

ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα Σπουδών: Διαχείριση και Τεχνολογία Ποιότητας

Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία

Σχεδιασμός και Εφαρμογή Συστήματος Κρίσιμων Δεικτών Απόδοσης (KPIs) για τη
Μέτρηση της Αποδοτικότητας Παραγωγικών Διεργασιών: Μελέτη Περίπτωσης σε
Βιομηχανία Παραγωγής Ξυριστικών Προϊόντων

Φοιτητής: Μπέλσης Χρήστος

A.M.: 134587

Επιβλέπουσα: Φραγκάκη Αργυρώ

Αθήνα, Σεπτέμβριος 2026

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.

Σχεδιασμός και Εφαρμογή Συστήματος Κρίσιμων Δεικτών
Απόδοσης (KPIs) για τη Μέτρηση της Αποδοτικότητας
Παραγωγικών Διεργασιών: Μελέτη Περίπτωσης σε Βιομηχανία
Παραγωγής Ξυριστικών Προϊόντων

Χρήστος Μπέλσης

Επιτροπή επίβλεψης Διπλωματικής εργασίας

Επιβλέπουσα καθηγήτρια:

Φραγκάκη Αργυρώ

Χημικός, MSc, PhD, MBA,

Μέλος ΣΕΠ/ΔΙΠ ΣΘΕΤ, ΕΑΠ

Β' Αξιολογήτρια :

Γιαννή Μαρία

Χημικός Μηχανικός, MSc, PhD,

Μέλος ΣΕΠ/ΔΙΠ ΣΘΕΤ, ΕΑΠ

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας Μεταπτυχιακής Διπλωματικής Εργασίας, αισθάνομαι την ανάγκη να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν, με διαφορετικό τρόπο, στην υλοποίηση αυτής της προσπάθειας.

Αρχικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, κ. Φραγκάκη Αργυρώ, για την επιστημονική καθοδήγηση, τις παρατηρήσεις και τη συμβολή της κατά τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Οι επισημάνσεις της συνέβαλαν ουσιαστικά στη βελτίωση της δομής, της μεθοδολογίας και της συνολικής ποιότητας της παρούσας μελέτης.

Ευχαριστώ επίσης τη β' αξιολογήτρια, κ. Γιαννή Μαρία, για τον χρόνο και τη συμβολή της στη διαδικασία αξιολόγησης της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες θα ήθελα να εκφράσω στους γονείς μου, για την αγάπη, την υπομονή, την κατανόηση και τη διαρκή στήριξή τους σε όλη τη διάρκεια αυτής της απαιτητικής προσπάθειας. Η παρουσία τους αποτέλεσε σημαντικό στήριγμα για την ολοκλήρωση της παρούσας εργασίας.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά τους συναδέλφους μου για τη συνεργασία και την υποστήριξή τους κατά τη διάρκεια εκπόνησης της παρούσας εργασίας. Ιδιαίτερες ευχαριστίες εκφράζω στην Ουρανία Πλάγγεση, για τη σημαντική συμβολή της στη συλλογή και κατανόηση των δεδομένων που αξιοποιήθηκαν στην παρούσα μελέτη.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά τον Ανδρέα Αθανασόπουλο, για την κατανόηση, τη συμπαράσταση και την ηθική υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια αυτής της απαιτητικής διαδρομής.

Περίληψη

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διπλωματική Εργασία εξετάζει τον σχεδιασμό και την εφαρμογή ενός συστήματος Κρίσιμων / Βασικών Δεικτών Απόδοσης (Key Performance Indicators – KPIs), με σκοπό τη μέτρηση και την αξιολόγηση της αποδοτικότητας παραγωγικών διεργασιών. Η εργασία βασίζεται σε εφαρμοσμένη μελέτη περίπτωσης που πραγματοποιήθηκε σε αυτοματοποιημένη μηχανή συναρμολόγησης βιομηχανίας παραγωγής ξυριστικών προϊόντων. Κεντρικός στόχος της έρευνας είναι η συγκριτική αξιολόγηση της παραγωγικής απόδοσης πριν και μετά την εφαρμογή Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής (Manufacturing Execution System – MES). Στην παρούσα μελέτη, το σύστημα που εξετάζεται είναι το PLEX, το οποίο χρησιμοποιείται ως ψηφιακό εργαλείο για την καταγραφή, την παρακολούθηση και την ανάλυση δεδομένων παραγωγής.

