε περιβαλλοντικούς παράγοντες όπως η υπεριώδης ακτινοβολία, οι διακυμάνσεις της θερμοκρασίας του περιβάλλοντος και η επαφή με διάφορες χημικές ουσίες. Αυτή η αποδόμηση οδηγεί σε μείωση των μηχανικών ιδιοτήτων του σωλήνα, όπως η αντοχή και η ευκαμψία του, επηρεάζοντας τελικά την απόδοση και τη διάρκεια ζωής του.
 - Μη συμβατά υλικά: Αν κατά την διαδικασία παραγωγής χρησιμοποιηθούν μη συμβατά μεταξύ τους υλικά μπορούν να προκύψουν διάφορα προβλήματα, όπως η κακή πρόσφυση μεταξύ των διαφορετικών στρωμάτων του σωλήνα, η διόγκωση του υλικού ή ακόμα και χημικές αντιδράσεις μεταξύ των υλικών που θέτουν σε κίνδυνο την ακεραιότητα της δομής του σωλήνα.

- Ελαττώματα υλικού: Ελαττώματα στις πρώτες ύλες, όπως ξένα σώματα, βρωμιές, κενά ή ασυνέπειες στη σύνθεση, μπορεί να οδηγήσουν σε μειωμένη απόδοση και ανθεκτικότητα του πλαστικού σωλήνα.
- Θέματα παραγωγής
 - Κακή κατασκευή: Λανθασμένη διαδικασία παραγωγής και επιλογή λανθασμένων τιμών σε κρίσιμες παραμέτρους, όπως η θερμοκρασία τήξης, ή η πίεση του υλικού και την εξέλαση κ.α. ή ανθρώπινο λάθος από τον χειριστή κατά την παραγωγική διαδικασία με αποτέλεσμα την παραγωγή προϊόντων με μειωμένη την ανθεκτικότητά τους ή με εκτός προδιαγραφών διαστάσεις.
 - Ελαττωματική συνδεσμολογία: Η λανθασμένη συνδεσμολογία οφείλεται είτε σε λάθος επιλογή συνδέσμων ή λαμβάνει χώρα ζημιά κατά την εγκατάσταση. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα να εμφανιστούν ανεπιθύμητες διαρροές, να υπάρχει μειωμένη αντίσταση πίεσης και να απειλείται η ακεραιότητα του σωλήνα.
 - Ανεπαρκής ή ελλιπής ποιοτικός έλεγχος: Όταν δεν εφαρμόζεται ένας ολοκληρωμένος ποιοτικός έλεγχος, που θα ξεκινάει πρώτα από τον ίδιο τον χειριστή και θα ολοκληρώνεται από το αντίστοιχο τμήμα του ποιοτικού ελέγχου, προκύπτουν ελαττωματικά προϊόντα, τα οποία τις περισσότερες φορές, υπό αυτές τις συνθήκες, καταλήγουν στον πελάτη με δυσάρεστες συνέπειες για την ίδια την επιχείρηση.
- Περιβαλλοντικοί ή εξωτερικοί παράγοντες:
 - Συνθήκες εδάφους: Οι πλαστικοί σωλήνες κατά την επαφή τους με το έδαφος μπορούν να επηρεαστούν από την χημική του σύνθεση, την συγκεντρωμένη υγρασία και το PH και να προκύψουν αλυσιδωτές αντιδράσεις με το ίδιο το πλαστικό ή να προκληθεί εκτεταμένη διάβρωση.
 - Εξωτερικές δυνάμεις: Μηχανικές δυνάμεις, όπως αυτές που προκαλούνται από κινήσεις του εδάφους, κρούσεις του οχήματος ή εξωτερική κατασκευή, μπορεί να προκαλέσουν ζημιά στους σωλήνες, οδηγώντας σε διαρροές ή δομική αστοχία.
 - Λανθασμένη εγκατάσταση: Κατά την εγκατάσταση των πλαστικών σωληνών, πολλές φορές, γίνονται λάθη είτε από ανεπάρκεια του συνεργείου είτε από χρονική πίεση για ολοκλήρωση του έργου. Έτσι, πολύ συχνά λαμβάνουν χώρα κακές

επιχωματώσεις, κακή στήριξη ή ευθυγράμμιση με αποτέλεσμα την παραμόρφωση του σωλήνα, την συγκέντρωση συνεχούς τάσης και τελικά την αστοχία του.

- Περιβαλλοντικοί στρεσογόνοι παράγοντες: Διάφοροι περιβαλλοντολογικοί παράγοντες, όπως η υπεριώδης ακτινοβολία, οι μεγάλες και απότομες διακυμάνσεις της θερμοκρασίας και η επαφή με χημικές ουσίες έχουν σαν αποτέλεσμα να υποβαθμίζεται το υλικό, να επηρεάζεται η απόδοση του και τελικά η διάρκεια ζωής του.

Για την αντιμετώπιση αυτών των προβλημάτων, θα πρέπει να ακολουθηθεί μια σειρά βελτιωτικών κινήσεων από τον χώρο αρχικά του εργοστασίου έως και τον τελικό τόπο χρησιμοποίησης του προϊόντος. Η πιστή εφαρμογή των βιομηχανικών προτύπων είναι απαραίτητη, όπως το EN-12201 και το EN ISO-1452, τα οποία αναφέρονται στα συστήματα πλαστικών σωληνώσεων υπό πίεση PE και PVC αντίστοιχα. Επίσης, κρίνεται αναγκαία η σωστή επιλογή των υλικών, η πιστή εφαρμογή των διαδικασιών παραγωγής, η σωστή και σύμφωνη με τις οδηγίες των κατασκευαστών εφαρμογή των σωλήνων καθώς και η σωστή αποθήκευση τους για μελλοντική χρήση (Wang, 2024).

2.5 Το σύστημα των βαρδιών και τα προβλήματα στην παραγωγή και στον ποιοτικό έλεγχο

Σε πολλές επιχειρήσεις, ιδίως σε βιομηχανικές μονάδες, εφαρμόζεται το σύστημα των βαρδιών με στόχο την συνεχόμενη λειτουργία, ιδίως των τμημάτων παραγωγής και αποτέλεσμα την αυξημένη παραγωγικότητα και απόδοση της επιχείρησης. Ο συγκεκριμένος προγραμματισμός των ωρών εργασίας, όπως είναι λογικό, επιφέρει πολλά οφέλη στην ίδια την επιχείρηση αλλά από την άλλη προκαλεί και ορισμένα προβλήματα, είτε στο ανθρώπινο δυναμικό είτε στην λειτουργία της ίδιας της επιχείρησης. Αυτά τα προβλήματα μπορούν να ομαδοποιηθούν όπως παρακάτω:

- Θέματα κόπωσης και υγείας: Η εργασία σε εναλλασσόμενες βάρδιες προκαλεί την κόπωση των εργαζομένων τόσο της σωματικής όσο και την ψυχολογικής. Αυτό έχει ως αντίκτυπο στην παραγωγικότητα των εργαζομένων, οπότε μπορούν να προκληθούν σφάλματα και ελλείψεις κατά την παραγωγική διαδικασία αλλά και στον ποιοτικό έλεγχο, κομμάτι του οποίου πραγματοποιείται και από τους εργαζόμενους στην εναλλασσόμενη βάρδια, έστω και σε αρχικό επίπεδο.

- **Επικοινωνία και συντονισμός:** Η αλλαγή της βάρδιας και το γεγονός ότι δεν βρίσκεται στην ίδια θέση και στο ίδιο μηχάνημα πάντοτε ο ίδιος χειριστής μπορεί να προκαλέσει προβλήματα στην επικοινωνία και το συντονισμό μεταξύ των εργαζομένων. Οι πληροφορίες οι οποίες πρέπει να ανταλλάσσονται για την ομαλή λειτουργία της γραμμής παραγωγής ενδεχομένως να μην μεταβιβάζονται και αυτό έχει ως αποτέλεσμα τις καθυστερήσεις, την μειωμένη απόδοση και πολλές φορές τις παρεξηγήσεις μεταξύ των εργαζομένων.
- **Ελλιπής εκπαίδευση και μεταφορά γνώσης:** Με τις αλλαγές των βαρδιών μπορεί να προκληθούν διαφορετικά επίπεδα εκπαίδευσης σε ορισμένους εργαζομένους τα οποία οδηγούν σε ασυνέπειες στις δεξιότητες και τις γνώσεις των εργαζομένων.
- **Συντήρηση και βαθμονόμηση εξοπλισμού:** Οι εργαζόμενοι των βαρδιών παραγωγής ενδεχομένως να μην συντηρούν με τον ίδιο τρόπο και όπως πρέπει τα επιμέρους μέρη μιας γραμμής παραγωγής και να μην εφαρμόζουν με τον ίδιο τρόπο τις διαδικασίες της παραγωγής. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την δυσλειτουργία στην παραγωγική διαδικασία, τα σφάλματα και τα πιθανά προβλήματα στην ποιότητα.
- **Διαχείριση υλικών και πόρων σε εναλλασσόμενες βάρδιες:** Ένας άλλος κίνδυνος που ελλοχεύει είναι ο διαφορετικός τρόπος διαχείρισης των πρώτων υλών, των εργαλείων και του εξοπλισμού, οπότε πραγματοποιούνται πολλές φορές σπατάλες, αποτελεσματική χρήση των πόρων, καθυστερήσεις στην παραγωγή και μειωμένη απόδοση.
- **Παρακολούθηση και έλεγχος ποιότητας:** Η εναλλασσόμενη βάρδια προκαλεί ελλείψεις στην παρακολούθηση της λειτουργίας της γραμμής και στον ποιοτικό έλεγχο μιας και οι ελεγκτές του ποιοτικού ελέγχου και οι υπεύθυνοι των γραμμών παραγωγής δεν είναι πάντοτε παρόντες (συνήθως αυτό το προσωπικό εργάζεται σε πρωινή βάρδια), οπότε αυτό έχει ως αντίκτυπο προβλήματα στη παραγωγική διαδικασία και στην ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων.
- **Ηθικό εργαζομένων:** Πολλές φορές η εναλλαγή στις ώρες εργασίας μιας επιχείρησης οδηγεί σε μειωμένη ικανοποίηση του συγκεκριμένου προσωπικού, με αποτέλεσμα μέρος του προσωπικού αυτού να επιλέγει εργασιακά περιβάλλοντα με σταθερά ωράρια εργασίας. Έτσι, επιχειρήσεις με βάρδιες δυσκολεύονται να βρουν εξειδικευμένο προσωπικό και όταν το βρίσκουν δυσκολεύονται να το διατηρήσουν για μεγάλο χρονικό διάστημα.

Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα θα πρέπει η επιχείρηση να προγραμματίσει σωστά της εναλλασσόμενες βάρδιες, να εκπαιδεύσει κατάλληλα το προσωπικό ώστε να εργάζεται μέσα στις βάρδιες αυτές, να δημιουργήσει τα κατάλληλα κανάλια επικοινωνίας μεταξύ των βαρδιών έτσι ώστε να εφαρμόζονται πιστά οι διαδικασίες παραγωγικής διαδικασίας. Επίσης, θα πρέπει να δίνει κίνητρα και οφέλη στους εργαζομένους των εναλλασσόμενων βαρδιών, έτσι ώστε να εξασφαλίζεται η ομαλή παραγωγή διαδικασία και ο ποιοτικός έλεγχος (Brazier, 2008).

2.6 Ο ρόλος της Διοίκησης στην εφαρμογή του Συστήματος Ποιότητας

Ο ρόλος της Διοίκησης στην εφαρμογή του συστήματος ποιότητας σε όλες τις επιχειρήσεις ή υπηρεσίες είναι πάρα πολύ κρίσιμος για να διασφαλίζεται η ικανοποίηση των παραγόμενων προϊόντων ή των παρεχόμενων υπηρεσιών από τον πελάτη. Είναι πάρα πολύ σημαντική η απόφαση της Διοίκησης για εγκατάσταση ενός ολοκληρωμένου συστήματος ποιότητας αλλά ο καθοριστικός της ρόλος της Διοίκησης δεν σταματάει με αυτή την κίνηση. Το σημαντικότερο που πρέπει και μπορεί να κάνει είναι η εγκαθίδρυση μιας κουλτούρας ποιότητας σε όλους τους εργαζομένους ανεξαρτήτως κλίμακος στην ιεραρχία και η προσπάθεια για συνεχή προσπάθεια βελτιώσεων. Αναφέρονται συνοπτικά ορισμένες βασικές δραστηριότητες της Διοίκησης σε σχέση με τη διασφάλιση της ποιότητας:

- **Καθιέρωση πολιτικών ποιότητας:** Η διοίκηση με απόφαση της ορίζει τους στόχους και τα οράματα της ποιότητας, τα οποία αποτελούν οδηγό για τις δραστηριότητες διασφάλισης ποιότητας και μία κατευθυντήρια γραμμή για τη λήψη κρίσιμων αποφάσεων.
- **Ανάπτυξη συστημάτων διαχείρισης ποιότητας:** Η διοίκηση αναπτύσσει και εφαρμόζει συστήματα διαχείρισης ποιότητας στα οποία ουσιαστικά περιγράφουν τις διαδικασίες παραγωγής και τα πρότυπα τα οποία πρέπει να εφαρμόζονται σε όλες τις φάσεις της διαδικασίας παραγωγής.
- **Κατανομή των πόρων:** Η διοίκηση είναι υπεύθυνη για τη σωστή και ορθολογική κατανομή των πόρων όπως των εργαλείων, της τεχνολογίας και του ανθρώπινου δυναμικού. Έτσι διασφαλίζεται ότι για την εφαρμογή των διαδικασιών που απαιτούνται για τη διασφάλιση της ποιότητας θα υπάρχουν τα κατάλληλα μέσα και το προσωπικό θα είναι κατάλληλα εκπαιδευμένο για να μπορεί να τα εκτελέσει σωστά τα καθήκοντα του.

- **Καθορισμός προτύπων ποιότητας:** Η διοίκηση αποφασίζει για τα πρότυπα τα οποία θα εφαρμοστούν και σύμφωνα με αυτά θα ικανοποιηθούν οι απαιτήσεις του πελάτη αλλά και προδιαγραφές που ορίζει ο κλάδος.
- **Παρακολούθηση και έλεγχος:** Η Διοίκηση δεν αποφασίζει μόνο για την εγκατάσταση ενός συστήματος ασφάλειας ποιότητας αλλά παρακολουθεί και ελέγχει τη σωστή και ομαλή εφαρμογή του μέσω τακτικών επιθεωρήσεων ή ελέγχων και εντοπίζει τα σημεία προς βελτίωση.
- **Προώθηση της συνεχούς βελτίωσης:** Η Διοίκηση προσπαθεί να εντοπίσει λάθη ή παραλήψεις στα συστήματα διασφάλισης ποιότητας και να προωθήσει τρόπους για την βελτίωση των συστημάτων αυτών είτε μέσω σεμιναρίων προς τους εργαζομένους ή μέσω εφαρμογής εξειδικευμένων εργαλείων και μεθοδολογιών για τη βελτίωση της ποιότητας.
- **Εστίαση στον πελάτη:** Η διοίκηση, προσπαθώντας να ικανοποιήσει τις απαιτήσεις του πελάτη, επιχειρεί να έχει μία αμφίδρομη σχέση με τον ίδιο και να λαμβάνει όλες τις απαιτούμενες πληροφορίες από τον ίδιο σε σχέση με την ικανοποίηση του από το τελικό προϊόν. Αυτό έχει ως αντίκτυπο τη λήψη αποφάσεων για διορθωτικές ενέργειες στην εφαρμογή του συστήματος ποιότητας.
- **Ηγεσία και επικοινωνία:** Η διοίκηση πρέπει να αποτελεί το φωτεινό παράδειγμα για την εφαρμογή του συστήματος ποιότητας, να καθοδηγεί τους υπόλοιπους εργαζομένους και να τους ενθαρρύνει να κατανοήσουν τη μεγάλη σημασία που έχει η ποιότητα σε όλο τον οργανισμό.
- **Διαχείριση κινδύνων:** Ένας άλλος ρόλος της διοίκησης είναι εντοπισμός και η διαχείριση των κινδύνων που μπορούν να προκύψουν και να ζημιώσουν ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων καθώς επίσης και η εφαρμογή προληπτικών μέτρων για την εξάλειψη των κινδύνων αυτών.
- **Συνεργασία με το προσωπικό:** Η διοίκηση πρέπει να πείσει τους εργαζομένους για τη σωστή εφαρμογή των συστημάτων διαχείριση ποιότητας να προωθεί την ομαδική συνεργασία μεταξύ των διαφόρων τμημάτων της παραγωγής και των ατόμων που εμπλέκονται στη διασφάλιση της ποιότητας η επικοινωνία μεταξύ των τμημάτων κρίνεται απαραίτητη καθώς επίσης και διασφάλιση ότι στόχοι της ποιότητας είναι κατανοητή από όλους (Dale, 2016).

3. Θεωρητικό υπόβαθρο

3.1 Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας

Η ιστορία του Στατιστικού Ελέγχου Ποιότητας (Statistical Quality Control, ΣΕΠ ή SQC) χρονολογείται από τις αρχές του 20ου αιώνα, με σημαντικές συνεισφορές από πρωτοπόρους στον τομέα της στατιστικής και της διαχείρισης ποιότητας. Κάνοντας μια μικρή ιστορική αναδρομή, μπορούμε να αναφέρουμε ότι η ανάπτυξη του SQC μπορεί να χωριστεί σε πολλά βασικά στάδια:

- Πρώιμες εξελίξεις (δεκαετία 1800-1920): Τα θεμέλια του Στατιστικού Ελέγχου Ποιότητας τέθηκαν από πρώιμους στατιστικούς όπως ο Karl Pearson (1857-1936), ο Ronald Fisher (1890-1962) και ο William Sealy Gosset (1876-1937, γνωστός και για το t-test). Η εργασία τους στις κατανομές πιθανοτήτων, τον έλεγχο υποθέσεων και τις τεχνικές δειγματοληψίας έθεσαν τις βάσεις για εφαρμογές ποιοτικού ελέγχου.
- Walter A. Shewhart (δεκαετίες 1920-1930): Ο Walter A. Shewhart (1891-1967), μηχανικός στα Bell Telephone Laboratories, θεωρείται ο πατέρας του Στατιστικού Ελέγχου Ποιότητας. Ανέπτυξε την έννοια των διαγραμμάτων ελέγχου, τα οποία είναι γραφικές αναπαραστάσεις δεδομένων διεργασιών με την πάροδο του χρόνου, για να εντοπίσει τάσεις και μοτίβα. Το έργο του ήταν καθοριστικό για την ανάπτυξη του κύκλου Plan-Do-Check-Act (PDCA), μια μεθοδολογία συνεχούς βελτίωσης.
- William E. Deming (δεκαετίες 1940-1950): Ο William E. Deming (1900-1993), ένας Αμερικανός στατιστικός, έπαιξε καθοριστικό ρόλο στην προώθηση του SQC στις Ηνωμένες Πολιτείες και την Ιαπωνία. Τόνισε τη σημασία της κατανόησης της διακύμανσης και της βελτίωσης της διαδικασίας μέσω της χρήσης στατιστικών μεθόδων. Τα 14 σημεία διαχείρισης του Deming λειτούργησαν ως θεμέλιο για τον ποιοτικό μετασχηματισμό των ιαπωνικών βιομηχανιών μετά τον Β' Παγκόσμιο Πόλεμο.
- Joseph M. Juran (1940-1950): Ο Joseph M. Juran (1904-2008), πρωτοπόρος στη διαχείριση ποιότητας, ανέπτυξε την Αρχή Pareto (κανόνας 80/20) και την Τριλογία Juran, η οποία αποτελείται από ποιοτικό σχεδιασμό, ποιοτικό έλεγχο και βελτίωση της ποιότητας. Η δουλειά του επικεντρώθηκε στη διαχείριση της ποιότητας τόσο σε επίπεδο οργάνωσης όσο και σε επίπεδο έργου.

- Genichi Taguchi (δεκαετίες 1950-1990): Ο Genichi Taguchi (1924-2012), ένας Ιάπωνας μηχανικός, εισήγαγε τη μέθοδο Taguchi, η οποία εστιάζει στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του προϊόντος και του ελέγχου της διαδικασίας μέσω της χρήσης ορθογώνιων συστοιχιών και αναλογιών S/N (Signal-to-Noise). Αυτή η μέθοδος στοχεύει στην ελαχιστοποίηση του αντίκτυπου της μεταβλητότητας στην ποιότητα του προϊόντος.
 - Philip Crosby, Armand Feigenbaum και Kaoru Ishikawa (δεκαετίες 1960-1980): Αυτοί οι ειδικοί στη διαχείριση ποιότητας συνέβαλαν στην ανάπτυξη συστημάτων διαχείρισης ποιότητας, με την προσέγγιση Zero Defects του Crosby, την προσέγγιση του Feigenbaum.
- Ο Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας είναι μια συστηματική προσέγγιση που χρησιμοποιείται στις βιομηχανίες για την παρακολούθηση και τη βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων με τον εντοπισμό και την αντιμετώπιση πηγών διαφοροποίησης στις διαδικασίες παραγωγής. Ο πρωταρχικός στόχος του Στατιστικού Ελέγχου Ποιότητας είναι να διασφαλίσει ότι τα προϊόντα ικανοποιούν με συνέπεια τις απαιτήσεις των πελατών και διατηρούν υψηλό επίπεδο ποιότητας. Ακολουθούν ορισμένες γενικές πτυχές της χρήσης Στατιστικού Ελέγχου Ποιότητας σε έναν κλάδο:
- Συλλογή δεδομένων: Ο ΣΕΠ βασίζεται στη συλλογή και ανάλυση δεδομένων από διάφορες πηγές, όπως διαδικασίες παραγωγής, αποτελέσματα επιθεώρησης και σχόλια πελατών. Αυτά τα δεδομένα βοηθούν στον εντοπισμό τάσεων, προτύπων και πιθανών ζητημάτων που μπορεί να επηρεάσουν την ποιότητα του προϊόντος.
 - Διαγράμματα ελέγχου: Ένα βασικό εργαλείο στον Στατιστικό Έλεγχο Ποιότητας είναι το διάγραμμα ελέγχου, το οποίο χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση της σταθερότητας της διαδικασίας και τον εντοπισμό μετατοπίσεων στη μέση ή αυξημένη μεταβλητότητα. Τα διαγράμματα ελέγχου μπορούν να χρησιμοποιηθούν για διάφορους τύπους δεδομένων, συμπεριλαμβανομένων χαρακτηριστικών και μεταβλητών.
 - Σχέδια δειγματοληψίας: Οι βιομηχανίες χρησιμοποιούν συχνά σχέδια δειγματοληψίας για να επιθεωρήσουν ένα μέρος των παραγόμενων ειδών, αντί να επιθεωρήσουν κάθε μεμονωμένο είδος. Αυτά τα σχέδια έχουν σχεδιαστεί για να εξισορροπούν το κόστος της επιθεώρησης με τον κίνδυνο αποδοχής μιας παρτίδας με ελαττώματα. Η δειγματοληψία αποδοχής (Acceptance Sampling, AS) και η 100% επιθεώρηση είναι δύο κοινές προσεγγίσεις δειγματοληψίας.