Η ερευνητική μεθοδολογία ακολουθεί συγκριτικό σχεδιασμό «πριν και μετά» και στηρίζεται στην ανάλυση ποσοτικών δεδομένων από δύο διαφορετικές χρονικές περιόδους. Η πρώτη αφορά την περίοδο πριν από την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής, κατά την οποία η συλλογή των στοιχείων βασιζόταν σε χειρόγραφες ή ημι-χειροκίνητες πρακτικές καταγραφές. Η δεύτερη αφορά την περίοδο μετά την εφαρμογή του συστήματος, κατά την οποία η άντληση και καταγραφή των δεδομένων πραγματοποιήθηκε ψηφιακά μέσω του PLEX. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε επίπεδο εργασιακής βάρδιας. Για την περίοδο πριν από την εφαρμογή του PLEX, το τελικό δείγμα περιλάμβανε 108 αξιοποιήσιμες βάρδιες, ενώ για την περίοδο μετά την εφαρμογή του συστήματος οι 114 αρχικές παραγωγικές εγγραφές ομαδοποιήθηκαν σε 103 διακριτές παραγωγικές βάρδιες, με βάση την ημερομηνία, τη βάρδια και τη μηχανή.

Οι βασικοί άξονες της ανάλυσης επικεντρώθηκαν στη Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού (Overall Equipment Effectiveness – OEE) και στις τρεις συνιστώσες της, δηλαδή τη Διαθεσιμότητα, την Απόδοση και την Ποιότητα. Παράλληλα, εξετάστηκε η παραγωγή αποδεκτών τεμαχίων ανά βάρδια ως

συμπληρωματικός δείκτης παραγωγικής απόδοσης. Εκτός από την περιγραφική και συγκριτική ανάλυση, πραγματοποιήθηκε επαγωγική στατιστική διερεύνηση των διαφορών μεταξύ των δύο περιόδων. Η κανονικότητα των κατανομών εξετάστηκε με τον έλεγχο Shapiro–Wilk, ενώ για τη σύγκριση των ανεξάρτητων δειγμάτων εφαρμόστηκε ο έλεγχος t του Welch. Συμπληρωματικά χρησιμοποιήθηκε ο μη παραμετρικός έλεγχος Mann–Whitney U για τον έλεγχο της ευρωστίας των συμπερασμάτων.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέση Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού μειώθηκε από 88,63% σε 82,37%, με τη διαφορά να είναι στατιστικά σημαντική ($p < 0,001$). Η σημαντικότερη διαφοροποίηση εντοπίστηκε στη Διαθεσιμότητα, η οποία μειώθηκε από 96,42% σε 82,48% ($p < 0,001$). Αντίθετα, η μέση Απόδοση αυξήθηκε από 92,27% σε 100,28% ($p < 0,001$), ενώ η Ποιότητα παρέμεινε σε ιδιαίτερα υψηλό επίπεδο, αυξανόμενη από 99,61% σε 99,92% ($p < 0,001$). Παράλληλα, η μέση παραγωγή αποδεκτών τεμαχίων ανά βάρδια μειώθηκε από περίπου 42.831 σε 39.838 τεμάχια, με τη διαφορά να είναι επίσης στατιστικά σημαντική ($p = 0,015$).

Η ερμηνεία των αποτελεσμάτων έδειξε ότι οι παρατηρούμενες διαφοροποιήσεις δεν πρέπει να αποδίδονται μονοδιάστατα στην εφαρμογή του PLEX. Η περίοδος μετά την εφαρμογή του συστήματος περιλαμβάνει την αρχική φάση προσαρμογής των χρηστών στις νέες ψηφιακές διαδικασίες, ενώ παράλληλα διαφοροποιείται ουσιαστικά ο τρόπος συλλογής και αποτύπωσης των παραγωγικών δεδομένων. Η ψηφιακή καταγραφή επιτρέπει πιο αναλυτική αποτύπωση των χρόνων στάσης και των μη παραγωγικών χρόνων, οι οποίοι στην προηγούμενη περίοδο ενδέχεται να μην καταγράφονταν με την ίδια πληρότητα. Επιπλέον, κατά την αρχική περίοδο χρήσης του PLEX εντοπίστηκαν χρονικές ασυνέπειες στην ολοκλήρωση ορισμένων παραγωγικών δηλώσεων, οι οποίες μπορούσαν να οδηγήσουν σε ακραίες τιμές Απόδοσης και OEE. Οι αποκλίσεις αυτές αντιμετωπίστηκαν με επαναληπτική εκπαίδευση των χειριστών και με καθιέρωση της ολοκλήρωσης της παραγωγικής δήλωσης τουλάχιστον δεκαπέντε λεπτά πριν από τη λήξη της βάρδιας.