- **Μελέτες ικανότητας διεργασιών:** Ο Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας βοηθά να καθοριστεί εάν μια διαδικασία μπορεί να παράγει με συνέπεια προϊόντα που πληρούν συγκεκριμένες απαιτήσεις ποιότητας. Οι μελέτες ικανότητας διεργασιών περιλαμβάνουν την ανάλυση της κατανομής των χαρακτηριστικών του προϊόντος και τη σύγκρισή της με τα επιθυμητά όρια ανοχής.
- **Στατιστικός Έλεγχος Διεργασιών (Statistical Process Control, ΣΕΔ ή SPC):** Ο ΣΕΔ είναι μια επέκταση του Στατιστικού Ελέγχου Ποιότητας που περιλαμβάνει παρακολούθηση και έλεγχο διαδικασιών σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιώντας στατιστικές τεχνικές. Ο ΣΕΔ επιτρέπει την έγκαιρη αναγνώριση των αλλαγών της διαδικασίας και επιτρέπει τη λήψη άμεσων διορθωτικών ενεργειών, μειώνοντας τον κίνδυνο παραγωγής μη συμμορφούμενων προϊόντων.
- **Συνεχής Βελτίωση:** Ο Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας προωθεί μια κουλτούρα συνεχούς βελτίωσης εντοπίζοντας ευκαιρίες για βελτιστοποίηση της διαδικασίας, μειώνοντας τα απόβλητα και βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση κόστους, αυξημένη ικανοποίηση πελατών και ανταγωνιστικό πλεονέκτημα για τον κλάδο.
- **Ανάλυση βασικής αιτίας:** Όταν εντοπίζονται ζητήματα ποιότητας, ο Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας βοηθά στον εντοπισμό της βασικής αιτίας του προβλήματος μέσω στατιστικής ανάλυσης και λήψης αποφάσεων βάσει δεδομένων. Αυτό επιτρέπει την εφαρμογή στοχευμένων διορθωτικών ενεργειών, αποτρέποντας την επανάληψη του σφάλματος.
- **Εκπαίδευση και ευαισθητοποίηση:** Η επιτυχής εφαρμογή του ΣΕΔ απαιτεί εργατικό δυναμικό που κατανοεί τις αρχές και τις τεχνικές του ποιοτικού ελέγχου με την βοήθεια της στατιστικής. Οι βιομηχανίες παρέχουν συχνά προγράμματα εκπαίδευσης και ευαισθητοποίησης για να εξασφαλίσουν ότι οι εργαζόμενοι μπορούν να εφαρμόσουν αποτελεσματικά τις μεθόδους ΣΕΠ/ΣΕΔ στην καθημερινή τους εργασία.
- **Ενοποίηση με Συστήματα Διαχείρισης Ποιότητας:** Ο Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας συχνά ενσωματώνεται με άλλα συστήματα διαχείρισης ποιότητας, όπως το ISO 9001, για να διασφαλιστεί μια ολοκληρωμένη και δομημένη προσέγγιση για τη διαχείριση ποιότητας σε ολόκληρο τον οργανισμό.

- Συνεργασία: Ο Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας προωθεί τη συνεργασία μεταξύ τμημάτων, όπως της παραγωγής, της διασφάλισης ποιότητας και της έρευνας και ανάπτυξης, παρέχοντας μια κοινή γλώσσα και μεθοδολογία για την κατανόηση και τη βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων και των διαδικασιών.

3.2 Εργαλεία ποιότητας

Τα 7 Εργαλεία Ποιοτικού Ελέγχου, γνωστά και ως “7 Βασικά Εργαλεία Ποιοτικού Ελέγχου”, είναι απαραίτητα για την παρακολούθηση και τη βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων και των διαδικασιών. Αυτά τα εργαλεία εισήχθησαν αρχικά από τον Δρ. Kaoru Ishikawa (1915-1989), έναν Ιάπωνα μηχανικό βιομηχανίας, και χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορες βιομηχανίες για τη βελτίωση της ποιότητας και της αποτελεσματικότητας. Τα εργαλεία αυτά είναι:

- Γράφημα Pareto: Ένα γράφημα Pareto είναι ένας συνδυασμός ραβδογράμματος και γραμμικού γραφήματος που βοηθά στον εντοπισμό και την ιεράρχηση των πιο σημαντικών ζητημάτων ή αιτιών προβλημάτων με βάση τον αντίκτυπό τους. Πήρε το όνομά του από τον Vilfredo Pareto (1848-1923), ο οποίος διατύπωσε τον κανόνα 80/20 (επίσης γνωστός ως Pareto Principle) στον οποίο το 80% των επιπτώσεων προέρχεται από το 20% των αιτιών.
- Ιστόγραμμα: Το ιστόγραμμα είναι μια γραφική αναπαράσταση της κατανομής συνεχών δεδομένων, αφού προηγηθεί η ομαδοποίηση τιμών σε συγκεκριμένα διαστήματα ή κλάσεις (bins). Βοηθά στην κατανόηση του σχήματος, του κέντρου και της εξάπλωσης των δεδομένων και στον εντοπισμό προτύπων, ακραίων τιμών και κανονικών ή μη κανονικών κατανομών.
- Διάγραμμα αιτίας και αποτελέσματος (Διάγραμμα Ψαροκόκαλου-Fishbone,): Αυτό το εργαλείο χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό και την ανάλυση των πιθανών αιτιών ενός συγκεκριμένου προβλήματος ή αποτελέσματος. Οργανώνει οπτικά τις αιτίες σε κατηγορίες, διευκολύνοντας τη συστηματική εξέταση και συζήτηση των παραγόντων που συμβάλλουν στο ζήτημα.
- Διαγράμματα ελέγχου: Τα διαγράμματα ελέγχου χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση της σταθερότητας και της απόδοσης μιας διεργασίας με την πάροδο του χρόνου. Βοηθούν στον εντοπισμό αλλαγών στη μέση τιμή ή τη μεταβλητότητα της διεργασίας, υποδεικνύοντας πιθανά προβλήματα. Τα πιο γνωστά διαγράμματα ελέγχου

είναι τα διαγράμματα \bar{X} -bar και R (ή \bar{X} και R), \bar{X} -BAR και S (ή \bar{X} και S) καθώς επίσης και τα διαγράμματα p , np , c και u . Τα πρώτα \bar{X} και R , \bar{X} και S είναι τα πιο γνωστά διαγράμματα ελέγχου για μεταβλητές (*variables control charts*) και τα p , np , c και u είναι τα πιο γνωστά διαγράμματα ελέγχου για δεδομένα ιδιοτήτων (*attributes control charts*).

- **Διάγραμμα ροής:** Το διάγραμμα ροής (flowchart) είναι ένα εργαλείο απεικόνισης που δείχνει βήμα προς βήμα τη ροή μιας διαδικασίας με τη χρήση σχημάτων και βελών. Είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για την κατανόηση, τεκμηρίωση, ανάλυση και βελτίωση διαδικασιών σε τομείς όπως η παραγωγή, η διοίκηση και η ποιότητα.
- **Φύλλο ελέγχου:** Το φύλλο ελέγχου είναι ένα απλό εργαλείο συλλογής δεδομένων που χρησιμοποιείται για την συστηματική καταγραφή και ανάλυση δεδομένων. Βοηθά στην οργάνωση, τη σύνοψη και την παρουσίαση πληροφοριών σχετικά με μια διαδικασία ή ένα πρόβλημα, διευκολύνοντας τον εντοπισμό προτύπων και περιοχών για βελτίωση.
- **Διάγραμμα διασποράς (Scatterplot):** Ένα διάγραμμα διασποράς είναι μια γραφική αναπαράσταση της σχέσης μεταξύ δύο μεταβλητών. Βοηθά στον εντοπισμό οποιασδήποτε συσχέτισης ή αιτιώδους συνάφειας μεταξύ των μεταβλητών, η οποία μπορεί να είναι χρήσιμη για την κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν μια διαδικασία ή ένα πρόβλημα.

Αυτά τα 7 Εργαλεία Ποιοτικού Ελέγχου παρέχουν τη βάση για την κατανόηση και τη βελτίωση των διαδικασιών, τον εντοπισμό των βασικών αιτιών και τη βελτίωση της συνολικής ποιότητας. Χρησιμοποιώντας αυτά τα εργαλεία, οι οργανισμοί μπορούν να λαμβάνουν αποφάσεις βάσει δεδομένων, να βελτιστοποιούν τις διαδικασίες και να βελτιώνουν τη συνολική απόδοση (Γραφανάκης, 2000).

3.3 Διαγράμματα ελέγχου

Τα διαγράμματα ελέγχου είναι γραφικά εργαλεία που χρησιμοποιούνται για την παρακολούθηση και ανάλυση της σταθερότητας και της απόδοσης μιας διεργασίας με την πάροδο του χρόνου. Βοηθούν στον εντοπισμό αλλαγών στη μέση τιμή ή τη μεταβλητότητα της διαδικασίας, υποδεικνύοντας πιθανά προβλήματα. Τα διαγράμματα ελέγχου αποτελούν ουσιαστικό μέρος του Στατιστικού Ελέγχου Διεργασιών (ΣΕΔ) καθώς και της μεθοδολογίας Έξι-Σίγμα (Six Sigma, δείτε Harry & Schroeder, 2000; Pyzdek & Keller, 2014). Όπως έχει ήδη αναφερθεί, υπάρχουν διάφοροι τύποι διαγραμμάτων

ελέγχου, ανάλογα με τον τύπο των δεδομένων που αναλύονται (μεταβλητές ή χαρακτηριστικά-ιδιότητες).

- Διαγράμματα ελέγχου για μεταβλητές:
 - Διάγραμμα Ελέγχου X-Bar (\bar{X}): Αυτό το διάγραμμα αντιπροσωπεύει τη μέση (μέση) τιμή ενός δείγματος με την πάροδο του χρόνου. Βοηθά στον εντοπισμό αλλαγών στο μέσο όρο της διαδικασίας. Το διάγραμμα X απεικονίζεται με το χρόνο στον άξονα X και τη δειγματική μέση τιμή στον άξονα Y.
 - Διάγραμμα Ελέγχου εύρους (R): Το διάγραμμα ελέγχου R παρακολουθεί τη μεταβλητότητα της διαδικασίας σχεδιάζοντας το εύρος κάθε δείγματος με την πάροδο του χρόνου. Βοηθά στον εντοπισμό αλλαγών στην τυπική απόκλιση της διαδικασίας. Το διάγραμμα ελέγχου R απεικονίζεται με το χρόνο στον άξονα X και την τιμή του εύρους στον άξονα Y.
 - Διάγραμμα Ελέγχου τυπικής απόκλισης (S): Το Διάγραμμα ελέγχου τυπικής απόκλισης (S) βασίζεται στην έννοια της τυπικής απόκλισης, η οποία μετρά το μέγεθος της διακύμανσης ή της διασποράς σε ένα σύνολο σημείων δεδομένων. Σχεδιάζοντας τις τιμές τυπικής απόκλισης με την πάροδο του χρόνου, μπορεί ο ελεγκτής να παρατηρήσει τάσεις και αλλαγές στη μεταβλητότητα της διαδικασίας. Το διάγραμμα ελέγχου S απεικονίζεται με το χρόνο στον άξονα X και την τιμή της δειγματικής τυπικής απόκλισης στον άξονα Y.
- Διαγράμματα ελέγχου ιδιοτήτων:
 - Διάγραμμα Ελέγχου p: Το διάγραμμα ελέγχου p χρησιμοποιείται για δεδομένα χαρακτηριστικών που αντιπροσωπεύουν αναλογίες ή ποσοστά. Παρακολουθεί την αναλογία των ελαττωματικών μονάδων που παράγει μια διεργασία χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες δειγματικές αναλογίες από κάθε δείγμα. Το διάγραμμα ελέγχου p σχεδιάζεται με το χρόνο στον άξονα X και την αναλογία των ελαττωμάτων στον άξονα Y.
 - Διάγραμμα ελέγχου np: Το διάγραμμα ελέγχου np χρησιμοποιείται για δεδομένα χαρακτηριστικών που αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των ελαττωματικών μονάδων που παράγει μια διεργασία χρησιμοποιώντας το δειγματικό αριθμό ελαττωματικών από κάθε δείγμα. Είναι κατάλληλο για μεταβλητά (μη σταθερά) μεγέθη δειγμάτων.

Το διάγραμμα np απεικονίζεται με το χρόνο στον άξονα X και τον αριθμό των ελαττωμάτων στον άξονα Y .

- Διάγραμμα Ελέγχου c : Το διάγραμμα ελέγχου c χρησιμοποιείται για δεδομένα χαρακτηριστικών που αντιπροσωπεύουν την αναλογία ελαττωματικών μονάδων ή μη συμμορφούμενων χαρακτηριστικών σε ένα δείγμα. Το διάγραμμα c απεικονίζεται με το χρόνο στον άξονα X και τον αριθμό των ελαττωμάτων στον άξονα Y . Βοηθά στον εντοπισμό αλλαγών στο μέσο αριθμό ελαττωμάτων με την πάροδο του χρόνου.
- Διάγραμμα Ελέγχου u : Το διάγραμμα ελέγχου u χρησιμοποιείται για δεδομένα χαρακτηριστικών που αντιπροσωπεύουν τον αριθμό των ελαττωμάτων ανά μονάδα ελέγχου σε δείγματα μονάδων ελέγχου. Το διάγραμμα ελέγχου u απεικονίζεται με το χρόνο στον άξονα X και τον μέσο αριθμό ελαττωμάτων ανά μονάδα ελέγχου στον άξονα Y . Βοηθά στον εντοπισμό αλλαγών στο μέσο αριθμό ελαττωμάτων ανά μονάδα ελέγχου με την πάροδο του χρόνου.

Για την δημιουργία διαγραμμάτων ελέγχου, πρέπει να συλλεχθούν δεδομένα από τη διαδικασία και να υπολογιστούν οι τιμές κατάλληλων στατιστικών συναρτήσεων (π.χ. δειγματική μέση τιμή, δειγματικό εύρος, δειγματική τυπική απόκλιση, δειγματική αναλογία, αριθμός ελαττωμάτων / ελαττωματικών κλπ). Στην συνέχεια, υπολογίζεται το ανώτερο όριο ελέγχου (Upper Control Limit, AOE ή UCL) και το κατώτερο όριο ελέγχου (Lower Control Limit, KOE ή LCL) χρησιμοποιώντας κατάλληλους τύπους (βλέπε π.χ. Γεωργακάκος, 2002; Μπερσίμης κ.α. 2021; Montgomery 2020). Αυτά τα όρια αντιπροσωπεύουν το εύρος εντός του οποίου αναμένεται να εμπίπτουν τα δεδομένα διεργασίας εάν βρίσκονται σε κατάσταση στατιστικού ελέγχου. Τα διαγράμματα ελέγχου λειτουργούν συγκρίνοντας νέα σημεία δεδομένων με τα καθιερωμένα όρια ελέγχου. Εάν ένα σημείο δεδομένων βρίσκεται εκτός των ορίων ελέγχου σε ένα διάγραμμα ελέγχου, υποδηλώνει ότι μπορεί να υπάρχει μια ειδική αιτία ή ένα ασυνήθιστο γεγονός που επηρεάζει τη διαδικασία. Αυτή η κατάσταση αναφέρεται ως κατάσταση «εκτός ελέγχου» ή «σήμα εκτός ελέγχου διεργασίας». Η εμφάνιση ενός σήματος υποδηλώνει ότι η διαδικασία δεν είναι σταθερή και μπορεί να απαιτεί διερεύνηση για τον εντοπισμό και την αντιμετώπιση της βασικής αιτίας της απόκλισης.

Υπάρχουν δύο τύποι ορίων ελέγχου σε ένα διάγραμμα ελέγχου: το ανώτερο όριο ελέγχου (AOE) και το κατώτερο όριο ελέγχου (KOE). Τα σημεία δεδομένων που βρίσκονται εκτός

αυτών των ορίων θεωρούνται ασυνήθιστα και ενδέχεται να σηματοδοτούν πρόβλημα στη διαδικασία. Ωστόσο, δεν υποδεικνύουν όλα τα σήματα εκτός ελέγχου ένα σημαντικό πρόβλημα. Ορισμένα σήματα μπορεί να οφείλονται σε κοινές αιτίες ή σε φυσική μεταβλητότητα στη διαδικασία, η οποία μπορεί να αντιμετωπιστεί μέσω προσαρμογών ή βελτιώσεων της διαδικασίας.

Για να προσδιοριστεί εάν ένα σήμα εκτός ελέγχου οφείλεται σε μια ειδική αιτία ή σε μια κοινή αιτία, είναι απαραίτητο να ακολουθηθεί μια συστηματική προσέγγιση, όπως τα ακόλουθα βήματα:

- Επαλήθευση του σήματος: Επιβεβαίωση ότι το σημείο δεδομένων είναι πραγματικά εκτός των ορίων ελέγχου και ότι δεν υπάρχουν σφάλματα υπολογισμού ή καταγραφής.
- Έλεγχος των κανόνων: Τα διαγράμματα ελέγχου χρησιμοποιούν συγκεκριμένους κανόνες για να προσδιορίσουν πότε ένα σημείο είναι εκτός ελέγχου, οπότε με τον έλεγχο επιβεβαιώνετε ότι το σήμα δημιουργήθηκε από έναν από αυτούς τους κανόνες. Αυτοί οι κανόνες χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των γραφικών σημείων δεδομένων και τον εντοπισμό τυχόν πιθανών ζητημάτων που χρειάζονται προσοχή. Ακολουθούν οι κύριοι κανόνες για τα διαγράμματα ελέγχου:
 - Σημεία εκτός των ορίων ελέγχου (UCL και LCL): Εάν οποιοδήποτε σημείο δεδομένων βρίσκεται εκτός των ανώτερων ή κατώτερων ορίων ελέγχου, θεωρείται σήμα ότι η διαδικασία είναι εκτός ελέγχου. Αυτό υποδηλώνει την παρουσία ειδικών αιτιών ή αιτιών που μπορούν να αποδοθούν που απαιτούν περαιτέρω διερεύνηση και διορθωτικές ενέργειες.
 - Κανόνες εκτέλεσης: Αυτοί οι κανόνες βοηθούν στον εντοπισμό μοτίβων ή τάσεων στα δεδομένα που μπορεί να υποδεικνύουν ειδικές αιτίες. Υπάρχουν τρεις κύριοι κανόνες λειτουργίας (AT&T Technologies, 1984; Automotive Industry Action Group, 2005):
 - ✓ Επτά διαδοχικά σημεία στη μία πλευρά της κεντρικής γραμμής (CL): Εάν επτά διαδοχικά σημεία δεδομένων βρίσκονται στη μία πλευρά της κεντρικής γραμμής, μπορεί να υποδηλώνει μια ειδική αιτία που επηρεάζει τη διαδικασία.
 - ✓ Τέσσερα στα πέντε σημεία στη μία πλευρά της κεντρικής γραμμής: Εάν τέσσερα από τα πέντε διαδοχικά σημεία βρίσκονται στη μία πλευρά της κεντρικής γραμμής, μπορεί επίσης να υποδηλώνει μια ειδική αιτία.

- ✓ Οκτώ σημεία στη σειρά αυξανόμενα ή φθίνοντα: Εάν οκτώ διαδοχικά σημεία δεδομένων δείχνουν αυξητική ή πτωτική τάση, θα μπορούσε να αποτελεί ένδειξη ειδικής αιτίας.
- Κανόνας δύο στα τρία σημεία: Εάν δύο από τα τρία διαδοχικά σημεία βρίσκονται εκτός των ορίων ελέγχου, θεωρείται σήμα ότι η διαδικασία είναι εκτός ελέγχου.
- Κανόνες τάσης: Αυτοί οι κανόνες βοηθούν στον εντοπισμό τάσεων ή αλλαγών στη διαδικασία με την πάροδο του χρόνου. Υπάρχουν δύο βασικοί κανόνες τάσης:
 - ✓ Έξι διαδοχικά σημεία εναλλάξ πάνω και κάτω από την κεντρική γραμμή: Εάν έξι διαδοχικά σημεία δεδομένων εναλλάσσονται πάνω και κάτω από την κεντρική γραμμή, μπορεί να υποδηλώνει μια ειδική αιτία που επηρεάζει τη διαδικασία.
 - ✓ Δεκαπέντε σημεία στη σειρά που κινούνται συστηματικά: Εάν δεκαπέντε διαδοχικά σημεία δεδομένων κινούνται συστηματικά είτε προς τα πάνω είτε προς τα κάτω, θα μπορούσε να είναι ένδειξη ειδικής αιτίας.

Κατά την ανάλυση των διαγραμμάτων ελέγχου, αυτοί οι κανόνες αποτελούν κατευθυντήριες γραμμές αλλά ενδέχεται να απαιτούνται προσαρμογές σε αυτούς τους κανόνες, οπότε πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η γνώση της διεργασίας και η τεχνογνωσία του τομέα κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων του διαγράμματος ελέγχου.

- Διερεύνηση της αιτίας: Μόλις επιβεβαιωθεί ένα σήμα, πρέπει να διερευνηθεί η διαδικασία για να εντοπιστούν οι πιθανοί λόγοι για την κατάσταση εκτός ελέγχου. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει ανάλυση της διαδικασίας, ανασκόπηση ιστορικών δεδομένων ή διεξαγωγή πειραμάτων για την κατανόηση της βασικής αιτίας.
- Εφαρμογή διορθωτικών ενεργειών: Αφού εντοπιστεί η αιτία, πρέπει να εφαρμοστούν οι κατάλληλες διορθωτικές ενέργειες για την αντιμετώπιση του προβλήματος και την επαναφορά της διαδικασίας σε κατάσταση στατιστικού ελέγχου.
- Παρακολούθηση και επικύρωση βελτιώσεων: Μετά την εφαρμογή αλλαγών, πρέπει να συνεχιστεί η παρακολούθηση της διαδικασίας χρησιμοποιώντας διαγράμματα ελέγχου για να διασφαλιστεί ότι οι βελτιώσεις είναι βιώσιμες και ότι η διαδικασία παραμένει υπό έλεγχο.

Συνοπτικά, όταν ένα σημείο δεδομένων βρίσκεται εκτός των ορίων ελέγχου σε ένα διάγραμμα ελέγχου, υποδηλώνει μια κατάσταση εκτός ελέγχου που μπορεί να απαιτεί περαιτέρω διερεύνηση για τον εντοπισμό και την αντιμετώπιση της υποκείμενης αιτίας.

Ακολουθώντας μια συστηματική προσέγγιση, μπορεί να προσδιοριστεί εάν το σήμα οφείλεται σε ειδική αιτία ή σε κοινή αιτία και να πραγματοποιηθούν οι κατάλληλες διορθωτικές ενέργειες για την βελτίωση της διαδικασίας (Γεωργακάκος, 2002; Κούτρας, 2008; Γραφανάκης, 2008).

3.4 Πειραματικοί σχεδιασμοί

Ο Genichi Taguchi, ένας διάσημος Ιάπωνας μηχανικός και ειδικός στον ποιοτικό έλεγχο, ανέπτυξε τη μέθοδο Taguchi, στόχος της οποίας αποτελεί η βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων και η ελαχιστοποίηση της μεταβλητότητας μέσω πειραματικού σχεδιασμού και στατιστικής ανάλυσης. Η μέθοδος Taguchi είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στις μεταποιητικές βιομηχανίες και στην ανάπτυξη προϊόντων και συντελεί στην αύξηση της απόδοσης του προϊόντος και στη μείωση του κόστους.

Τα πειράματα σχεδιασμού Taguchi, ένα βασικό συστατικό της μεθόδου Taguchi, είναι μια συστηματική προσέγγιση για το σχεδιασμό και τη διεξαγωγή πειραμάτων για τη βελτιστοποίηση της ποιότητας. Τα πειράματα αυτά έχουν σχεδιαστεί έτσι ώστε να είναι εφικτός ο εντοπισμός των σημαντικότερων παραγόντων που επηρεάζουν την ποιότητα του προϊόντος και ο καθορισμός των βέλτιστων επιπέδων για αυτούς τους παράγοντες με σκοπό την επίτευξη της επιθυμητής απόδοσης.

Βασικά χαρακτηριστικά των πειραμάτων σχεδιασμού Taguchi:

- Ορθογώνιοι πίνακες: Τα πειράματα Taguchi χρησιμοποιούν ορθογώνιους πίνακες, οι οποίοι είναι μαθηματικοί πίνακες που αντιπροσωπεύουν έναν συνδυασμό διαφόρων παραγόντων και των επιπέδων τους. Αυτές οι συστοιχίες βοηθούν στην ελαχιστοποίηση του αριθμού των απαιτούμενων πειραμάτων, διατηρώντας παράλληλα την ικανότητα εντοπισμού σημαντικών παραγόντων που επηρεάζουν την ποιότητα του προϊόντος.
- Λόγος σήματος προς θόρυβο (Signal to Noise Ratio, S/N): Ο λόγος S/N είναι μια κρίσιμη έννοια στα πειράματα Taguchi. Μετρά την απόδοση ενός προϊόντος ή μιας διαδικασίας συγκρίνοντας την επιθυμητή έξοδο (σήμα) με την ανεπιθύμητη μεταβλητότητα ή απόκλιση (θόρυβος). Ένας υψηλότερος λόγος S/N υποδηλώνει καλύτερη ποιότητα και απόδοση προϊόντος.
- Συνάρτηση απώλειας ποιότητας (Quality Loss Function, QLF): Η QLF είναι μια μαθηματική συνάρτηση που ποσοτικοποιεί το κόστος των αποκλίσεων από την επιθυμητή

απόδοση του προϊόντος. Βοηθά στον προσδιορισμό του οικονομικού αντίκτυπου των διακυμάνσεων της ποιότητας και καθοδηγεί τη διαδικασία βελτιστοποίησης.

- **Ανάλυση Διακύμανσης (Analysis of Variance, ANOVA):** Μετά τη διεξαγωγή των πειραμάτων, χρησιμοποιείται ANOVA για να προσδιοριστεί η σημασία κάθε παράγοντα και η αλληλεπίδρασή του με άλλους παράγοντες. Αυτή η ανάλυση βοηθά στον εντοπισμό των παραγόντων που επηρεάζουν περισσότερο την ποιότητα του προϊόντος.

Τα πειράματα σχεδιασμού Taguchi ακολουθούν μια δομημένη προσέγγιση, η οποία περιλαμβάνει τα ακόλουθα βήματα:

- **Καθορισμός του ποιοτικού στόχου:** Προσδιορισμός της επιθυμητής απόδοσης του προϊόντος και καθορισμός ενός ποιοτικού στόχου.
- **Ανάπτυξη του Πειραματικού Σχέδιο:** Επιλογή ενός κατάλληλου ορθογώνιου πίνακα με βάση τον αριθμό των παραγόντων και τα επίπεδά τους.
- **Διεξαγωγή των πειραμάτων:** Εκτέλεση των πειραμάτων σύμφωνα με το σχεδιασμένο σχέδιο, συλλέγοντας δεδομένα για την απόδοση και την ποιότητα του προϊόντος.
- **Ανάλυση των Δεδομένων:** Υπολογισμός της αναλογίας S/N για κάθε πείραμα και εκτέλεση ANOVA για τον εντοπισμό σημαντικών παραγόντων.
- **Βελτιστοποίηση της διαδικασίας:** Προσαρμογή των επιπέδων των συντελεστών για να επίτευξη της μέγιστης αναλογίας S/N και την ελαχιστοποίησης των απωλειών της ποιότητας.
- **Επικύρωση των αποτελεσμάτων:** Εκτέλεση πρόσθετων πειραμάτων για να επιβεβαιωθούν βελτιστοποιημένες ρυθμίσεις και να εξασφαλιστεί η επιθυμητή ποιότητα προϊόντος.

Τα πειράματα σχεδιασμού Taguchi έχουν υιοθετηθεί ευρέως σε διάφορους κλάδους, συμπεριλαμβανομένης της αυτοκινητοβιομηχανίας, των ηλεκτρονικών και της αεροδιαστημικής, για τη βελτίωση της ποιότητας των προϊόντων, τη μείωση του κόστους και την ενίσχυση της ικανοποίησης των πελατών (Κουτροβέλης, 2002; Λογοθέτης, 2001).

4. Μελέτη περίπτωσης

4.1 Συλλογή δεδομένων

Η συλλογή δεδομένων αποτελεί το θεμέλιο για οποιαδήποτε στατιστική ανάλυση και αξιολόγηση ποιότητας σε βιομηχανικές διεργασίες. Στο πλαίσιο ενός εργοστασίου που παράγει πλαστικούς σωλήνες για χρήση σε δίκτυα άρδευσης, ύδρευσης, προστασίας καλωδίων και φυσικού αερίου, η συστηματική παρακολούθηση και καταγραφή κρίσιμων ποιοτικών παραμέτρων είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της σταθερότητας και της συμμόρφωσης των προϊόντων με τα πρότυπα και τις απαιτήσεις της αγοράς.

Σε ένα τέτοιο περιβάλλον παραγωγής, η συλλογή δεδομένων πραγματοποιείται σε 24ωρη βάση, καλύπτοντας το σύνολο του παραγωγικού εξοπλισμού, δηλαδή όλες τις ενεργές μηχανές παραγωγής σωλήνων. Οι μετρήσεις διενεργούνται από τους τεχνικούς ή μηχανικούς βάρδιας, οι οποίοι εργάζονται σε τρεις διαδοχικές βάρδιες των οκτώ ωρών, εξασφαλίζοντας τη συνεχή επιτήρηση των διεργασιών.

Τα δείγματα λαμβάνονται ανά τακτά χρονικά διαστήματα – συνήθως κάθε δύο ώρες – και αφορούν βασικά χαρακτηριστικά του προϊόντος, όπως:

- Το βάρος ανά μέτρο σωλήνα,
- Η διάμετρος (εξωτερική ή/και εσωτερική),
- Το ελάχιστο και μέγιστο πάχος τοιχώματος,
- Άλλα χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τις προδιαγραφές του εκάστοτε τύπου σωλήνα.

Οι μετρήσεις καταγράφονται σε ειδικά προγράμματα παρακολούθησης παραγωγής και ποιότητας, τα οποία χρησιμοποιούνται τόσο από το τεχνικό προσωπικό όσο και από τα ανώτερα στελέχη της επιχείρησης. Μέσω αυτών των ψηφιακών συστημάτων, εξασφαλίζεται η ιχνηλασιμότητα των παρτίδων, η δυνατότητα παρακολούθησης τάσεων στη διεργασία και η άμεση παρέμβαση σε περίπτωση απόκλισης από τα αποδεκτά όρια.

Η συλλογή των δεδομένων αυτών δεν εξυπηρετεί μόνο σκοπούς καθημερινής παρακολούθησης της λειτουργίας των μηχανημάτων. Σε περιοδική βάση - συνήθως μία φορά το χρόνο ή και συχνότερα όταν απαιτείται - πραγματοποιούνται αναλύσεις ευρύτερης κλίμακας, με στόχο τη διερεύνηση αιτιών απόρριψης προϊόντων (scrap),

καθυστερήσεων στην παραγωγή και άλλων παραμέτρων που σχετίζονται με την αποδοτικότητα και την ποιότητα της διαδικασίας.

Οι αιτίες του σκραπ καταγράφονται, ομαδοποιούνται και αναλύονται στατιστικά, προκειμένου να εντοπιστούν οι κυριότεροι παράγοντες που επηρεάζουν αρνητικά την παραγωγή. Παρόμοιες αναλύσεις πραγματοποιούνται και για την απόδοση των βαρδιών, τη συχνότητα βλαβών, τις αποκλίσεις από τις προδιαγραφές, και άλλα κρίσιμα ζητήματα. Τα αποτελέσματα αυτών των αναλύσεων αξιοποιούνται από τη διοίκηση της εταιρείας για τη λήψη αποφάσεων, την εφαρμογή διορθωτικών ενεργειών και τη χάραξη στρατηγικών βελτίωσης.

Η αξιοπιστία των στατιστικών αναλύσεων εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συνέπεια, την ακρίβεια και την πληρότητα της συλλογής δεδομένων. Για τον λόγο αυτό, η εκπαίδευση του προσωπικού, η τήρηση τυποποιημένων διαδικασιών μέτρησης και η χρήση κατάλληλων οργάνων είναι στοιχεία καθοριστικής σημασίας.

Εν κατακλείδι, η σωστά σχεδιασμένη και εκτελεσμένη συλλογή δεδομένων αποτελεί αναπόσπαστο μέρος της συνολικής προσπάθειας για διαρκή βελτίωση της ποιότητας σε ένα εργοστάσιο πλαστικών σωλήνων. Μέσω της παρακολούθησης της παραγωγικής διαδικασίας σε πραγματικό χρόνο αλλά και της περιοδικής αξιολόγησης δεδομένων, ενισχύεται η δυνατότητα πρόληψης σφαλμάτων, βελτίωσης της απόδοσης και ικανοποίησης των απαιτήσεων των πελατών (Montgomery, 2020; Ευαγγελίδης, 2004).

4.2 Εφαρμογή μεθόδων Διασφάλισης Ποιότητας

Η συστηματική εφαρμογή βασικών εργαλείων ποιότητας αποτελεί θεμέλιο λίθο για τη διασφάλιση της σταθερότητας, της αξιοπιστίας και της συνεχούς βελτίωσης κάθε βιομηχανικής παραγωγικής διαδικασίας. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, εξετάζεται η υιοθέτηση και ενσωμάτωση αυτών των εργαλείων σε εργοστάσιο παραγωγής πλαστικών σωλήνων, όπου η ποιότητα έχει ενσωματωθεί πλήρως στη νοοτροπία όλων των επιπέδων προσωπικού, από τη διοίκηση μέχρι τον χειριστή μηχανής παραγωγής. Η καθημερινή πρακτική βασίζεται τόσο στην εφαρμογή εργαλείων ελέγχου όσο και σε διαδικασίες ενημέρωσης, τεκμηρίωσης και συνεργασίας.

Η έννοια της ποιότητας δεν αντιμετωπίζεται ως μία μεμονωμένη διαδικασία, αλλά ως οργανικό στοιχείο της καθημερινής λειτουργίας του εργοστασίου. Οι χειριστές των μηχανών εφαρμόζουν τους απαραίτητους ελέγχους, παρακολουθώντας σε πραγματικό

χρόνο κρίσιμες παραμέτρους, όπως το πάχος, η διάμετρος και το βάρος ανά μέτρο σωλήνα. Στην πράξη, χρησιμοποιούνται και απλοί αλλά ουσιαστικοί μηχανισμοί ελέγχου, όπως η μέτρηση εξωτερικής διαμέτρου με δαχτυλίδια ελέγχου, τα οποία είναι κατασκευασμένα στα όρια των τεχνικών προδιαγραφών του προϊόντος. Επιπλέον, η παρουσία σύγχρονων αισθητήρων, όπως συστήματα σάρωσης με λέιζερ ή σκάνερ, επιτρέπουν την αυτόματη ειδοποίηση του χειριστή (μέσω φωτεινού φάρου ή σειρήνας) σε περιπτώσεις παραγωγής εκτός ανοχών.

Η διαδικασία ελέγχου συνοδεύεται από την τήρηση εντύπων ελέγχου για κάθε παρτίδα. Σε αυτά αναγράφονται όχι μόνο οι μετρήσεις των κρίσιμων χαρακτηριστικών, αλλά και τα πλήρη τεχνικά χαρακτηριστικά του προϊόντος, όπως το είδος συσκευασίας, η σήμανση, η ετικέτα, η ημερομηνία παραγωγής και άλλες χρήσιμες πληροφορίες ιχνηλασιμότητας. Οι μηχανικοί βάρδιας και οι υπεύθυνοι ποιοτικού ελέγχου συνεργάζονται στενά, επιβλέποντας τη συμμόρφωση με τις προδιαγραφές και επεμβαίνοντας όταν παρατηρηθούν αποκλίσεις.

Η καλλιέργεια κουλτούρας ποιότητας επιτυγχάνεται και μέσω της οριζόντιας επικοινωνίας. Δεν υπάρχει κατακερματισμός μεταξύ τμημάτων, αλλά μια κοινή προσπάθεια για την επίτευξη σταθερής ποιότητας. Η διοίκηση υποστηρίζει αυτή τη φιλοσοφία με διαρκή εκπαίδευση του προσωπικού, ενθάρρυνση αναφορών αποκλίσεων και εφαρμογή πολιτικών συνεχούς βελτίωσης. Το εργασιακό περιβάλλον προάγει την ενεργό συμμετοχή όλων των εμπλεκόμενων στην αναγνώριση προβλημάτων και στη συνεισφορά λύσεων.

Η εφαρμογή εργαλείων όπως τα διαγράμματα ελέγχου, τα διαγράμματα Pareto, τα διαγράμματα ροής και τα Ishikawa δεν περιορίζεται σε ακαδημαϊκό επίπεδο. Στο συγκεκριμένο βιομηχανικό περιβάλλον, αυτά τα εργαλεία χρησιμοποιούνται πρακτικά, ενισχύοντας την παραγωγικότητα και μειώνοντας τη σπατάλη (scrap). Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στην παρουσίαση πιο σύνθετων στατιστικών αναλύσεων, οι οποίες δεν έχουν μόνο ερευνητικό ενδιαφέρον, αλλά μπορούν να προσφέρουν ουσιαστική συνεισφορά στη βελτιστοποίηση πραγματικών βιομηχανικών διεργασιών, ενισχύοντας την ικανότητα πρόβλεψης και πρόληψης αποκλίσεων.

4.3 Περιορισμοί

Η συλλογή δεδομένων αποτελεί κρίσιμη φάση σε κάθε μελέτη ή πρόγραμμα διασφάλισης ποιότητας. Ωστόσο, η διαδικασία αυτή συνοδεύεται συχνά από πλήθος περιορισμών, τόσο πρακτικών όσο και θεσμικών, οι οποίοι μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την αξιοπιστία, την πληρότητα και τη χρησιμότητα των δεδομένων.

Ένα από τα βασικά εμπόδια που προκύπτει, ιδιαίτερα στο πλαίσιο ακαδημαϊκής ή ερευνητικής εργασίας, είναι η πρόσβαση σε πραγματικά δεδομένα από επιχειρήσεις. Πολλές εταιρείες, ειδικά αυτές που λειτουργούν με εμπορικό και κερδοσκοπικό χαρακτήρα, είναι επιφυλακτικές στην κοινοποίηση ποιοτικών, τεχνικών ή λειτουργικών στοιχείων, ακόμα και αν αυτά πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για εκπαιδευτικούς σκοπούς. Οι λόγοι περιλαμβάνουν:

- **Εμπιστευτικότητα:** Τα δεδομένα μπορεί να περιλαμβάνουν ευαίσθητες πληροφορίες που συνδέονται με την τεχνογνωσία, την ποιότητα παραγωγής ή την αποδοτικότητα του εργοστασίου.
- **Ανησυχία για αξιολόγηση:** Η αποκάλυψη ποιοτικών αποκλίσεων ή εσωτερικών προβλημάτων θα μπορούσε να εκθέσει την επιχείρηση.
- **Εργασιακά και διοικητικά θέματα:** Πολλές φορές απαιτείται έγκριση από πολλαπλά επίπεδα διοίκησης, κάτι που μπορεί να καθυστερήσει ή και να εμποδίσει την παροχή στοιχείων.

Ακόμη και σε περιπτώσεις όπου τα δεδομένα συλλέγονται εσωτερικά, η διαδικασία αντιμετωπίζει δυσκολίες σε λειτουργικό επίπεδο. Σε ένα εργοστάσιο, όπως αυτό της παραγωγής πλαστικών σωλήνων, όπου η παραγωγή είναι συνεχής και εντατική, το προσωπικό ενδέχεται να αντιμετωπίζει:

- **Περιορισμούς χρόνου:** Οι τεχνικοί βάρδιας έχουν ήδη αυξημένα καθήκοντα, γεγονός που μπορεί να περιορίσει τη συνέπεια ή την ακρίβεια στην καταγραφή δεδομένων.
- **Ασυνέπεια στη μεθοδολογία μέτρησης:** Η αλλαγή προσωπικού ανά βάρδια ενδέχεται να επηρεάζει τον τρόπο που συλλέγονται και καταγράφονται τα δεδομένα, εφόσον δεν τηρούνται αυστηρά τυποποιημένες διαδικασίες.

- Τεχνικά λάθη ή ελλείψεις: Οι μετρήσεις μπορεί να επηρεάζονται από καλιμπράρισμα οργάνων, ανθρώπινο λάθος ή ακόμα και από περιβαλλοντικούς παράγοντες (π.χ. θερμοκρασία, υγρασία).

Ένας άλλος περιορισμός αφορά την αντιπροσωπευτικότητα των δεδομένων. Εάν τα δείγματα δεν λαμβάνονται συστηματικά και με βάση ένα συνεκτικό πρόγραμμα δειγματοληψίας, τότε υπάρχει κίνδυνος τα συμπεράσματα της ανάλυσης να μην αντανακλούν τη συνολική εικόνα της παραγωγικής διαδικασίας. Επιπλέον, ορισμένοι δείκτες, όπως το ποσοστό σκραπ ή οι καθυστερήσεις στην παραγωγή, ενδέχεται να εξαρτώνται από εξωγενείς παράγοντες, όπως:

- Προγραμματισμένες ή έκτακτες συντηρήσεις,
- Έλλειψη πρώτων υλών,
- Μεταβολές στις παραγγελίες ή στις προδιαγραφές των πελατών.

Σε αυτά προστίθεται και ο ανθρώπινος παράγοντας: η ερμηνεία των αιτιών απόρριψης ή καθυστερήσεων μπορεί να είναι υποκειμενική, ειδικά όταν δεν υπάρχει σαφές πλαίσιο κατηγοριοποίησης.

Για να μετριαστούν οι παραπάνω περιορισμοί, είναι αναγκαία η ύπαρξη:

- Καλά σχεδιασμένων πρωτοκόλλων καταγραφής,
- Συστηματικής εκπαίδευσης του προσωπικού,
- Ολοκληρωμένων πληροφοριακών συστημάτων που υποστηρίζουν την αυτόματη συλλογή, αποθήκευση και ανάλυση των δεδομένων.

Τέλος, σε ακαδημαϊκό επίπεδο, η χρήση ανωνυμοποιημένων ή συνθετικών δεδομένων (δηλαδή τεχνητών δεδομένων βασισμένων σε πραγματικά σενάρια) αποτελεί μία αξιόπιστη λύση, που επιτρέπει την εξάσκηση σε στατιστικές μεθόδους χωρίς να θίγεται η εμπιστευτικότητα της επιχείρησης.

Συνοψίζοντας, η συλλογή δεδομένων σε βιομηχανικό περιβάλλον απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό και επίγνωση των πρακτικών και θεσμικών περιορισμών. Η κατανόηση αυτών των δυσκολιών είναι απαραίτητη όχι μόνο για τη σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων αλλά και για τη βελτίωση των ίδιων των διαδικασιών συλλογής και ανάλυσης (Hair, 2019).

4.4 Διερεύνηση των βασικότερων αιτιών απορριφθέντων προϊόντων

4.4.1 Ανάλυση Pareto - Θεωρητική Προσέγγιση

Η ανάλυση Pareto αποτελεί ένα από τα βασικά εργαλεία ποιοτικού ελέγχου και στατιστικής ανάλυσης, με ευρεία εφαρμογή στη βιομηχανία και στη διοίκηση επιχειρήσεων. Πήρε το όνομά της από τον Ιταλό οικονομολόγο Vilfredo Pareto, ο οποίος διαπίστωσε ότι το 80% του πλούτου στην Ιταλία ανήκε στο 20% του πληθυσμού, γεγονός που οδήγησε στη διατύπωση της αρχής 80/20 (ή αρχή Pareto). Στο πεδίο της ποιότητας, η αρχή αυτή σημαίνει ότι το 80% των προβλημάτων προέρχεται από το 20% των αιτιών (Montgomery, 2020).

Η γραφική απεικόνιση της ανάλυσης Pareto περιλαμβάνει ραβδόγραμμα που απεικονίζει τις συχνότητες ή τις επιπτώσεις των προβλημάτων (π.χ. τύποι σκραπ) κατά φθίνουσα σειρά, συνοδευόμενο από μια συσσωρευτική καμπύλη που υποδεικνύει το ποσοστό συμμετοχής κάθε αιτίας στο συνολικό πρόβλημα. Ο συνδυασμός αυτός διευκολύνει την ιεράρχηση και τον εντοπισμό των πιο κρίσιμων παραγόντων που πρέπει να αντιμετωπιστούν.

Η χρήση της ανάλυσης Pareto στη βιομηχανική παραγωγή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη στοχευμένη λήψη αποφάσεων. Στην περίπτωση ενός εργοστασίου παραγωγής πλαστικών σωληνών, όπου το σκραπ μπορεί να προκύπτει από διάφορους λόγους όπως:

- Απόκλιση διαμέτρου,
- Αστοχία πλαστικοποίησης,
- Ρύπανση πρώτης ύλης,
- Μηχανικές βλάβες,

οπότε η ανάλυση Pareto επιτρέπει στον υπεύθυνο ποιότητας να αναγνωρίσει ποιες αιτίες ευθύνονται για το μεγαλύτερο ποσοστό των απορρίψεων.

Επιπλέον, η ανάλυση Pareto χρησιμοποιείται ως προεργασία για πιο εξελιγμένες μεθόδους στατιστικής ανάλυσης, όπως το DMAIC στο πλαίσιο της μεθοδολογίας Six Sigma, ενισχύοντας τη δυνατότητα συστηματικής βελτίωσης της παραγωγικής διαδικασίας (Ευαγγελίδης, 2004).

Πρακτικά, τα δεδομένα συλλέγονται από το πεδίο (π.χ. έντυπα βαρδιών, συστήματα παρακολούθησης παραγωγής) και κατηγοριοποιούνται σύμφωνα με τις αιτίες σκραπ. Στη

συνέχεια, με εργαλεία όπως το Minitab ή το Excel, συντάσσεται το διάγραμμα Pareto, το οποίο οπτικοποιεί την συμβολή κάθε αιτίας στο συνολικό πρόβλημα. Η ανάλυση βασίζεται σε πραγματικά στοιχεία, επιτρέποντας στη διοίκηση να επιλέξει τις πιο κρίσιμες αιτίες για άμεση παρέμβαση, με στόχο τη μείωση του κόστους και τη βελτίωση της απόδοσης.

Η επιτυχία της ανάλυσης Pareto προϋποθέτει:

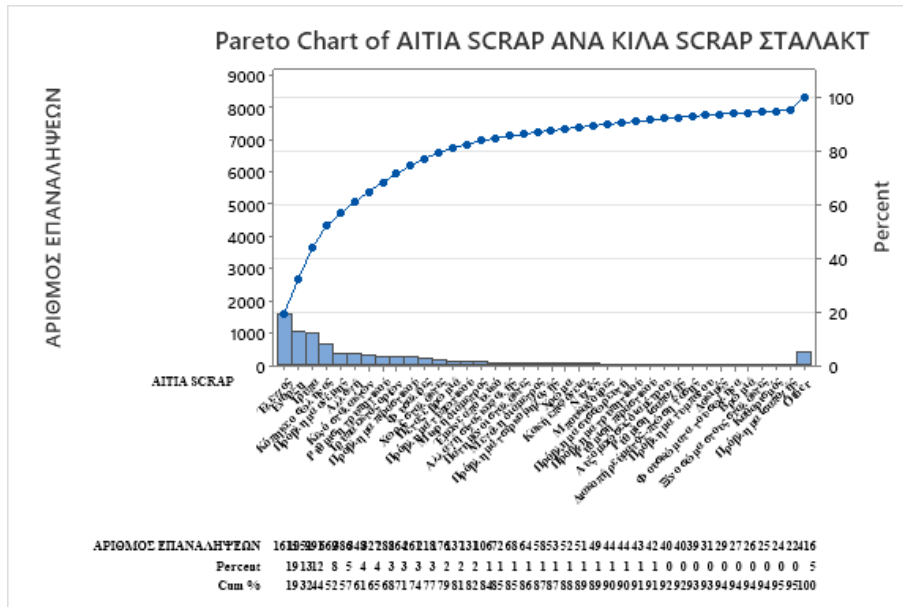
- Αξιόπιστα και συστηματικά καταγεγραμμένα δεδομένα,
- Καλή ομαδοποίηση των αιτιών (ούτε υπερβολικά λεπτομερής, ούτε υπερβολικά γενική),
- Σαφή ορισμό του τι συνιστά πρόβλημα (π.χ. ποια είναι τα αποδεκτά όρια διαστάσεων, βάσει προδιαγραφών).

Η μεθοδολογία αυτή προσφέρει ένα απλό αλλά εξαιρετικά αποτελεσματικό μέσο οπτικής ανάλυσης, βοηθώντας στην κατανομή πόρων και προσπαθειών βελτίωσης εκεί όπου η επίδραση θα είναι μεγαλύτερη.

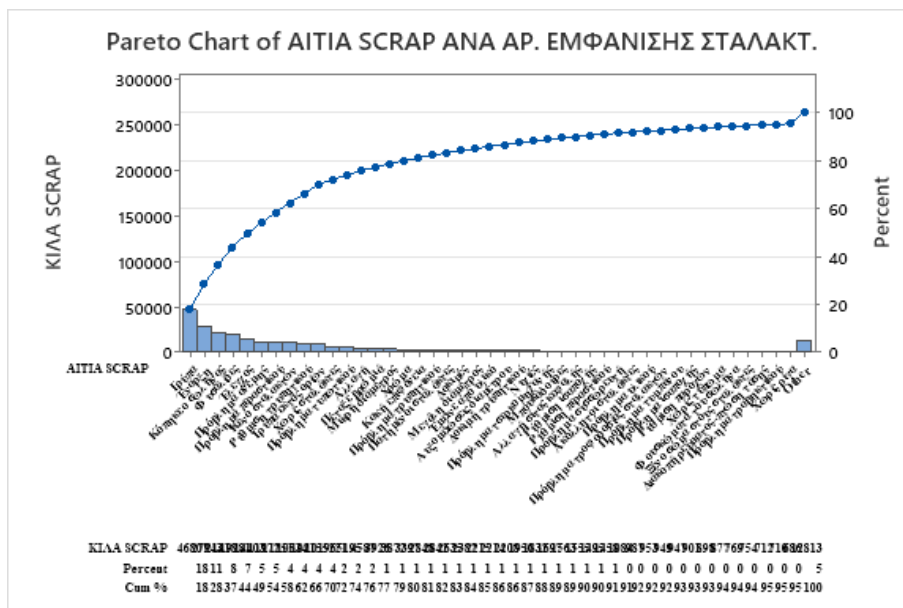
4.4.2 Ανάλυση Pareto - Μελέτη περίπτωσης

Στην υπό ανάλυση βιομηχανία παραγωγής πλαστικών σωληνώσεων, καταγράφονται από τους μηχανικούς παραγωγής, στο τέλος της δωρης τους βάρδιας, όλα τα απορριπτόμενα προϊόντα ανά μηχανή σε μέτρα και κιλά, καθώς και οι αιτίες στις οποίες οφείλονται. Η καταγραφή είναι συνεχής επί 24ωρη βάση για κάθε μέρα της παραγωγής. Η συνολική καταγραφή για το έτος 2024 λήφθηκε από τα αρχεία της υπό μελέτης εταιρείας με εμπιστευτικό τρόπο. Οι γραμμές παραγωγής είναι την τρέχουσα στιγμή δεκαεννέα και χωρίζονται σε γραμμές που τα τελικά τους προϊόντα είναι σταλακτηφόροι σωλήνες (στο εσωτερικό τους δηλαδή εισέρχεται σταλάκτης, ο οποίος είναι ένα ειδικό εξάρτημα που τοποθετείται σε σωλήνες άρδευσης και απελευθερώνει νερό με σταδιακή ροή, σε μορφή σταγόνων) ή απλοί. Ο διαχωρισμός αυτός γίνεται και για ευκολία στην στατιστική ανάλυση, αλλά κυρίως γιατί οι γραμμές παραγωγής σταλακτηφόρων σωλήνων διαφέρουν από τις υπόλοιπες (αποτελούνται από κάποια επιπλέον εξαρτήματα, όπως το περαστικό του σταλάκτη, το τρυπητικό του σταλάκτη κ.α.).

Μεταφέροντας τους πίνακες των διαφόρων αιτιών scrap ανά κιλά scrap και ανά αριθμό εμφάνισης στους σταλακτηφόρους και μη σωλήνες στο στατιστικό πρόγραμμα Minitab, είναι δυνατή η διερεύνηση της σημαντικότητας των αιτιών αυτών και η επίπτωση τους



Σχήμα 4-3 Pareto Chart of Αιτία scrap ανά κιλά scrap σταλακτηφόρων σωλήνων



Σχήμα 4-4 Pareto Chart of Αιτία scrap ανά αριθμό εμφάνισης σταλακτηφόρων σωλήνων

Στατιστική ανάλυση για τις σημαντικότερες αιτίες scrap σε μη σταλακτηφόρους σωλήνες.

Η στατιστική ανάλυση των δεδομένων scrap για μη σταλακτηφόρους σωλήνες έδειξε ότι συγκεκριμένες αιτίες συγκεντρώνουν τη συντριπτική πλειοψηφία τόσο του συνολικού βάρους απορριπτόμενου προϊόντος όσο και των περιπτώσεων εμφάνισης. Η προσέγγιση με βάση τόσο τα κιλά scrap όσο και τον αριθμό εμφανίσεων επιτρέπει μια πιο σφαιρική

κατανόηση των πραγματικών προβλημάτων στην παραγωγική διαδικασία και διευκολύνει τη στοχευμένη λήψη αποφάσεων βελτίωσης.

| ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΕΣ ΑΙΤΙΕΣ SCRAP ΣΕ ΜΗ ΣΤΑΛΑΚΤΑΦΟΡΟΥΣ ΣΩΛΗΝΕΣ ΑΝΑ ΚΙΛΑ SCRAP | | | | |
|---|--------------------|------------|---------|-----------------------|
| A/A | ΑΙΤΙΑ | ΚΙΛΑ SCRAP | ΠΟΣΟΣΤΟ | ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟ ΠΟΣΟΣΤΟ |
| 1 | Έναρξη | 302793 | 24.44 | 24.44 |
| 2 | Φυσαλλίδες | 175935 | 14.2 | 38.64 |
| 3 | Νυχιές | 88317 | 7.13 | 45.77 |
| 4 | Τρύπα | 86827 | 7.01 | 52.78 |
| 5 | Τσάκισμα κουλούρας | 81151 | 6.55 | 59.33 |
| 6 | Σχισίματα σωλήνα | 51675 | 4.17 | 63.5 |
| 7 | Πρόβλημα τυπωτικού | 50779 | 4.1 | 67.6 |
| 8 | Κακή επιφάνεια | 49315 | 3.98 | 71.58 |
| 9 | Αλλαγή | 44855 | 3.62 | 75.2 |
| 10 | Κόπηκε ο σωλήνας | 40774 | 3.29 | 78.49 |
| 11 | Πρόβλημα ανέμης | 25153 | 2.03 | 80.52 |

Πίνακας 4-1 Σημαντικότερες αιτίες scrap ανά κιλά scrap σε μη σταλακτηφόρους σωλήνες

Η ανάλυση βάσει του βάρους scrap ανά αιτία επικεντρώνεται στο οικονομικό και υλικό κόστος κάθε απορριπτόμενης ποσότητας. Οι πρώτες έντεκα αιτίες (με ποσοστό >80%) είναι ιδιαίτερα κρίσιμες:

- Η αιτία "Έναρξη" ευθύνεται για το 24,4% του συνολικού scrap, γεγονός αναμενόμενο λόγω της φύσης της εκκίνησης των γραμμών. Αποτελεί δομική απώλεια η οποία μπορεί να περιοριστεί αλλά όχι να εξαλειφθεί πλήρως.
- Ακολουθούν οι αιτίες "Φυσαλλίδες" (14,2%), οι οποίες σχετίζονται με θέματα αφύγρανσης ή ασταθούς θερμοκρασίας και "Νυχιές" (7,1%), μια αιτία που οφείλεται σε ελλατωματικό υλικό ή σε λανθασμένες συνθήκες εξώθησης.
- Οι αιτίες "Τρύπα", "Τσάκισμα κουλούρας", και "Σχισίματα σωλήνα" είναι επίσης βαρύτερες σε κιλά scrap και αφορούν κυρίως μηχανικές ή θερμικές αστοχίες κατά την εξώθηση ή τυλίγματος της κουλούρας σε ανέμη.
- Το "Πρόβλημα τυπωτικού" και η "Κακή επιφάνεια" δηλώνουν αισθητικά και ποιοτικά σφάλματα που οδηγούν σε απόρριψη, ακόμα και αν οι διαστάσεις είναι σωστές.

- Οι αιτίες "Αλλαγή" και "Κόπηκε ο σωλήνας" αντιπροσωπεύουν μεταβατικές καταστάσεις ή απότομες διακοπές ροής που οδηγούν σε απώλειες υλικού.

Η προσέγγιση με βάση το βάρος αναδεικνύει τις βαριές σε κόστος αιτίες, οι οποίες είναι κρίσιμες για τον υπολογισμό του οικονομικού αντίκτυπου και τη λήψη μέτρων περιορισμού του scrap. Οι 5 πρώτες αιτίες αθροίζουν πάνω από 59% του συνολικού βάρους.

Η αξιολόγηση των αιτίων με βάση το πόσες φορές εμφανίστηκαν αναδεικνύει τις επαναλαμβανόμενες εστίες σφάλματος, ανεξάρτητα από το πόσο σοβαρή είναι κάθε περίπτωση.

| ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΕΣ ΑΙΤΙΕΣ SCRAP ΣΕ ΜΗ ΣΤΑΛΑΚΤΗΦΟΡΟΥΣ ΣΩΛΗΝΕΣ ΑΝΑ ΑΡΙΘΜΟ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ | | | | |
|---|------------------|-------------------|---------|-----------------------|
| A/A | ΑΙΤΙΑ | ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ | ΠΟΣΟΣΤΟ | ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟ ΠΟΣΟΣΤΟ |
| 1 | Έναρξη | 1795 | 19.57 | 19.57 |
| 2 | Τρύπα | 1229 | 13.4 | 32.97 |
| 3 | Κόπηκε ο σωλήνας | 722 | 7.87 | 40.84 |
| 4 | Τσάκισμα κουλ. | 693 | 7.56 | 48.4 |
| 5 | Πρόβλημα ανέμης | 637 | 6.95 | 55.35 |
| 6 | Αλλαγή | 478 | 5.21 | 60.56 |
| 7 | Πρόβλ. τυπωτικού | 470 | 5.12 | 65.68 |
| 8 | Φυσαλίδες | 451 | 4.92 | 70.6 |
| 9 | Νυχιές | 434 | 4.73 | 75.33 |
| 10 | Μικρή διάμετρος | 313 | 3.41 | 78.74 |
| 11 | Κακή επιφάνεια | 266 | 2.9 | 81.64 |

Πίνακας 4-2 Σημαντικότερες αιτίες scrap ανά αριθμό εμφάνισης σε μη σταλακτηφόρους σωλήνες

- Η "Έναρξη" παραμένει πρώτη, με 1795 καταγραφές (19,6%) — αυτό επιβεβαιώνει την συστηματικότητα του φαινομένου.
- Η "Τρύπα", παρότι έρχεται 4η σε κιλά, είναι δεύτερη σε εμφάνιση, γεγονός που δείχνει επανάληψη και χαμηλή αξιοπιστία της διεργασίας εξώθησης.
- Οι αιτίες "Κόπηκε ο σωλήνας", "Τσάκισμα κουλούρας" και "Πρόβλημα ανέμης" έχουν επίσης πολύ υψηλές συχνότητες, ξεπερνούν τις 600 εμφανίσεις.

- Οι αιτίες "Αλλαγή", "Πρόβλημα τυπωτικού" και "Φυσαλίδες" είναι εξίσου συχνές, δείχνοντας ότι υπάρχουν προβλήματα σε στάδια προγραμματισμού ή ελέγχου της παραγωγής.

- Η "Κακή επιφάνεια", αν και σημαντική σε κιλά, καταγράφεται λιγότερο συχνά, υποδεικνύοντας ότι πρόκειται για λιγότερο επαναλαμβανόμενο αλλά ογκώδες σφάλμα.

Οι αιτίες που εμφανίζονται συχνότερα αποτελούν διαχειριστική και λειτουργική πρόκληση, διότι δημιουργούν διακοπές, ανάγκες επανεκκίνησης και επιπλέον έλεγχο. Οι διορθωτικές ενέργειες εδώ πρέπει να στοχεύουν στη μείωση της συχνότητας εμφάνισης, μέσω ρύθμισης εξοπλισμού και εκπαίδευσης προσωπικού.

Ο συνδυασμός των δύο αναλύσεων επιτρέπει τη διάκριση μεταξύ "βαριών" και "συχνών" προβλημάτων. Συγκεκριμένα εντοπίζονται 4 αιτίες που είναι ταυτόχρονα:

- Στις 10 πρώτες σε βάρος και
- Στις 5 πρώτες σε αριθμό εμφανίσεων, όπως φαίνεται στον Πίνακα 4-7.

| Αιτία | Θέση σε κιλά | Θέση σε συχνότητα |
|--------------------|-----------------|-------------------|
| Έναρξη | 1 ^η | 1 ^η |
| Τρύπα | 4 ^η | 2 ^η |
| Κόπηκε ο σωλήνας | 10 ^η | 3 ^η |
| Τσάκισμα κουλούρας | 5 ^η | 4 ^η |

Πίνακας 4-3 Συνδυασμός αναλύσεων scrap σε μη σταλακτηφόρους σωλήνες

Αυτό σημαίνει ότι οι παραπάνω αιτίες είναι και οικονομικά επιζήμιες και λειτουργικά επαναλαμβανόμενες, επομένως χρήζουν άμεσης και συστηματικής αντιμετώπισης.

Αντίστροφα:

- Αιτίες όπως η "Κακή επιφάνεια" είναι υψηλά σε κιλά αλλά λιγότερο συχνές.
- Αιτίες όπως η "Μικρή διάμετρος" είναι συχνές αλλά μικρότερης βαρύτητας.

Η διπλή ανάλυση ενισχύει την κατανόηση του scrap τόσο από ποσοτική (βάρος) όσο και από λειτουργική (συχνότητα) άποψη. Οι αιτίες που συνδυάζουν υψηλή τιμή και υψηλή συχνότητα πρέπει να αποτελέσουν πρώτη προτεραιότητα στη στοχοθεσία για μείωση του scrap.

Για την αποτελεσματικότερη αξιολόγηση των αιτιών scrap και τη στοχευμένη λήψη διορθωτικών μέτρων, προτείνεται η ανάπτυξη ενός σύνθετου δείκτη προτεραιότητας (π.χ. δείκτης επίπτωσης scrap) ο οποίος θα συνδυάζει το ποσοστό scrap ανά αιτία τόσο σε κιλά όσο και σε αριθμό εμφανίσεων. Με τον τρόπο αυτόν, εντοπίζονται οι αιτίες που έχουν ταυτόχρονα μεγάλο κόστος και υψηλή συχνότητα, και επομένως χρήζουν άμεσης παρέμβασης. (Juran, 2008).

Επιπλέον, προτείνεται η συγκρότηση ομάδων συνεχούς βελτίωσης (Kaizen groups) για κάθε μία από τις βασικές αιτίες scrap. Οι ομάδες αυτές, αποτελούμενες από τεχνικούς, ποιοτικούς ελεγκτές και υπεύθυνους παραγωγής, θα έχουν ως στόχο την ανάλυση των ριζικών αιτιών, τη δοκιμή λύσεων σε μικρή κλίμακα και την εφαρμογή διορθωτικών ενεργειών με βάση τα ευρήματα.

Προτείνεται η ανάπτυξη συστήματος προτεραιοποίησης ενεργειών βάσει ενός δείκτη επίπτωσης scrap που θα ενσωματώνει και τις δύο παραμέτρους (βάρος × συχνότητα), καθώς και η δημιουργία στοχευμένων Kaizen ομάδων ανά βασική αιτία (Imai, 1997).

Στατιστική ανάλυση για τις σημαντικότερες αιτίες scrap σε σταλακτηφόρους σωλήνες.

Η παραγωγή σταλακτηφόρων σωλήνων, λόγω της πολυπλοκότητάς της, παρουσιάζει ιδιαίτερα χαρακτηριστικά ως προς τις αιτίες δημιουργίας scrap. Οι σταλακτήρες ενσωματώνονται στον σωλήνα κατά τη διάρκεια της εξώθησης ή αμέσως μετά, μέσω διαδικασίας θερμοσυγκόλλησης ή μηχανικής ένθεσης, γεγονός που εισάγει πλήθος κρίσιμων σταδίων. Η ανάλυση που ακολουθεί εξετάζει τις σημαντικότερες αιτίες scrap στους σταλακτηφόρους σωλήνες, διαχωρισμένα σε δύο επίπεδα: βάσει της συνολικής απώλειας υλικού (κιλά) και βάσει της συχνότητας εμφάνισης.

Οι 16 πρώτες αιτίες συγκεντρώνουν περίπου το 80% των συνολικών κιλών scrap που καταγράφηκαν στην παραγωγή σταλακτηφόρων σωλήνων.

- Η “Τρύπα” είναι η πρώτη αιτία με 17,8%, γεγονός που συνδέεται άμεσα με την κρισιμότητα του σταδίου ένθεσης των σταλακτών. Οι τρύπες μπορεί να προκαλούνται από αστοχίες στην ενσωμάτωση ή κακή ποιότητα υλικού.
- Ακολουθεί η “Εναρξη” (10,6%), μια σταθερή αιτία και σε άλλους τύπους σωλήνων, η οποία εδώ επιβαρύνεται από τη διαδικασία συγχρονισμού τρυπητικού και περαστικού σταλάκτη.

| ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΕΣ ΑΙΤΙΕΣ SCRAP ΣΕ ΣΤΑΛΑΚΤΑΦΟΡΟΥΣ ΣΩΛΗΝΕΣ ΑΝΑ ΚΙΛΑ SCRAP | | | | |
|--|--------------------|------------|---------|-----------------------|
| A/A | ΑΙΤΙΑ | ΚΙΛΑ SCRAP | ΠΟΣΟΣΤΟ | ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟ ΠΟΣΟΣΤΟ |
| 1 | Τρύπα | 46807 | 17.79 | 17.79 |
| 2 | Έναρξη | 27943 | 10.62 | 28.41 |
| 3 | Κόπηκε ο σωλήνας | 21418 | 8.14 | 36.55 |
| 4 | Φυσαλίδες | 19281 | 7.33 | 43.88 |
| 5 | Έλεγχος | 14403 | 5.47 | 49.35 |
| 6 | Πρόβλημα ανέμης | 11972 | 4.55 | 53.90 |
| 7 | Πρόβλ. περαστικού | 11251 | 4.28 | 58.18 |
| 8 | Κενό σταλακτών | 10534 | 4 | 62.18 |
| 9 | Ρύθμιση περαστικού | 10215 | 3.8 | 65.98 |
| 10 | Τρύπα εκτός ορίων | 10196 | 3.87 | 69.78 |
| 11 | Χωρίς σταλάκτες | 5221 | 1.98 | 71.76 |
| 12 | Πρόβλημα τυπωτικού | 5195 | 1.97 | 73.73 |
| 13 | Αλλαγή | 4587 | 1.74 | 75.47 |
| 14 | Πέταξε βρωμιά | 3926 | 1.49 | 76.96 |
| 15 | Μικρή διάμετρος | 3872 | 1.47 | 78.43 |
| 16 | Χρώμα | 3397 | 1.29 | 79.72 |

Πίνακας 4-4 Σημαντικότερες αιτίες scrap ανά κιλά scrap σε σταλακτηφόρους σωλήνες

- Οι αιτίες “Κόπηκε ο σωλήνας” και “Φυσαλίδες” (8,1% και 7,3% αντίστοιχα) είναι επίσης σημαντικές. Οι φυσαλίδες σε σταλακτηφόρους σωλήνες είναι ακόμα πιο επικίνδυνες, καθώς μπορεί να επηρεάσουν τη σωστή εφαρμογή ή θέση του σταλάκτη.
- Οι πιο εξειδικευμένες αιτίες όπως “Πρόβλημα περαστικού”, “Κενό σταλακτών”, “Ρύθμιση περαστικού”, και “Χωρίς σταλάκτες”, δείχνουν καθαρά ότι το μεγαλύτερο μέρος του scrap συνδέεται με την ειδική τεχνολογία του προϊόντος και όχι μόνο με τη βασική εξώθηση.
- Αξιοσημείωτη είναι και η παρουσία του “Έλεγχου” (5,5%) ως σημαντικής αιτίας βάσει κιλών, υποδηλώνοντας ότι πιθανότατα εφαρμόζονται αυστηρά κριτήρια αποδοχής, ιδίως για μη ορατές βλάβες, τρύπες, ή μη λειτουργικούς σταλάκτες.

Η προσέγγιση με βάση τον αριθμό εμφανίσεων προσφέρει διαφορετικές και κρίσιμες πληροφορίες, καθώς δείχνει ποιες αιτίες είναι επαναλαμβανόμενες και συστηματικές, ανεξαρτήτως βαρύτητας.

| ΣΗΜΑΝΤΙΚΟΤΕΡΕΣ ΑΙΤΙΕΣ SCRAP ΣΕ ΣΤΑΛΑΚΤΗΦΟΡΟΥΣ ΣΩΛΗΝΕΣ ΑΝΑ ΑΡΙΘΜΟ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ | | | | |
|--|--------------------|-------------------|---------|-----------------------|
| A/A | ΑΙΤΙΑ | ΑΡΙΘΜΟΣ ΕΜΦΑΝΙΣΗΣ | ΠΟΣΟΣΤΟ | ΣΥΓΚΕΝΤΡΩΤΙΚΟ ΠΟΣΟΣΤΟ |
| 1 | Έλεγχος | 1615 | 19.39 | 19.39 |
| 2 | Έναρξη | 1051 | 12.62 | 32.01 |
| 3 | Τρύπες | 991 | 11.9 | 43.91 |
| 4 | Κόπηκε ο σωλήνας | 669 | 8.03 | 51.94 |
| 5 | Πρόβλημα ανέμης | 386 | 4.64 | 56.58 |
| 6 | Αλλαγή | 348 | 4.18 | 60.76 |
| 7 | Κενό σταλακτών | 327 | 3.93 | 64.69 |
| 8 | Ρύθμιση τρυπητικού | 288 | 3.46 | 68.15 |
| 9 | Τρύπα εκτός ορίων | 264 | 3.17 | 71.32 |
| 10 | Πρόβλ. περαστικού | 261 | 3.13 | 74.45 |
| 11 | Φυσαλλίδες | 218 | 2.62 | 77.07 |
| 12 | Χωρίς σταλάκτες | 176 | 2.11 | 79.18 |

Πίνακας 4-5 Σημαντικότερες αιτίες scrap ανά αριθμό εμφάνισης σε σταλακτηφόρους σωλήνες

- Η αιτία “Έλεγχος” είναι η πρώτη σε συχνότητα, με σχεδόν 20% όλων των καταγεγραμμένων περιστατικών scrap. Αυτό δηλώνει ότι πολλές απορρίψεις οφείλονται σε παρατηρήσεις του χειριστή ή ελεγκτή, πιθανώς χωρίς ποσοτική μέτρηση, αλλά βάσει αισθητικής ή λειτουργικής αξιολόγησης. Άλλωστε έλεγχος πραγματοποιείται, μετά από εντολές του Τμήματος Ποιότητας, σε κάθε δωρη βάρδια από τον χειριστή της μηχανής υπό την επίβλεψη του μηχανικού βάρδιας.
- Η “Έναρξη” είναι ξανά στη δεύτερη θέση (12,6%), γεγονός που ενισχύει την ανάγκη καθορισμού τυποποιημένων διαδικασιών εκκίνησης για σταλακτηφόρες γραμμές, όπου απαιτείται επιπλέον συγχρονισμός με τον εξοπλισμό διάτρησης και περαστικού σταλακτών.
- Οι “Τρύπες”, “Κόπηκε ο σωλήνας”, και “Πρόβλημα ανέμης” ακολουθούν, επιβεβαιώνοντας τη λειτουργική αστάθεια που μπορεί να εμφανίζεται είτε κατά την εξώθηση είτε κθατά τον χειρισμό του τυλίγματος.
- Οι αιτίες “Κενό σταλακτών”, “Ρύθμιση τρυπητικού”, και “Χωρίς σταλάκτες” αφορούν άμεσα το τεχνικό τμήμα της παραγωγής σταλακτών και επισημαίνουν την ανάγκη αυστηρού ελέγχου εξοπλισμού και ρύθμισης πριν την έναρξη παραγωγής.

Η συνδυαστική αξιολόγηση των δεδομένων δείχνει ότι οι εξής αιτίες είναι σημαντικές και στους δύο δείκτες (βάρος και συχνότητα):

| Αιτία | Θέση σε Κιλά | Θέση σε Συχνότητα |
|------------------|--------------|-------------------|
| Έναρξη | 2η | 2 ^η |
| Τρύπα | 1η | 3 ^η |
| Κόπηκε ο σωλήνας | 3η | 4 ^η |
| Φυσαλίδες | 4η | 11 ^η |
| Πρόβλημα ανέμης | 6η | 5 ^η |
| Έλεγχος | 5η | 1 ^η |

Πίνακας 4-6 Συνδυασμός αναλύσεων scrap σε σταλακτηφόρους σωλήνες

Αυτό δείχνει ότι υπάρχουν 5-6 αιτίες που επηρεάζουν την γραμμή παραγωγής και ποιοτικά (με πολλές απορρίψεις) και ποσοτικά (με μεγάλη απώλεια υλικού). Αυτές οι αιτίες αποτελούν κρίσιμους στόχους για διορθωτικές ενέργειες.

Προτεινόμενες Ενέργειες:

- Ανάπτυξη σύνθετου δείκτη προτεραιότητας scrap, ο οποίος να ενσωματώνει το βάρος και τη συχνότητα (Nicholas, 2018).
- Ομαδοποίηση των αιτιών που σχετίζονται με τον σταλάκτη (κενό, χωρίς σταλάκτες, τρύπα εκτός ορίων) για κοινή ανάλυση.
- Δημιουργία Kaizen ομάδων για κάθε μία από τις 5 κορυφαίες αιτίες, με συμμετοχή χειριστών, συντηρητών και υπευθύνων ποιότητας (Imai, 1997).
- Επαναπροσδιορισμός των ορίων και μεθόδων ελέγχου στο τελικό στάδιο, ώστε να περιοριστεί η υποκειμενικότητα.

4.5 Διαγράμματα ελέγχου βασικών ποιοτικών χαρακτηριστικών

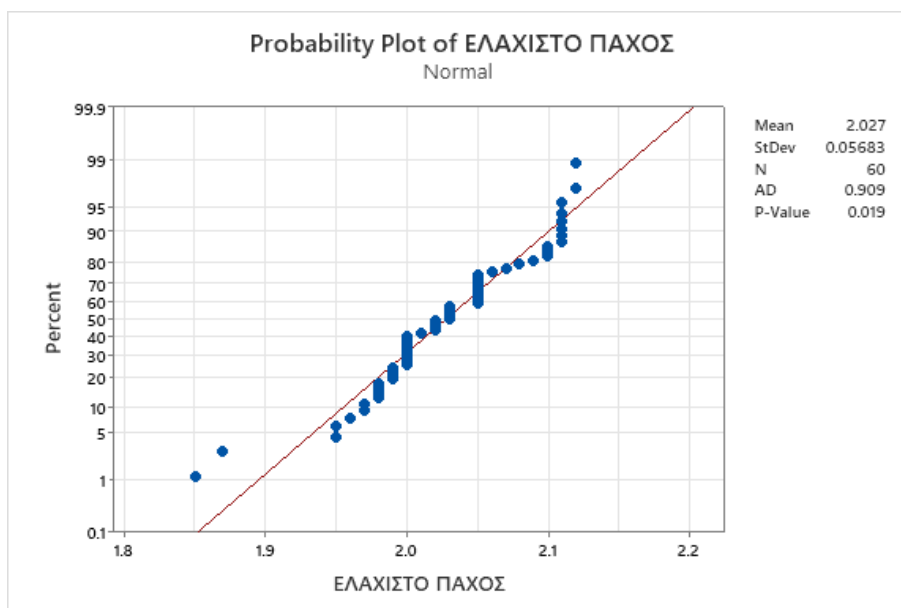
Κατά την διάρκεια της παραγωγικής διαδικασίας, όπως προαναφέρθηκε, πραγματοποιούνται συνεχείς έλεγχοι και από τους απλούς χειριστές των μηχανών, αλλά κυρίως από τους μηχανικούς βάρδιας και το προσωπικό του Τμήματος Ελέγχου Ποιότητας (Τ.Ε.Π.). Οι έλεγχοι αυτοί μπορεί να είναι οπτικοί ή να επικεντρώνονται στην ομαλή λειτουργία των μηχανών, μετρήσιμοι (συνήθως κάποιων σημαντικών

χαρακτηριστικών των τελικών προϊόντων) ή εργαστηριακοί έλεγχοι που απαιτούνται από διεθνή πρότυπα (δείτε EN 12201-5:2024), όπως αντοχή σε υδραυλική πίεση, σε εφελκυσμό, σε κρούση κ.α. Στην εξεταζόμενη περίπτωση της παρούσας διατριβής, θα μελετηθεί αν είναι υπό στατιστικό έλεγχο ή όχι μια γραμμή παραγωγής, κατά την οποία παράγεται πόσιμος σωλήνας διαμέτρου 32mm, με ονομαστική πίεση 10bar, κατασκευασμένη από πολυαιθυλένιο 4^{ης} γενιάς PE100, σε κουλούρα των 100 μέτρων (σωλήνας Φ32, PN10, PE100, 100m). Οι μετρήσεις πραγματοποιούνται από τους μηχανικούς βάρδιας ανά δύο ώρες σε 24ωρη βάση, επί πέντε συνεχόμενες ημέρες. Τα μετρήσιμα χαρακτηριστικά είναι το ελάχιστο πάχος, το μέγιστο πάχος, η διάμετρος και το βάρος ανά μέτρο του σωλήνα. Οι μετρήσεις γίνονται κάθε δύο ώρες σε ένα δείγμα και οι μηχανικοί είναι τρεις και εναλλάσσονται κάθε οκτώ ώρες. Από αυτές τις μετρήσεις θα αξιοποιηθούν αυτές του ελάχιστου και του μέγιστου πάχους, χαρακτηριστικά καίρια για την γενικότερη ποιότητα των παραγόμενων προϊόντων. Τα μετρήσιμα αυτά χαρακτηριστικά παρουσιάζονται στο Παράρτημα Α και μεταφέρονται και στο στατιστικό πακέτο Minitab.

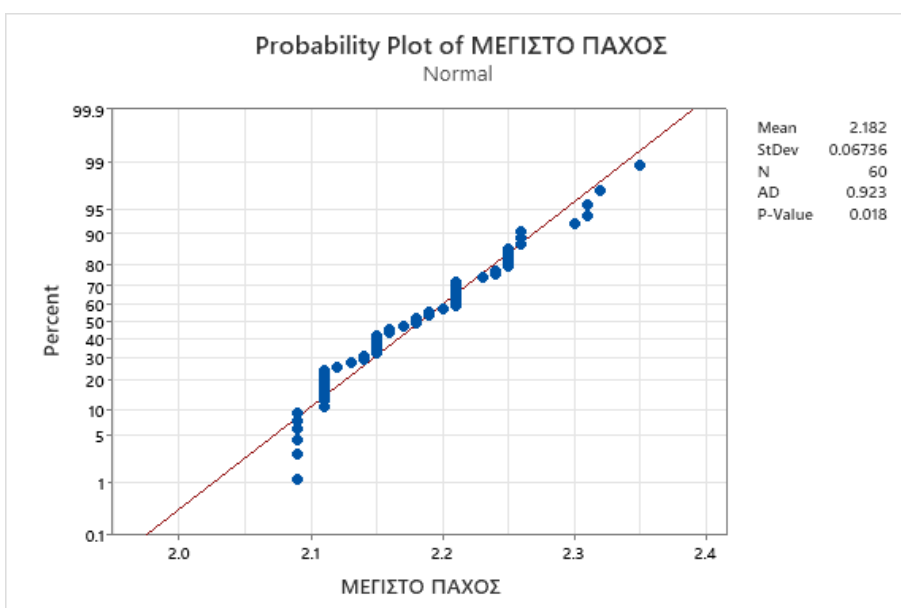
Οπότε, κάθε δύο ώρες λαμβάνει χώρα μία μέτρηση δείγματος για το ελάχιστο και μέγιστο πάχος, δηλαδή μία τιμή ανά χρονική στιγμή, όχι πολλαπλά δείγματα. Αυτό σημαίνει στατιστικά ότι το διάγραμμα ελέγχου που είναι κατάλληλο είναι το I-MR Chart (Individuals & Moving Range), μιας και αυτό χρησιμοποιείται όταν υπάρχουν μεμονωμένες τιμές, δεν υπάρχουν σταθερές υποομάδες και ο στόχος είναι ο έλεγχος της μεταβλητότητας και της κεντρικής τάσης (Κούτρας, 2008).

Στην συνέχεια, πρέπει να διερευνηθεί αν τα δεδομένα για το ελάχιστο και μέγιστο πάχος ακολουθούν κανονική κατανομή, ώστε να είναι δικαιολογημένη η χρήση στατιστικών εργαλείων που προϋποθέτουν κανονικότητα (π.χ. διαγράμματα ελέγχου, capability analysis κ.α.).

Οπότε, για τον έλεγχο της κανονικότητας των μετρήσεων, επιλέγοντας στο Minitab Stat → Basic Statistics → Normality Test για το ελάχιστο και μέγιστο πάχος, προκύπτουν αντίστοιχα τα παρακάτω γραφήματα:



Σχήμα 4-5 Probability Plot του ελάχιστου πάχους



Σχήμα 4-6 Probability Plot του μέγιστου πάχους

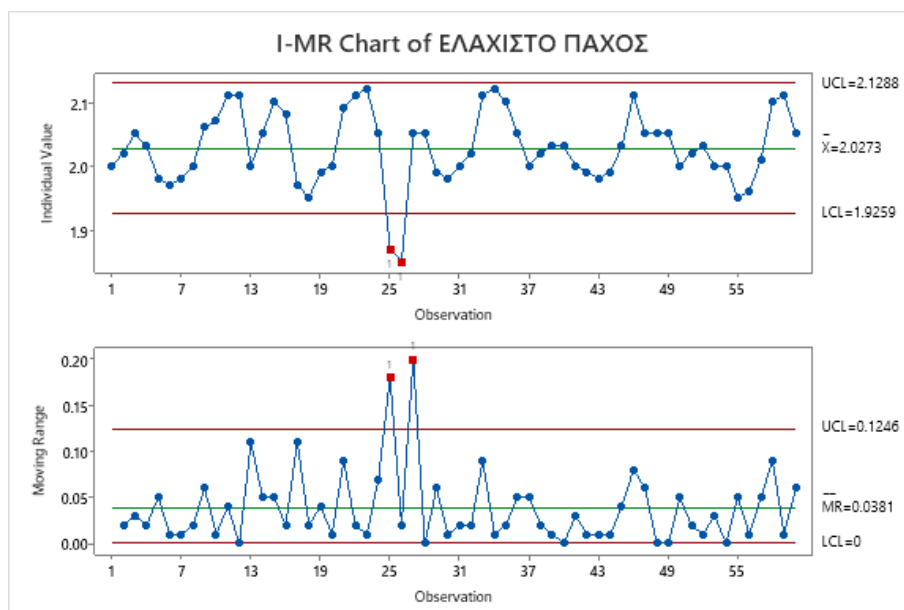
Ο έλεγχος κανονικότητας με τη μέθοδο Anderson-Darling που εφαρμόστηκε μέσω του λογισμικού Minitab απέδωσε τιμές $p = 0.019$ και 0.018 για το ελάχιστο και μέγιστο πάχος αντίστοιχα, τιμές μικρότερες του 0.05 . Συνεπώς, η υπόθεση κανονικότητας απορρίπτεται. Παρ' όλα αυτά, η οπτική επιθεώρηση των Normal Probability Plots δείχνει ότι η κατανομή των μετρήσεων προσεγγίζει την κανονικότητα, με ορισμένες αποκλίσεις κυρίως στα άκρα. Αυτό μπορεί να επιτρέψει τη χρήση στατιστικών εργαλείων, υπό την προϋπόθεση επιφύλαξης για την επίδραση των ακραίων τιμών (Montgomery, 2020).

Άλλωστε, τα διαγράμματα ελέγχου για μεμονωμένες τιμές (I-MR) δεν απαιτούν αυστηρά κανονική κατανομή, ειδικά όταν:

- Τα δεδομένα προέρχονται από φυσική διεργασία.
- Έχουν αρκετό όγκο και
- Δεν παρουσιάζουν μεγάλη λοξότητα και πολλές ακραίες τιμές.

Δηλαδή, τα διαγράμματα ελέγχου είναι αρκετά ανθεκτικά σε μικρές αποκλίσεις από την κανονικότητα, ιδίως όταν ο στόχος είναι η παρακολούθηση της σταθερότητας της διεργασίας και όχι η στατιστική υπόθεση (Montgomery, 2020).

Έτσι, για τα διαγράμματα ελέγχου I-MR για το ελάχιστο και το μέγιστο πάχος, ακολουθείται η παρακάτω διαδικασία στο Minitab: Stat → Control Charts → Variables Charts for Individuals → I-MR και προκύπτουν τα εξής διαγράμματα συνοδευόμενα από την ανάλυση τους:



Σχήμα 4-7 I-MR του ελάχιστου πάχους

Στην παρούσα ενότητα αναλύεται το διάγραμμα ελέγχου I-MR κατά την Φάση I για τις μετρήσεις του ελάχιστου πάχους σωληνών Φ32/PN10, όπως αυτές καταγράφηκαν ανά δίωρο σε πραγματικές συνθήκες παραγωγής. Το διάγραμμα κατασκευάστηκε στο λογισμικό Minitab, σύμφωνα με τις τυπικές στατιστικές προσεγγίσεις και παραδοχές για διαγράμματα ελέγχου μεμονωμένων τιμών.

Το I-MR Chart αποτελείται από δύο επιμέρους διαγράμματα: το διάγραμμα I (Individuals) που αποτυπώνει τις απόλυτες τιμές ελάχιστου πάχους, και το διάγραμμα MR (Moving Range), το οποίο δείχνει τις τιμές του κινούμενου εύρους από παρατήρηση σε παρατήρηση.

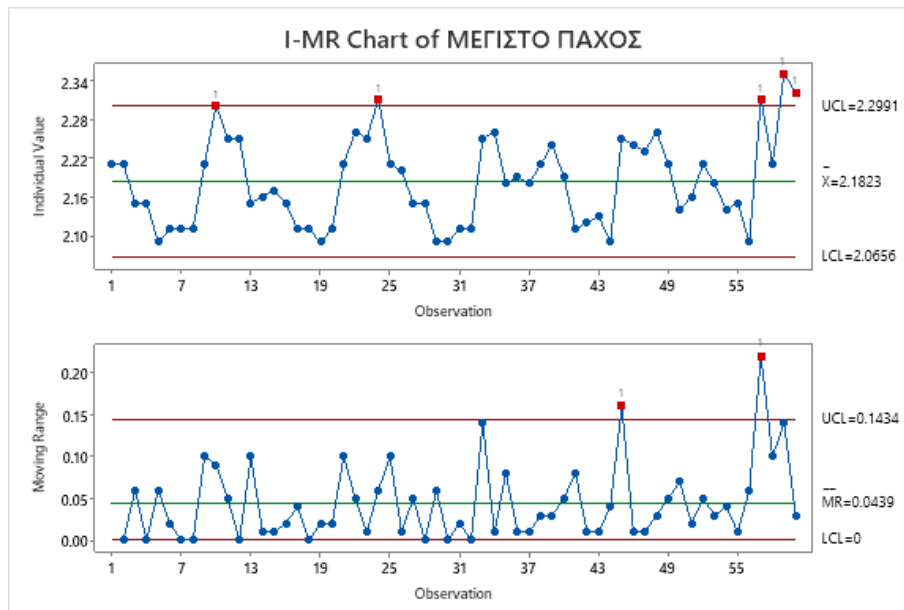
Τα όρια ελέγχου για το διάγραμμα I υπολογίζονται από τους τύπους:

$CL = \bar{X}$, $UCL = \bar{X} + 3 * \frac{\overline{MR}}{d_2}$ και $LCL = \bar{X} - 3 * \frac{\overline{MR}}{d_2}$, όπου \bar{X} ο μέσος όρος των μετρήσεων του πάχους, \overline{MR} ο μέσος όρος των κινούμενων εκτάσεων και $d_2=1,128$ σύμφωνα με το Παράρτημα Β (για $n=2$).

Αντίστοιχα τα όρια ελέγχου για το διάγραμμα MR υπολογίζονται από τους τύπους:

$CL = \overline{MR}$, $UCL = D_4 * \overline{MR}$ και $LCL = D_3 * \overline{MR}$, όπου $D_3=0$ και $D_4=3,267$ σύμφωνα με το παράρτημα Β.

Η πλειονότητα των τιμών κυμαίνεται εντός των ορίων ελέγχου, γεγονός που υποδηλώνει ότι η διεργασία είναι κατά βάση στατιστικά ελεγχόμενη. Το ελάχιστο πάχος παρουσιάζει φυσιολογικές διακυμάνσεις γύρω από τον μέσο όρο, χωρίς σαφή τάση αύξησης ή μείωσης σε βάθος χρόνου. Δεν εντοπίζονται επαναλαμβανόμενα μοτίβα που να παραπέμπουν σε συστηματική μεταβολή. Ωστόσο, παρατηρούνται δύο σημαντικές αποκλίσεις: οι παρατηρήσεις 25 και 26 (09-10-2024, ώρες 06:00 και 08:00), όπου οι τιμές ελάχιστου πάχους είναι 1.87 mm και 1.85 mm αντίστοιχα. Οι τιμές αυτές βρίσκονται εκτός των υπολογιζόμενων ορίων ελέγχου στο I Chart, ενώ ταυτόχρονα το MR Chart καταγράφει σημαντική απότομη διακύμανση, γεγονός που τις κατατάσσει ως ενδείξεις παρουσίας ειδικής αιτίας. Η εμφάνιση τιμών εκτός ελέγχου σε δύο διαδοχικές παρατηρήσεις πιθανόν να οφείλεται σε αλλαγή χειριστή, αστοχία υλικού ή λάθος στη ρύθμιση μηχανής. Συστήνεται η άμεση διερεύνηση της κατάστασης της γραμμής παραγωγής για τις εν λόγω ώρες και η διασταύρωση με τα φύλλα ελέγχου βάρδιας και του προγράμματος παραγωγής. Εάν εντοπιστεί η αιτία, μπορεί να ληφθεί διορθωτική ενέργεια ώστε να αποφευχθεί επανάληψη. Συνολικά, το I-MR διάγραμμα για το ελάχιστο πάχος δείχνει ότι η διεργασία είναι γενικά σταθερή, με κάποιες μεμονωμένες αποκλίσεις που οφείλονται σε ειδικές αιτίες. Η συστηματική χρήση τέτοιων διαγραμμάτων βοηθά στην έγκαιρη ανίχνευση προβλημάτων και επιτρέπει τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων για τη βελτίωση της παραγωγικής διαδικασίας.



Σχήμα 4-8 I-MR του μέγιστου πάχους

Η παρούσα ανάλυση επικεντρώνεται στη στατιστική αξιολόγηση των μετρήσεων μέγιστου πάχους σε σωλήνες Φ32/PN10 μέσω του διαγράμματος ελέγχου τύπου I-MR (Individuals and Moving Range). Το διάγραμμα κατασκευάστηκε στο λογισμικό Minitab, το οποίο χρησιμοποιεί καθορισμένες στατιστικές μεθόδους και σταθερές (όπως η $d_2 = 1.128$) για τον υπολογισμό των ορίων ελέγχου και με τους ίδιους τύπους που χρησιμοποιήθηκαν για τα αντίστοιχα διαγράμματα του ελάχιστου πάχους.

Το I Chart απεικονίζει τις τιμές του μέγιστου πάχους ανά δίωρη παρατήρηση, ενώ το MR Chart καταγράφει τη μεταβολή του πάχους μεταξύ διαδοχικών τιμών. Οι μέσες τιμές και τα όρια ελέγχου υπολογίζονται με βάση τη μεταβλητότητα των moving ranges, σύμφωνα με τις αρχές του στατιστικού ελέγχου διεργασιών (SPC).

Η πλειονότητα των τιμών παραμένει εντός των ορίων ελέγχου, γεγονός που καταδεικνύει τη γενική σταθερότητα της διεργασίας. Ωστόσο, το διάγραμμα καταγράφει ορισμένες αποκλίσεις που υποδηλώνουν πιθανές ειδικές αιτίες μεταβλητότητας, οι οποίες χρήζουν περαιτέρω διερεύνησης.

Στο I Chart, καταγράφηκαν πέντε παρατηρήσεις εκτός του άνω ορίου ελέγχου (UCL): οι τιμές 10, 24, 57, 59 και 60. Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν σε ασυνήθιστα υψηλό μέγιστο πάχος, που ξεπερνά τα στατιστικά όρια σταθερής διεργασίας. Αυτές οι αποκλίσεις μπορεί να οφείλονται σε μεταβολές στη θερμοκρασία, στην ταχύτητα εξώθησης, σε πρόβλημα με το καλούπι ή ακόμα και σε σφάλμα στη μέτρηση.

Αντίστοιχα, στο MR Chart εντοπίστηκαν δύο παρατηρήσεις εκτός του άνω ορίου ελέγχου: οι τιμές 45 και 57. Η 57η παρατήρηση βρίσκεται εκτός και στα δύο διαγράμματα, γεγονός που υποδηλώνει ότι η απότομη μεταβολή στη συγκεκριμένη χρονική στιγμή είναι σημαντική και στατιστικά ανώμαλη. Αυτό αποτελεί ισχυρή ένδειξη παρουσίας ειδικής αιτίας, με την ανάγκη άμεσης επιτόπιας διερεύνησης.

Οι παρατηρήσεις εκτός ελέγχου πρέπει να αναλυθούν στο πλαίσιο των βαρδιών, των αλλαγών παραγωγής, των ρυθμίσεων των μηχανών και των παρτίδων υλικού. Συνίσταται ο έλεγχος των φύλλων ελέγχου της αντίστοιχης βάρδιας, καθώς και η επαλήθευση τυχόν αστοχιών σε εξοπλισμό ή αισθητήρες μέτρησης. Η παρακολούθηση τέτοιων αποκλίσεων με τη βοήθεια του διαγράμματος ελέγχου I-MR επιτρέπει τη στοχευμένη παρέμβαση.

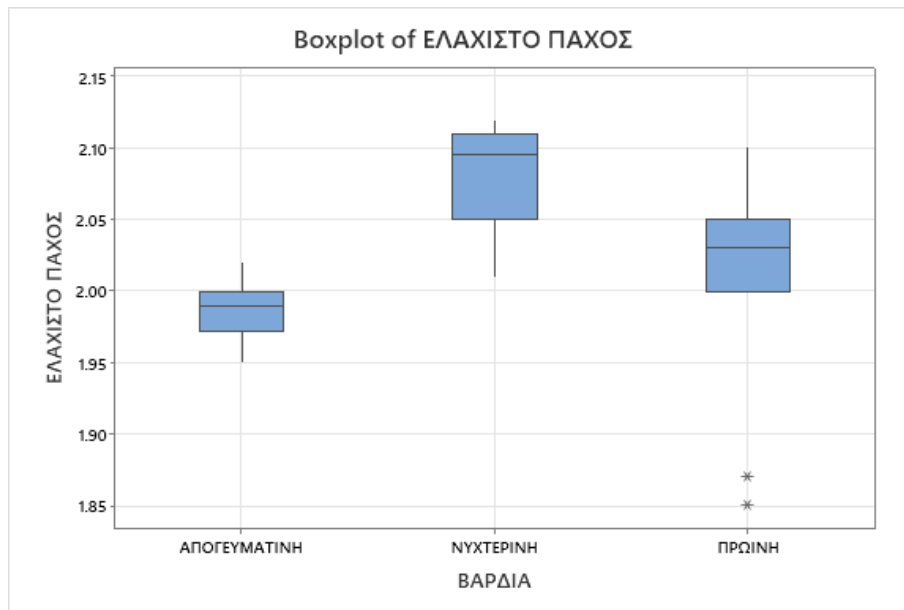
Η διεργασία παραγωγής, βάσει των τιμών μέγιστου πάχους, χαρακτηρίζεται κατά κύριο λόγο σταθερή, με ορισμένες αποκλίσεις που προέρχονται από ειδικές αιτίες. Η χρήση διαγραμμάτων ελέγχου μέσω Minitab παρέχει ουσιαστική πληροφόρηση για τη λήψη διορθωτικών ενεργειών και τη διατήρηση της ποιότητας εντός αποδεκτών ορίων.

Η λειτουργία της παραγωγικής γραμμής σε 24ωρη βάση με τρεις βάρδιες εισάγει έναν επιπλέον παράγοντα μεταβλητότητας στα ποιοτικά χαρακτηριστικά των σωλήνων: τον ανθρώπινο παράγοντα. Καθώς διαφορετικοί χειριστές πραγματοποιούν τις μετρήσεις και ρυθμίζουν τα μηχανήματα σε κάθε βάρδια, είναι σημαντικό να εξεταστεί κατά πόσο αυτό επηρεάζει τη σταθερότητα της διεργασίας.

Για τη μελέτη της μεταβλητότητας στη διαδικασία παραγωγής σωλήνων Φ32/PN10, πραγματοποιήθηκε ανάλυση με χρήση διαγραμμάτων τύπου Boxplot ανά βάρδια. Οι βάρδιες διακρίθηκαν σε πρωινή, απογευματινή και νυχτερινή. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με το λογισμικό Minitab και βασίστηκε σε μετρήσεις ελάχιστου και μέγιστου πάχους που συλλέχθηκαν ανά δίωρο για πέντε ημέρες.

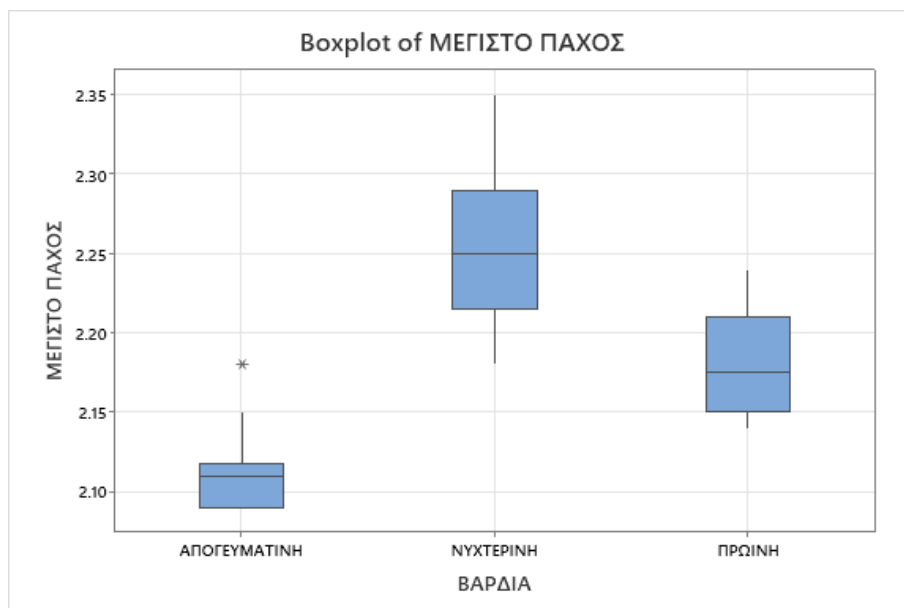
Το Boxplot προσφέρει μια απλή αλλά ισχυρή γραφική απεικόνιση της κατανομής των τιμών, της διασποράς, των ακραίων τιμών και της ύπαρξης αποκλίσεων (outliers). Η σύγκριση ανάμεσα στις βάρδιες μπορεί να αναδείξει πιθανές επιδράσεις της ώρας παραγωγής στη σταθερότητα της διεργασίας.

Αυτά τα διαγράμματα προκύπτουν στο Minitab, επιλέγοντας Graph → Boxplot → With Groups για το ελάχιστο ή μέγιστο πάχος και παρουσιάζονται παρακάτω μαζί με τις αναλύσεις τους:



Σχήμα 4-9 Boxplot του ελάχιστου πάχους ανά βάρδια

Η κατανομή του ελάχιστου πάχους ανά βάρδια εμφανίζει ορισμένες διαφορές. Στην απογευματινή βάρδια παρατηρείται χαμηλότερη μεταβλητότητα, με τιμές πιο κοντά στον μέσο όρο. Η νυχτερινή βάρδια δείχνει αυξημένη διασπορά, με κάποιες χαμηλότερες τιμές κοντά ή και κάτω από το κάτω όριο ανοχής, ενώ η πρωινή βάρδια εμφανίζει ενδιάμεση συμπεριφορά. Οι διαφορές αυτές πιθανόν να σχετίζονται με παραμέτρους όπως η εμπειρία των χειριστών ή συνθήκες περιβάλλοντος. Η αυξημένη μεταβλητότητα στη νυχτερινή βάρδια συνιστά αντικείμενο περαιτέρω διερεύνησης.



Σχήμα 4-10 Boxplot του μέγιστου πάχους ανά βάρδια

Η συμπεριφορά του μέγιστου πάχους δείχνει μεγαλύτερη σταθερότητα στις πρωινές και απογευματινές βάρδιες, με σχετικά σταθερό εύρος τιμών. Αντίθετα, η νυχτερινή βάρδια παρουσιάζει αυξημένη ανώτατη τιμή και περισσότερες ακραίες τιμές (outliers), γεγονός που ενδεχομένως συνδέεται με περιορισμένη επίβλεψη ή δυσκολία στις διορθώσεις ρυθμίσεων. Το φαινόμενο αυτό επιβεβαιώνει την ανάγκη ενίσχυσης της παρακολούθησης κατά τη διάρκεια της νύχτας.

Οπότε, η χρήση Boxplot για τη μελέτη της μεταβλητότητας ανά βάρδια ανέδειξε διαφορές που έχουν λειτουργική σημασία. Η παρουσία μεγαλύτερης διακύμανσης κατά τη νυχτερινή βάρδια αποτελεί ένδειξη πιθανής αστάθειας της διεργασίας. Η αξιολόγηση αυτή παρέχει χρήσιμο εργαλείο για τη λήψη αποφάσεων στο πλαίσιο της συνεχούς βελτίωσης, με στόχο την ελαχιστοποίηση της μεταβλητότητας της διεργασίας.

4.6 Πειραματικοί σχεδιασμοί για την βελτίωση της παραγωγικής διαδικασίας

Στην παρούσα ενότητα επιχειρείται η εφαρμογή της μεθοδολογίας πειραματικού σχεδιασμού τύπου Taguchi με σκοπό τη διερεύνηση των παραμέτρων παραγωγής που επηρεάζουν την εμφάνιση οπτικών ελαττωμάτων σε σωλήνα πολυαιθυλενίου για πόσιμο νερό. Επιλέχθηκε κατηγορία σωλήνα, ο οποίος παράγεται σε χαμηλή σχετικά ταχύτητα, γεγονός που καθιστά εφικτή την άμεση επιθεώρηση της εξωτερικής επιφάνειας του προϊόντος από τους υπεύθυνους παραγωγής. Έτσι, μπορούν να εντοπιστούν σε πραγματικό χρόνο ανωμαλίες όπως νυχίες, φουσαλίδες ή ασυνέχειες στην υφή.

Ο σχεδιασμός αφορά έναν υποθετικό κύκλο παραγωγής, στη διάρκεια του οποίου τροποποιούνται συγκεκριμένες παράμετροι διεργασίας ώστε να διαπιστωθεί η επίδρασή τους στην ποιότητα της εξωτερικής επιφάνειας του σωλήνα. Οι παράγοντες που επιλέχθηκαν να μελετηθούν είναι πέντε:

- Θερμοκρασία τήξης (Melt Temperature)
- Πίεση τήξης (Melt Pressure)
- Θερμοκρασία καλουπιού (Die Temperature)
- Ποσοστό παρθένου υλικού (Material Type)
- Πίεση κενού (Vacuum Pressure)

Κάθε παράγοντας μελετήθηκε σε τρία επίπεδα, τα οποία επιλέχθηκαν με βάση τη βιομηχανική εμπειρία και τις ρεαλιστικές τιμές ρύθμισης των μηχανών. Η ανάλυση βασίστηκε στο ορθογωνικό πλέγμα L_{27} της μεθόδου Taguchi, που επιτρέπει τη μελέτη πέντε παραγόντων με τρία επίπεδα ο καθένας, ελαχιστοποιώντας τον αριθμό των απαιτούμενων πειραμάτων. Παρακάτω παρουσιάζονται οι πέντε παράγοντες με τα τρία επίπεδα τους:

| MELT TEMPERATURE (°C) | MELT PRESSURE (bar) | DIE TEMPERATURE (°C) | MATERIAL TYPE (% παρθένο) | VACUUM PRESSURE (mmbar) |
|-----------------------|---------------------|----------------------|---------------------------|-------------------------|
| 180 | 240 | 210 | 100% | 100 |
| 200 | 260 | 230 | 80% | 150 |
| 220 | 280 | 250 | 60% | 200 |

Πίνακας 4-7 Παράγοντες διεργασίας με τα επίπεδα τους

Με την βοήθεια του Minitab και συγκεκριμένα με τις εντολές:

Stat → DOE → Taguchi → Create Taguchi Design και επιλέγοντας πέντε παράγοντες με τρία επίπεδα ο καθένας, προκύπτει το ορθογώνιο πλέγμα L_{27} του πίνακα 4-18.

Ο πίνακας L_{27} της μεθοδολογίας Taguchi περιλαμβάνει 27 προκαθορισμένους συνδυασμούς επιπέδων των παραγόντων, οι οποίοι αντιστοιχούν σε 27 ξεχωριστά πειράματα. Κάθε γραμμή του πίνακα ορίζει μία συγκεκριμένη ρύθμιση των παραμέτρων παραγωγής, την οποία εφαρμόζουν οι εκτελεστές του πειράματος ώστε να καταγραφεί η αντίστοιχη απόδοση (στη συγκεκριμένη μελέτη περίπτωσης είναι ο αριθμός των ελαττωμάτων). Με τον τρόπο αυτό διατηρείται η πειθαρχία στην αλλαγή ενός συνδυασμού κάθε φορά, χωρίς να χρειάζεται πλήρης παραγοντικός σχεδιασμός, και ταυτόχρονα εξασφαλίζεται η συγκριτική αξιολόγηση της επίδρασης κάθε παράγοντα στο τελικό αποτέλεσμα με σημαντική μείωση του αριθμού πειραμάτων.

| MELT TEMPERATURE | MELT PRESSURE | DIE TEMPERATURE | MATERIAL TYPE | VACUUM PRESSURE |
|------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| 1 | 1 | 1 | 1 | 3 |
| 1 | 2 | 2 | 2 | 1 |
| 1 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| 1 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| 1 | 3 | 3 | 3 | 1 |
| 1 | 3 | 3 | 3 | 2 |
| 1 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| 2 | 1 | 2 | 3 | 1 |
| 2 | 1 | 2 | 3 | 2 |
| 2 | 1 | 2 | 3 | 3 |
| 2 | 2 | 3 | 1 | 1 |
| 2 | 2 | 3 | 1 | 2 |
| 2 | 2 | 3 | 1 | 3 |
| 2 | 3 | 1 | 2 | 1 |
| 2 | 3 | 1 | 2 | 2 |
| 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 3 | 1 | 3 | 2 | 1 |
| 3 | 1 | 3 | 2 | 2 |
| 3 | 1 | 3 | 2 | 3 |
| 3 | 2 | 1 | 3 | 1 |
| 3 | 2 | 1 | 3 | 2 |
| 3 | 2 | 1 | 3 | 3 |
| 3 | 3 | 2 | 1 | 1 |
| 3 | 3 | 2 | 1 | 2 |
| 3 | 3 | 2 | 1 | 3 |

Πίνακας 4-8 Ορθογώνια διατάξη L₂₇ πέντε παραγόντων με τρία επίπεδα

Οπότε, στην συνέχεια, με την πάροδο σημαντικού χρονικού διαστήματος και την αρωγή αρκετών εργαζομένων (εξειδικευμένων και μη) της παραγωγής, διεξάγονται τα 27 διαφορετικά πειράματα και προκύπτουν οι τιμές του πίνακα 4-19, οι οποίες ουσιαστικά είναι ο αριθμός των επιφανειακών ελαττωμάτων των παραγόμενων σωλήνων υπό διαφορετικές συνθήκες.

| ΠΕΙΡΑΜΑ | ΕΛΑΤΤΩΜΑΤΑ ΣΤΑ 100m |
|---------|------------------------|
| 1 | 3 |
| 2 | 6 |
| 3 | 4 |
| 4 | 4 |
| 5 | 6 |
| 6 | 7 |
| 7 | 7 |
| 8 | 8 |
| 9 | 5 |
| 10 | 8 |
| 11 | 7 |
| 12 | 6 |
| 13 | 6 |
| 14 | 6 |
| 15 | 4 |
| 16 | 7 |
| 17 | 7 |
| 18 | 7 |
| 19 | 6 |
| 20 | 4 |
| 21 | 4 |
| 22 | 5 |
| 23 | 6 |
| 24 | 8 |
| 25 | 6 |
| 26 | 5 |
| 27 | 3 |

Πίνακας 4-9 Αριθμός ελαττωμάτων ανά πείραμα

Έπειτα, στο Minitab ακολουθείται η διαδικασία:

Stat → DOE → Taguchi → Analyze Taguchi Design, επιλέγοντας ως Response τα Ελαττώματα στα 100m και Signal to Noise Ratio την επιλογή Smaller is Better. Έτσι, προκύπτει η παρακάτω ανάλυση και τα σχετικά διαγράμματα:

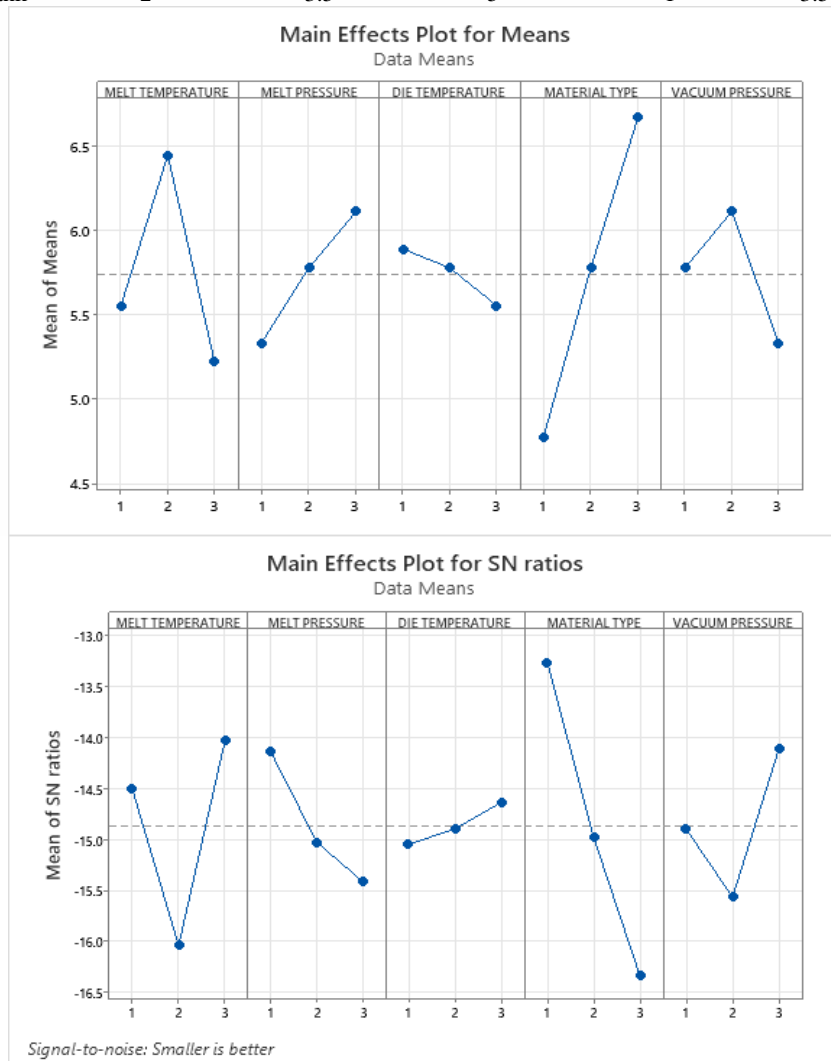
Response Table for Signal to Noise Ratios

Smaller is better

| Level | MELT TEMPERATURE | MELT PRESSURE | DIE TEMPERATURE | MATERIAL TYPE | VACUUM PRESSURE |
|-------|------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|
| 1 | -14.51 | -14.15 | -15.05 | -13.27 | -14.90 |
| 2 | -16.04 | -15.03 | -14.90 | -14.98 | -15.57 |
| 3 | -14.04 | -15.41 | -14.64 | -16.34 | -14.12 |
| Delta | 2.01 | 1.27 | 0.41 | 3.08 | 1.45 |
| Rank | 2 | 4 | 5 | 1 | 3 |

Response Table for Means

| Level | MELT TEMPERATURE | MELT PRESSURE | DIE TEMPERATURE | MATERIAL TYPE | VACUUM PRESSURE |
|-------|------------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|
| 1 | 5.556 | 5.333 | 5.889 | 4.778 | 5.778 |
| 2 | 6.444 | 5.778 | 5.778 | 5.778 | 6.111 |
| 3 | 5.222 | 6.111 | 5.556 | 6.667 | 5.333 |
| Delta | 1.222 | 0.778 | 0.333 | 1.889 | 0.778 |
| Rank | 2 | 3.5 | 5 | 1 | 3.5 |



Πίνακας 4-10 Ανάλυση Taguchi Ελαττωμάτων ανά 100m versus 5 παραγόντων

Όπως προαναφέρθηκε, η τελική ανάλυση πειραματικού σχεδιασμού τύπου Taguchi πραγματοποιήθηκε με στόχο τη διερεύνηση της επίδρασης πέντε κρίσιμων παραμέτρων παραγωγής στον αριθμό οπτικών ελαττωμάτων ανά 100 μέτρα πλαστικού σωλήνα. Η ανάλυση βασίστηκε στον πίνακα L_{27} και υλοποιήθηκε με τη μέθοδο S/N Ratio τύπου "Smaller is Better", καθώς επιθυμείται η ελαχιστοποίηση των ελαττωμάτων.

Η ανάλυση των μέσων όρων και των S/N ratios για κάθε επίπεδο των παραμέτρων οδήγησε στα εξής συμπεράσματα:

- Melt Temperature:

Το Επίπεδο 3 (240°C) έδωσε τα καλύτερα αποτελέσματα με τον χαμηλότερο μέσο αριθμό ελαττωμάτων (5.22) και το υψηλότερο S/N ratio (-14.04), υποδηλώνοντας βελτιωμένη ροή και ομοιομορφία υλικού.

- Melt Pressure:

Το Επίπεδο 1 (250 bar) παρουσίασε τις καλύτερες επιδόσεις (5.33 ελαττώματα, -14.15 S/N), πιθανόν λόγω σταθερότερης πίεσης τήξης και λιγότερων διακυμάνσεων στη διαμόρφωση του σωλήνα.

- Die Temperature:

Το Επίπεδο 3 (240°C) έδωσε επίσης τις καλύτερες τιμές (5.56, -14.64), ενισχύοντας την επίδραση της θερμικής σταθερότητας στην ποιότητα επιφάνειας.

- Material Type:

Το Επίπεδο 1 (100% παρθένο υλικό) υπερέχει ξεκάθαρα με μόλις 4.78 ελαττώματα/100m και S/N -13.27, αποδεικνύοντας στατιστικά και ποιοτικά ότι η χρήση καθαρού παρθένου πολυαιθυλενίου μειώνει σημαντικά την εμφάνιση εξωτερικών ατελειών. Αντιθέτως, το Επίπεδο 3 (60%) εμφάνισε τη χειρότερη συμπεριφορά (6.67 ελαττώματα, -16.34).

- Vacuum Pressure:

Το Επίπεδο 3 (200 mbar) αποδείχθηκε πιο ευνοϊκό (5.33, -14.12), πιθανώς λόγω καλύτερης εκκένωσης φυσαλίδων κατά την εξώθηση.

Με βάση τα αποτελέσματα, ο συνδυασμός που οδηγεί στην ελάχιστη παρουσία ελαττωμάτων είναι:

- Melt Temperature: 240°C (Επίπεδο 3)
- Melt Pressure: 250 bar (Επίπεδο 1)
- Die Temperature: 240°C (Επίπεδο 3)
- Material Type: 100% παρθένο (Επίπεδο 1)
- Vacuum Pressure: 200 mbar (Επίπεδο 3)

Η παραπάνω ρύθμιση μπορεί να αποτελέσει πρότυπο παραμετροποίησης στη γραμμή παραγωγής με στόχο τη μείωση των οπτικών ελαττωμάτων και την βελτίωση της συνολικής ποιότητας του προϊόντος.

Η μεθοδολογία Taguchi αποδείχθηκε για άλλη μια φορά εξαιρετικά αποτελεσματική στη βιομηχανική βελτιστοποίηση, παρέχοντας πρακτικές λύσεις με ελαχιστοποιημένο αριθμό πειραμάτων.

Μετά την ολοκλήρωση της ανάλυσης του πειραματικού σχεδιασμού τύπου Taguchi για τον πλαστικό σωλήνα πόσιμου νερού, είναι απαραίτητο να ακολουθήσει ανάλυση διασποράς, ώστε να εξεταστεί η στατιστική σημαντικότητα της επίδρασης των πέντε παραγόντων παραγωγής στον αριθμό οπτικών ελαττωμάτων. Αν και τα διαγράμματα κύριων επιδράσεων (main effects plots) και οι τιμές S/N προσφέρουν αρχική ένδειξη για τη σχετική επίδραση κάθε παράγοντα, η χρήση της ANOVA παρέχει ποσοτική επιβεβαίωση μέσω p-values. Με τον τρόπο αυτό τεκμηριώνεται ποιος παράγοντας συμβάλλει ουσιαστικά στις αποκλίσεις ποιότητας, και ενισχύεται η επιστημονική εγκυρότητα των συμπερασμάτων που προκύπτουν από τη μελέτη.

Οπότε, για την εφαρμογή της ανάλυσης διακύμανσης με χρήση του Minitab, αρκεί να δώσουμε:

Stat → ANOVA → General Linear Model → Fit General Linear Model

Responses → Ελαττώματα ανά 100m

Model → Όλοι οι πέντε παράγοντες

Factors → ίδιες πέντε στήλες (θα μεταφερθούν αυτόματα από το Model), οπότε προκύπτει η εξής ανάλυση:

Method

Factor coding (-1, 0, +1)

Factor Information

| Factor | Type | Levels | Values |
|------------------|-------|--------|---------|
| MELT TEMPERATURE | Fixed | 3 | 1, 2, 3 |
| MELT PRESSURE | Fixed | 3 | 1, 2, 3 |
| DIE TEMPERATURE | Fixed | 3 | 1, 2, 3 |
| MATERIAL TYPE | Fixed | 3 | 1, 2, 3 |
| VACUUM PRESSURE | Fixed | 3 | 1, 2, 3 |

Analysis of Variance

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|------------------|----|---------|--------|---------|---------|
| MELT TEMPERATURE | 2 | 7.1852 | 3.5926 | 2.06 | 0.160 |
| MELT PRESSURE | 2 | 2.7407 | 1.3704 | 0.79 | 0.473 |
| DIE TEMPERATURE | 2 | 0.5185 | 0.2593 | 0.15 | 0.863 |
| MATERIAL TYPE | 2 | 16.0741 | 8.0370 | 4.60 | 0.026 |
| VACUUM PRESSURE | 2 | 2.7407 | 1.3704 | 0.79 | 0.473 |
| Error | 16 | 27.9259 | 1.7454 | | |
| Total | 26 | 57.1852 | | | |

Model Summary

| S | R-sq | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|---------|--------|-----------|------------|
| 1.32112 | 51.17% | 20.64% | 0.00% |

Coefficients

| Term | Coef | SE Coef | T-Value | P-Value | VIF |
|------------------|--------|---------|---------|---------|------|
| Constant | 5.741 | 0.254 | 22.58 | 0.000 | |
| MELT TEMPERATURE | | | | | |
| 1 | -0.185 | 0.360 | -0.52 | 0.614 | 1.33 |
| 2 | 0.704 | 0.360 | 1.96 | 0.068 | 1.33 |
| MELT PRESSURE | | | | | |
| 1 | -0.407 | 0.360 | -1.13 | 0.274 | 1.33 |
| 2 | 0.037 | 0.360 | 0.10 | 0.919 | 1.33 |
| DIE TEMPERATURE | | | | | |
| 1 | 0.148 | 0.360 | 0.41 | 0.686 | 1.33 |
| 2 | 0.037 | 0.360 | 0.10 | 0.919 | 1.33 |
| MATERIAL TYPE | | | | | |
| 1 | -0.963 | 0.360 | -2.68 | 0.016 | 1.33 |
| 2 | 0.037 | 0.360 | 0.10 | 0.919 | 1.33 |
| VACUUM PRESSURE | | | | | |
| 1 | 0.037 | 0.360 | 0.10 | 0.919 | 1.33 |
| 2 | 0.370 | 0.360 | 1.03 | 0.318 | 1.33 |

Regression Equation

$$\begin{aligned} \text{DEFECTS PER 100m} = & 5.741 - 0.185 \text{ MELT TEMPERATURE}_1 + 0.704 \text{ MELT TEMPERATURE}_2 \\ & - 0.519 \text{ MELT TEMPERATURE}_3 - 0.407 \text{ MELT PRESSURE}_1 \\ & + 0.037 \text{ MELT PRESSURE}_2 \\ & + 0.370 \text{ MELT PRESSURE}_3 + 0.148 \text{ DIE TEMPERATURE}_1 \\ & + 0.037 \text{ DIE TEMPERATURE}_2 - 0.185 \text{ DIE TEMPERATURE}_3 \\ & - 0.963 \text{ MATERIAL TYPE}_1 + 0.037 \text{ MATERIAL TYPE}_2 + 0.926 \text{ MATERIAL TYPE}_3 \\ & + 0.037 \text{ VACUUM PRESSURE}_1 + 0.370 \text{ VACUUM PRESSURE}_2 \\ & - 0.407 \text{ VACUUM PRESSURE}_3 \end{aligned}$$

Fits and Diagnostics for Unusual Observations

| Obs | DEFECTS PER 100m | Fit | Resid | Std Resid | R |
|-----|------------------|-------|-------|-----------|---|
| 24 | 8.000 | 5.926 | 2.074 | 2.04 | R |

R Large residual

Πίνακας 4-11 General Linear Model: Ελαττώματα versus 5 παραγόντων

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, εφαρμόστηκε ανάλυση διασποράς με όλους τους παραγωγικούς παράγοντες να θεωρούνται ως σταθεροί (fixed effects), προκειμένου να διερευνηθεί η επίδρασή τους στον αριθμό οπτικών ελαττωμάτων ανά 100 μέτρα σωλήνα. Οι παράγοντες που περιλήφθηκαν στην ανάλυση ήταν: Melt Temperature, Melt Pressure, Die Temperature, Material Type και Vacuum Pressure.

Η ANOVA αποκάλυψε ότι ο μόνος παράγοντας με στατιστικά σημαντική επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα είναι ο Material Type, με τιμή $p = 0.026$ ($P < 0.05$). Όλοι οι υπόλοιποι παράγοντες παρουσίασαν τιμές p μεγαλύτερες από 0.1, γεγονός που υποδηλώνει ότι δεν επηρεάζουν ουσιωδώς τον αριθμό ελαττωμάτων στο υπό μελέτη εύρος τιμών.

Η στατιστική σημαντικότητα του παράγοντα Material Type επιβεβαιώνει τα αποτελέσματα της προηγούμενης ανάλυσης S/N, σύμφωνα με τα οποία το 100% παρθένο υλικό οδήγησε στον χαμηλότερο μέσο αριθμό ελαττωμάτων (4.78/100m), έναντι του 80% και του 60% παρθένου υλικού. Συνεπώς, η επιλογή πλήρως παρθένου πολυαιθυλενίου ως πρώτη ύλη προτείνεται ως η βέλτιστη λύση για τη βελτίωση της εξωτερικής ποιότητας του σωλήνα.

Η εφαρμογή της ANOVA συνέβαλε στην ενίσχυση της αξιοπιστίας των αποτελεσμάτων του πειραματικού σχεδιασμού Taguchi, παρέχοντας στατιστικά τεκμηριωμένες ενδείξεις για την καθοριστική συμβολή του υλικού στην ποιότητα του τελικού προϊόντος.

5. Συμπεράσματα και μελλοντική έρευνα

5.1 Συμπεράσματα μελέτη περίπτωσης

Η παρούσα εργασία επικεντρώθηκε στη διερεύνηση, αξιολόγηση και ενίσχυση της ποιότητας στην παραγωγή πλαστικών σωλήνων, αξιοποιώντας κλασικές και σύγχρονες τεχνικές στατιστικού και πειραματικού ελέγχου. Μέσω της αναλυτικής προσέγγισης τόσο θεωρητικά όσο και πρακτικά, επιδιώχθηκε η κατανόηση των κυριότερων αιτιών που επηρεάζουν την ποιότητα του τελικού προϊόντος, καθώς και η αναζήτηση τρόπων μείωσης των απορριπτόμενων τεμαχίων, ενισχύοντας τη συνολική αποδοτικότητα της παραγωγικής διαδικασίας.

Αρχικά, παρουσιάστηκε αναλυτικά η δομή και η λειτουργία ενός εργοστασίου παραγωγής πλαστικών σωληνώσεων, αναδεικνύοντας τη σημασία της διασύνδεσης μεταξύ των παραγωγικών σταδίων, των ελέγχων ποιότητας και της οργανωτικής κουλτούρας. Καταγράφηκαν οι πρακτικές συλλογής δεδομένων από τη γραμμή παραγωγής, η συχνότητα των ελέγχων από τους μηχανικούς βάρδιας, καθώς και οι δυσκολίες που προκύπτουν από την εναλλαγή βαρδιών, τις υποκειμενικές κρίσεις και τις φυσικές διαφοροποιήσεις στη διαδικασία.

Στη συνέχεια, αναλύθηκαν οι σημαντικότερες αιτίες δημιουργίας scrap προϊόντων, αρχικά βάσει του συνολικού βάρους απορριπτόμενων τεμαχίων και εν συνεχεία βάσει της συχνότητας εμφάνισής τους. Η χρήση του διαγράμματος Pareto βοήθησε στην ανάδειξη των πλέον κρίσιμων αιτιών, μεταξύ των οποίων ξεχώρισαν η έναρξη της παραγωγής, οι φυσαλίδες, οι νυχιές και οι τρύπες στον σωλήνα. Ο συνδυασμός των δύο μεθόδων (κατά βάρος και κατά συχνότητα) παρείχε μια πιο σφαιρική εικόνα, επιτρέποντας την άσκηση διορθωτικών ενεργειών κατά προτεραιότητα τόσο βάσει κόστους όσο και βάσει συχνότητας ελαττωματικής εμφάνισης.

Ακολούθως, εφαρμόστηκαν διαγράμματα ελέγχου (τύπου I-MR) για το ελάχιστο και το μέγιστο πάχος ενός συγκεκριμένου τύπου σωλήνα (Φ32, PN10, PE100, 100m). Η ανάλυση ανέδειξε στιγμιαίες αποκλίσεις εκτός ορίων ελέγχου, που συσχετίστηκαν με ειδικές αιτίες, όπως αλλαγή βάρδιας ή παρεμβάσεις στον εξοπλισμό. Η συνολική διεργασία κρίθηκε υπό έλεγχο, γεγονός που ενισχύει την αξιοπιστία της παραγωγής. Παράλληλα, με τη χρήση διαγραμμάτων Boxplot επισημάνθηκε η ύπαρξη μικρών αλλά

μετρήσιμων διαφοροποιήσεων μεταξύ των τριών βαρδιών, επιβεβαιώνοντας την ανάγκη σταθερής εφαρμογής των διαδικασιών από όλους τους εμπλεκόμενους.

Στο τελικό μέρος της μελέτης, εφαρμόστηκε ο πειραματικός σχεδιασμός Taguchi με στόχο τη μείωση των οπτικών ελαττωμάτων σε έναν σωλήνα πόσιμου νερού. Πέντε παράγοντες παραγωγής εξετάστηκαν σε τρία επίπεδα ο καθένας: θερμοκρασία τήξης, πίεση τήξης, θερμοκρασία καλουπιού, ποσοστό παρθένου υλικού και πίεση κενού. Η ανάλυση βασίστηκε σε πίνακα L_{27} και αξιολογήθηκε τόσο με χρήση S/N ratios όσο και με εφαρμογή της ανάλυσης διασποράς (ANOVA). Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι μόνο ο παράγοντας "ποσοστό παρθένου υλικού" είχε στατιστικά σημαντική επίδραση ($p = 0.026$), με το 100% παρθένο υλικό να υπερτερεί καθαρά σε ποιοτική απόδοση. Προτάθηκε, λοιπόν, ως βέλτιστο σύνολο ρυθμίσεων ένας συνδυασμός υψηλής θερμοκρασίας, σταθερής πίεσης τήξης, πλήρως παρθένου υλικού και αυξημένης πίεσης κενού.

Η εργασία καταδεικνύει τη σημασία της πολυπαραμετρικής προσέγγισης στον ποιοτικό έλεγχο και την τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων για τη βελτίωση της διεργασίας. Ο στατιστικός έλεγχος ποιότητας και οι πειραματικοί σχεδιασμοί αποδεικνύονται ουσιώδη εργαλεία για την υποστήριξη της παραγωγής σε απαιτητικά βιομηχανικά περιβάλλοντα.

5.2 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Η παρούσα μελέτη εστίασε στην εφαρμογή βασικών εργαλείων ποιοτικού ελέγχου και στη μεθοδολογία πειραματικού σχεδιασμού τύπου Taguchi για τη βελτιστοποίηση κρίσιμων μεταβλητών σε γραμμή παραγωγής πλαστικών σωλήνων. Ωστόσο, υπάρχουν σημαντικές δυνατότητες επέκτασης για μελλοντικούς μελετητές, τόσο στον τομέα των διαγραμμάτων ελέγχου όσο και στον τομέα των σχεδιασμών Taguchi.

5.2.1 Δυνατότητες επέκτασης στα διαγράμματα ελέγχου

Ένας μελλοντικός ερευνητής θα μπορούσε να αξιοποιήσει τη μεθοδολογία του στατιστικού ελέγχου διεργασιών σε μεγαλύτερο εύρος μετρούμενων χαρακτηριστικών. Εκτός από το πάχος τοιχώματος, που αναλύθηκε στην παρούσα εργασία, μπορούν να παρακολουθούνται συστηματικά με διαγράμματα ελέγχου κρίσιμα χαρακτηριστικά όπως:

- Η εξωτερική διάμετρος.
- Το συνολικό βάρος του σωλήνα ανά μέτρο.
- Οι παροχές σε lit/h των σταλακτών (για σταλακτηφόρους σωλήνες).

Η ενσωμάτωση τέτοιων μετρήσεων θα επέτρεπε την καθιέρωση ενός ολοκληρωμένου πλαισίου ποιοτικής παρακολούθησης με δυνατότητα έγκαιρης παρέμβασης και πρόληψης σφαλμάτων (Besterfield, 2013).

5.2.2 Περαιτέρω αξιοποίηση της μεθοδολογίας Taguchi

Στο πεδίο των πειραματικών σχεδιασμών, η παρούσα εργασία περιόρισε την ανάλυση σε κύριες επιδράσεις χωρίς να εξετάσει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ παραγόντων. Ένας μελλοντικός μελετητής θα μπορούσε:

- Να εφαρμόσει πλήρη ή κλασματικό παραγοντικό σχεδιασμό ώστε να εντοπίσει και σημαντικές αλληλεπιδράσεις.
- Να υιοθετήσει μεθόδους επιβεβαιωτικού πειραματισμού (confirmation runs) για την επαλήθευση της προβλεπόμενης βέλτιστης απόδοσης.
- Να εισαγάγει πολλαπλές αποκρίσεις στην αξιολόγηση, όπως μηχανική αντοχή ή η ακρίβεια στις διαστάσεις.
- Να ενσωματώσει ανάλυση κόστους-απόδοσης στις βελτιστοποιήσεις για πιο ρεαλιστική βιομηχανική εφαρμογή (Montgomery, 2017).

Τέλος, μια επόμενη μελέτη θα μπορούσε να εστιάσει στην πραγματική εφαρμογή των αποτελεσμάτων του πειραματικού σχεδιασμού στη γραμμή παραγωγής με παρακολούθηση της απόδοσης σε βάθος χρόνου, συμβάλλοντας έτσι στην καλλιέργεια κουλτούρας συνεχούς βελτίωσης.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

Ελληνική Βιβλιογραφία

Γεωργακάκος, Γ. (2002). *Προηγμένα Εργαλεία και Μέθοδοι για τον Έλεγχο της Ποιότητας, Τόμος Α΄, Στατιστικός Έλεγχος Διεργασίας*. Πάτρα: ΕΑΠ

Γραφανάκης, Δ. (2000). *Βασικά Εργαλεία και Μέθοδοι για τον Έλεγχο της Ποιότητας, Τόμος Δ΄, Στατιστικός Έλεγχος Ποιότητας*. Πάτρα: ΕΑΠ

Γραφανάκης, Δ. (2008). *Εργαλεία Στατιστικού Ελέγχου Ποιότητας, Τευχίδιο Δ΄, Εργαλεία Στατιστικού Ελέγχου Ποιότητας*. Πάτρα: ΕΑΠ

Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης. (2024). *ΕΛΟΤ EN 12201-2: Συστήματα πλαστικών σωληνώσεων υπό πίεση για παροχή νερού, καθώς και για αποστραγγίσεις και αποχετεύσεις - Πολυαιθυλένιο (PE) - Μέρος 2: Σωλήνες*

Ελληνικός Οργανισμός Τυποποίησης. (2011). *ΕΛΟΤ EN ISO 1452-2: Συστήματα πλαστικών σωληνώσεων για παροχή νερού και υπόγεια και υπέργεια δίκτυα αποστράγγισης και αποχέτευσης υπό πίεση - Μη πλαστικοποιημένο πολυ(βινυλοχλωρίδιο) (PVC-U) - Μέρος 2: Σωλήνες*

Ευαγγελίδης, Σ. (2004). *Διασφάλιση και Έλεγχος Ποιότητας*. Πάτρα: ΕΑΠ

Κούτρας, Μ. (2008). *Προηγμένα Εργαλεία και Μέθοδοι για τον Έλεγχο Ποιότητας, Τευχίδιο Α΄, Θέματα Στατιστικού Ελέγχου Διεργασίας*. Πάτρα: ΕΑΠ

Κουτρουβέλης, Ι. (2002). *Προηγμένα Εργαλεία και Μέθοδοι για τον Έλεγχο Ποιότητας, Τόμος Β΄, Σχεδιασμός και Ανάλυση Πειραμάτων*. Πάτρα: ΕΑΠ

Λογοθέτης, Ν. (2001). *Προηγμένα Εργαλεία και Μέθοδοι για τον Έλεγχο Ποιότητας, Τόμος Γ΄, Διαδικασίες και Τεχνικές Συνεχούς Βελτίωσης τη; Ποιότητας*. Πάτρα: ΕΑΠ

Σπηλιωτόπουλος, Α. (2009). *Τεχνολογία Πλαστικών και Ελαστικών: Παραγωγή και Εφαρμογές*. Αθήνα: Εκδόσεις Συμμετρία.

Ξενόγλωσση Βιβλιογραφία

AT&T Technologies, Inc. (1984). *Statistical Quality Control Handbook*. Indianapolis, IN: AT&T Technologies.

- Automotive Industry Action Group. (2005). *Statistical Process Control (SPC) Reference Manual* (2nd ed.). Southfield, MI: AIAG.
- Besterfield, D. H. (2013). *Quality Control* (8th ed.). Pearson.
- Brazier, J., et al. (2008). *Effective Shift Handover - Enhancing Safety and Reliability*. IChemE Symposium Series No. 154.
- European Committee for Standardization (CEN). (2011). *EN 12201-1: Plastics piping systems for water supply, and for drainage and sewerage under pressure – Polyethylene (PE)*. Brussels: CEN.
- European Committee for Standardization (CEN). (2009). *EN 1452-1: Plastics piping systems for water supply – Unplasticized poly(vinyl chloride) (PVC-U) – Part 1: General*. Brussels: CEN.
- Dale, B. G., van der Wiele, A., & van Iwaarden, J. (2016). *Managing quality: An essential guide and resource getaway*. Wiley.
- Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2019). *Multivariate Data Analysis* (8th ed.). Cengage Learning.
- Harry, M., & Schroeder, R. (2000). *Six Sigma: The breakthrough management strategy revolutionizing the world's top corporations*. Doubleday.
- Wang, H., Shah, J., Hawwat, S., Huang, Q., Khatami, A. (2024). *A comprehensive review of polyethylene pipes: failure mechanisms, performance models, inspection methods, and repair solutions*. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 4(1), 100174.
- Imai, M. (1997). *Gemba Kaizen: A Commonsense Approach to a Continuous Improvement Strategy*. McGraw-Hill.
- Juran J.M. (2008). *Juran's Quality Control Handbook (5th Edition)*. McGraw-Hill Education
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons.
- Montgomery, D. C. (2020). *Introduction to statistical quality control*. John Wiley & Sons.
- Nicholas, J. (2018). *Lean production for competitive advantage: A comprehensive guide to lean methodologies and management practices* (2nd ed.). CRC Press.

Plastics Pipe Institute. (2008). *Handbook of polyethylene pipe* (2η έκδ.). Plastics Pipe Institute.

Pyzdek, T., & Keller, P. (2014). *The Six Sigma handbook* (4th ed.). McGraw-Hill Education.

Παράρτημα Α: «Πίνακας καταγραφής πάχους πόσιμου σωλήνα Φ32/PN10, PE100, 100m σε τρεις διαφορετικές βάρδιες»

| ΜΕΤΡΗΣΕΙΣ ΠΑΧΟΥΣ Φ32/PN10/PE100/100m | | | |
|---|-------|----------------|---------------|
| ΠΡΟΔΙΑΓΡΑΦΕΣ: ΒΑΡΟΣ 191gr, ΠΑΧΟΣ 2-2.3mm, ΔΙΑΜΕΤΡΟΣ 32-32.3mm | | | |
| ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ | ΩΡΑ | ΕΛΑΧΙΣΤΟ ΠΑΧΟΣ | ΜΕΓΙΣΤΟ ΠΑΧΟΣ |
| 07-10-2024 | 6:00 | 2 | 2.21 |
| 07-10-2024 | 8:00 | 2.02 | 2.21 |
| 07-10-2024 | 10:00 | 2.05 | 2.15 |
| 07-10-2024 | 12:00 | 2.03 | 2.15 |
| 07-10-2024 | 14:00 | 1.98 | 2.09 |
| 07-10-2024 | 16:00 | 1.97 | 2.11 |
| 07-10-2024 | 18:00 | 1.98 | 2.11 |
| 07-10-2024 | 20:00 | 2 | 2.11 |
| 07-10-2024 | 22:00 | 2.06 | 2.21 |
| 08-10-2024 | 0:00 | 2.07 | 2.3 |
| 08-10-2024 | 2:00 | 2.11 | 2.25 |
| 08-10-2024 | 4:00 | 2.11 | 2.25 |
| 08-10-2024 | 6:00 | 2 | 2.15 |
| 08-10-2024 | 8:00 | 2.05 | 2.16 |
| 08-10-2024 | 10:00 | 2.1 | 2.17 |
| 08-10-2024 | 12:00 | 2.08 | 2.15 |
| 08-10-2024 | 14:00 | 1.97 | 2.11 |
| 08-10-2024 | 16:00 | 1.95 | 2.11 |
| 08-10-2024 | 18:00 | 1.99 | 2.09 |
| 08-10-2024 | 20:00 | 2 | 2.11 |
| 08-10-2024 | 22:00 | 2.09 | 2.21 |
| 09-10-2024 | 0:00 | 2.11 | 2.26 |
| 09-10-2024 | 2:00 | 2.12 | 2.25 |
| 09-10-2024 | 4:00 | 2.05 | 2.31 |
| 09-10-2024 | 6:00 | 1.87 | 2.21 |
| 09-10-2024 | 8:00 | 1.85 | 2.2 |
| 09-10-2024 | 10:00 | 2.05 | 2.15 |
| 09-10-2024 | 12:00 | 2.05 | 2.15 |
| 09-10-2024 | 14:00 | 1.99 | 2.09 |
| 09-10-2024 | 16:00 | 1.98 | 2.09 |
| 09-10-2024 | 18:00 | 2 | 2.11 |
| 09-10-2024 | 20:00 | 2.02 | 2.11 |

| ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ | ΩΡΑ | ΕΛΑΧΙΣΤΟ ΠΑΧΟΣ | ΜΕΓΙΣΤΟ ΠΑΧΟΣ |
|------------|-------|----------------|---------------|
| 09-10-2024 | 22:00 | 2.11 | 2.25 |
| 10-10-2024 | 0:00 | 2.12 | 2.26 |
| 10-10-2024 | 2:00 | 2.1 | 2.18 |
| 10-10-2024 | 4:00 | 2.05 | 2.19 |
| 10-10-2024 | 6:00 | 2 | 2.18 |
| 10-10-2024 | 8:00 | 2.02 | 2.21 |
| 10-10-2024 | 10:00 | 2.03 | 2.24 |
| 10-10-2024 | 12:00 | 2.03 | 2.19 |
| 10-10-2024 | 14:00 | 2 | 2.11 |
| 10-10-2024 | 16:00 | 1.99 | 2.12 |
| 10-10-2024 | 18:00 | 1.98 | 2.13 |
| 10-10-2024 | 20:00 | 1.99 | 2.09 |
| 10-10-2024 | 22:00 | 2.03 | 2.25 |
| 11-10-2024 | 0:00 | 2.11 | 2.24 |
| 11-10-2024 | 2:00 | 2.05 | 2.23 |
| 11-10-2024 | 4:00 | 2.05 | 2.26 |
| 11-10-2024 | 6:00 | 2.05 | 2.21 |
| 11-10-2024 | 8:00 | 2 | 2.14 |
| 11-10-2024 | 10:00 | 2.02 | 2.16 |
| 11-10-2024 | 12:00 | 2.03 | 2.21 |
| 11-10-2024 | 14:00 | 2 | 2.18 |
| 11-10-2024 | 16:00 | 2 | 2.14 |
| 11-10-2024 | 18:00 | 1.95 | 2.15 |
| 11-10-2024 | 20:00 | 1.96 | 2.09 |
| 11-10-2024 | 22:00 | 2.01 | 2.31 |
| 12-10-2024 | 0:00 | 2.1 | 2.21 |
| 12-10-2024 | 2:00 | 2.11 | 2.35 |
| 12-10-2024 | 4:00 | 2.05 | 2.32 |

Παράρτημα Β: «Συντελεστές για τα διαγράμματα Ελέγχου»

| n | ΔΕ ΜΕΣΗΣ ΤΙΜΗΣ | | | ΔΕ ΤΥΠΙΚΗΣ ΑΠΟΚΛΙΣΗΣ | | | | | | ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ ΕΛΕΓΧΟΥ ΕΥΡΟΥΣ | | | | | | |
|----|----------------|----------------|----------------|---------------------------|------------------|------------------------------|----------------|----------------|----------------|---------------------------|------------------|------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | | | | ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΓΙΑ ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ | | ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΓΙΑ ΟΡΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ | | | | ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΓΙΑ ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ | | ΣΥΝΤΕΛΕΣΤΕΣ ΓΙΑ ΟΡΙΑ ΕΛΕΓΧΟΥ | | | | |
| | A | A ₂ | A ₃ | c ₄ | 1/c ₄ | B ₃ | B ₄ | B ₅ | B ₆ | d ₂ | 1/d ₂ | d ₃ | D ₁ | D ₂ | D ₃ | D ₄ |
| 2 | 2.121 | 1.880 | 2.659 | 0.7979 | 1.2533 | 0.000 | 3.267 | 0.000 | 2.606 | 1.128 | 0.8865 | 0.853 | 0.000 | 3.686 | 0.000 | 3.267 |
| 3 | 1.732 | 1.023 | 1.954 | 0.8862 | 1.1284 | 0.000 | 2.568 | 0.000 | 2.276 | 1.693 | 0.5907 | 0.888 | 0.000 | 4.358 | 0.000 | 2.575 |
| 4 | 1.500 | 0.729 | 1.628 | 0.9213 | 1.0854 | 0.000 | 2.266 | 0.000 | 2.088 | 2.059 | 0.4857 | 0.880 | 0.000 | 4.698 | 0.000 | 2.282 |
| 5 | 1.342 | 0.577 | 1.427 | 0.9400 | 1.0638 | 0.000 | 2.089 | 0.000 | 1.964 | 2.326 | 0.4299 | 0.864 | 0.000 | 4.918 | 0.000 | 2.115 |
| 6 | 1.225 | 0.433 | 1.287 | 0.9515 | 1.0510 | 0.030 | 1.970 | 0.029 | 1.874 | 2.534 | 0.3946 | 0.848 | 0.000 | 5.078 | 0.000 | 2.004 |
| 7 | 1.134 | 0.419 | 1.182 | 0.9594 | 1.0423 | 0.118 | 1.882 | 0.113 | 1.806 | 2.704 | 0.3698 | 0.833 | 0.204 | 5.204 | 0.076 | 1.924 |
| 8 | 1.061 | 0.373 | 1.099 | 0.9650 | 1.0363 | 0.185 | 1.815 | 0.179 | 1.751 | 2.847 | 0.3512 | 0.820 | 0.388 | 5.306 | 0.136 | 1.864 |
| 9 | 1.000 | 0.337 | 1.032 | 0.9693 | 1.0317 | 0.239 | 1.761 | 0.232 | 1.707 | 2.970 | 0.3367 | 0.808 | 0.547 | 5.393 | 0.184 | 1.816 |
| 10 | 0.949 | 0.308 | 0.975 | 0.9727 | 1.0281 | 0.284 | 1.716 | 0.276 | 1.669 | 3.078 | 0.3249 | 0.797 | 0.687 | 5.469 | 0.223 | 1.777 |
| 11 | 0.905 | 0.285 | 0.927 | 0.9754 | 1.0252 | 0.321 | 1.679 | 0.313 | 1.637 | 3.173 | 0.3152 | 0.787 | 0.811 | 5.535 | 0.256 | 1.744 |
| 12 | 0.866 | 0.266 | 0.886 | 0.9776 | 1.0229 | 0.354 | 1.646 | 0.346 | 1.610 | 3.258 | 0.3069 | 0.778 | 0.922 | 5.594 | 0.284 | 1.719 |
| 13 | 0.832 | 0.249 | 0.850 | 0.9794 | 1.0210 | 0.382 | 1.618 | 0.374 | 1.585 | 3.336 | 0.2998 | 0.770 | 1.025 | 5.647 | 0.308 | 1.692 |
| 14 | 0.802 | 0.235 | 0.817 | 0.9810 | 1.0194 | 0.406 | 1.594 | 0.399 | 1.563 | 3.406 | 0.2936 | 0.763 | 1.118 | 5.696 | 0.329 | 1.671 |
| 15 | 0.775 | 0.223 | 0.789 | 0.9823 | 1.0180 | 0.423 | 1.572 | 0.421 | 1.544 | 3.472 | 0.2880 | 0.756 | 1.203 | 5.741 | 0.348 | 1.652 |
| 16 | 0.750 | 0.212 | 0.763 | 0.9835 | 1.0168 | 0.448 | 1.552 | 0.440 | 1.526 | 3.532 | 0.2831 | 0.750 | 1.282 | 5.782 | 0.364 | 1.636 |
| 17 | 0.728 | 0.203 | 0.739 | 0.9845 | 1.0157 | 0.466 | 1.534 | 0.458 | 1.511 | 3.588 | 0.2787 | 0.744 | 1.356 | 5.820 | 0.379 | 1.621 |
| 18 | 0.707 | 0.194 | 0.718 | 0.9854 | 1.0148 | 0.482 | 1.518 | 0.475 | 1.496 | 3.640 | 0.2747 | 0.739 | 1.424 | 5.856 | 0.392 | 1.608 |
| 19 | 0.688 | 0.187 | 0.698 | 0.9862 | 1.0140 | 0.497 | 1.503 | 0.490 | 1.483 | 3.689 | 0.2711 | 0.734 | 1.487 | 5.891 | 0.404 | 1.596 |
| 20 | 0.671 | 0.180 | 0.680 | 0.9869 | 1.0133 | 0.510 | 1.490 | 0.504 | 1.470 | 3.735 | 0.2677 | 0.729 | 1.549 | 5.921 | 0.414 | 1.586 |
| 21 | 0.655 | 0.173 | 0.663 | 0.9876 | 1.0126 | 0.523 | 1.477 | 0.516 | 1.459 | 3.778 | 0.2647 | 0.724 | 1.605 | 5.951 | 0.425 | 1.575 |
| 22 | 0.640 | 0.167 | 0.647 | 0.9882 | 1.0119 | 0.534 | 1.466 | 0.528 | 1.448 | 3.819 | 0.2618 | 0.720 | 1.659 | 5.979 | 0.434 | 1.566 |
| 23 | 0.626 | 0.162 | 0.633 | 0.9887 | 1.0114 | 0.545 | 1.455 | 0.539 | 1.438 | 3.858 | 0.2592 | 0.716 | 1.710 | 6.006 | 0.443 | 1.557 |
| 24 | 0.612 | 0.157 | 0.619 | 0.9892 | 1.0109 | 0.555 | 1.445 | 0.549 | 1.429 | 3.895 | 0.2567 | 0.712 | 1.759 | 6.031 | 0.452 | 1.548 |
| 25 | 0.600 | 0.153 | 0.606 | 0.9896 | 1.0105 | 0.565 | 1.435 | 0.559 | 1.420 | 3.931 | 0.2544 | 0.708 | 1.806 | 6.056 | 0.459 | 1.541 |

Από τις τιμές του A₂, το MS Excel και τους κάτωθι τύπους κατασκευάστηκε ο ανώτερο πίνακας:

$$A = \frac{3}{\sqrt{n}}, A_2 = \frac{3}{d_2 \cdot \sqrt{n}}, A_3 = \frac{3}{c_4 \cdot \sqrt{n}},$$

$$D_1 = d_2 - 3d_3, D_2 = d_2 + 3d_3, D_3 = \max(0, 1 - 3 \cdot \frac{d_3}{d_2}), D_4 = 1 + 3 \cdot \frac{d_3}{d_2},$$

$$B_3 = 1 - \frac{3}{c_4 \cdot \sqrt{(2n-1)}}, B_4 = 1 + \frac{3}{c_4 \cdot \sqrt{(2n-1)}}, B_5 = c_4 - 3 \cdot \sqrt{(1 - c_4^2)},$$

$$c_4 = \sqrt{\frac{2}{n-1}} \cdot \frac{\Gamma(n/2)}{\Gamma[(n-1)/2]} \text{ (Η προσέγγιση } c_4 \approx \frac{4 \cdot (n-1)}{4 \cdot n - 3} \text{ είναι συχνά επαρκής).}$$

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.