Συμπερασματικά, η εργασία αναδεικνύει ότι η αξία ενός Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής δεν περιορίζεται στην απλή συγκέντρωση δεδομένων ή στην άμεση βελτίωση ενός αριθμητικού δείκτη, αλλά επεκτείνεται στην ενίσχυση της διαφάνειας, της ιχνηλασιμότητας και της αξιοπιστίας της πληροφορίας στο παραγωγικό σύστημα. Τα στατιστικά αποτελέσματα τεκμηριώνουν την ύπαρξη διαφορών μεταξύ των δύο εξεταζόμενων περιόδων, χωρίς ωστόσο να αποδεικνύουν αιτιώδη σχέση μεταξύ της εφαρμογής του PLEX και των μεταβολών των παραγωγικών δεικτών. Η συστηματική αξιοποίηση των δεδομένων του συστήματος μπορεί να υποστηρίξει τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων, την καλύτερη κατανόηση των πραγματικών απωλειών και την εφαρμογή στοχευμένων δράσεων συνεχούς βελτίωσης στο πλαίσιο της Τέταρτης Βιομηχανικής Επανάστασης (Industry 4.0).

Λέξεις-κλειδιά: Κρίσιμοι / Βασικοί Δείκτες Απόδοσης, Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού, Σύστημα Εκτέλεσης Παραγωγής, PLEX, παραγωγική απόδοση, ποιότητα δεδομένων, ακεραιότητα δεδομένων, Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση.

Design and Implementation of a System of Key Performance Indicators (KPIs) for Measuring the Efficiency of Production Processes: A Case Study in a Shaving Products Manufacturing Industry

Christos Belsis

Abstract

This Master's Thesis examines the design and implementation of a Key Performance Indicators (KPIs) system for measuring and evaluating the efficiency of production processes. The study is based on an applied case study conducted on an automated assembly machine in the shaving products manufacturing industry. The main objective is to compare production performance before and after the implementation of a Manufacturing Execution System (MES). In this study, the system examined is PLEX, which is used as a digital tool for recording, monitoring, and analyzing production data.

The research methodology follows a before-and-after comparative design and is based on the analysis of quantitative data from two different time periods. The first period refers to operation before the implementation of the Manufacturing Execution System, during which data collection was based on manual or semi-manual recording practices. The second period refers to operation after the implementation of the system, during which data extraction and recording were performed digitally through PLEX. The analysis was conducted at working-shift level. For the period before the implementation of PLEX, the final dataset included 108 usable working shifts, while for the post-implementation period the initial 114 production records were grouped into 103 distinct production shifts based on date, shift, and machine.

The main analytical focus was on Overall Equipment Effectiveness (OEE) and its three components: Availability, Performance, and Quality. Accepted output per shift was also examined as a complementary indicator of production performance. In addition to descriptive and comparative analysis, inferential statistical analysis was performed to assess the significance of the differences between the two periods. Distribution normality was examined using the Shapiro–Wilk test, while Welch's independent-samples t-test was applied for group comparisons. The non-parametric Mann–Whitney U test was also used as a complementary robustness check.

The results showed that average Overall Equipment Effectiveness decreased from 88.63% to 82.37%, with the difference being statistically significant ($p < 0.001$). The

largest change was observed in Availability, which decreased from 96.42% to 82.48% ($p<0.001$). In contrast, average Performance increased from 92.27% to 100.28% ($p<0.001$), while Quality remained at a particularly high level, increasing from 99.61% to 99.92% ($p<0.001$). At the same time, average accepted output per shift decreased from approximately 42,831 to 39,838 pieces, with this difference also being statistically significant ($p=0.015$).

The observed differences should not be attributed solely to the implementation of PLEX. The post-implementation period includes the initial user adaptation phase to the new digital procedures, while the method of data collection also differs substantially between the two periods. Digital recording enables more detailed capture of downtime and non-productive time that may not have been recorded with the same level of completeness during the previous period. In addition, during the initial period of PLEX use, timing inconsistencies were identified in the completion of some production declarations, which could result in extreme Performance and OEE values. These deviations were addressed through refresher training for operators and by establishing the practice of completing production declarations at least fifteen minutes before the end of each shift.

In conclusion, the thesis highlights that the value of a Manufacturing Execution System is not limited to data collection or to the immediate improvement of a numerical performance indicator. It also contributes to improved transparency, traceability, and reliability of information within the production system. The statistical results support the existence of significant differences between the two examined periods, but they do not establish a causal relationship between the implementation of PLEX and the observed changes in production indicators. The systematic use of PLEX data can support evidence-based decision-making, a better understanding of actual production losses, and targeted continuous improvement actions within the framework of the Fourth Industrial Revolution (Industry 4.0).

Keywords: Key Performance Indicators, Overall Equipment Effectiveness, Manufacturing Execution System, PLEX, production performance, data quality, data integrity, Fourth Industrial Revolution.

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες.....	iv
Περίληψη.....	v
<i>Abstract</i>	ix
Κεφάλαιο 1. Μετρήσεις και δείκτες απόδοσης στην παραγωγή	1
1.1 Εισαγωγή.....	1
1.2 Θεωρητικό υπόβαθρο	2
1.2.1 Διαδικασίες παραγωγής και στόχοι απόδοσης.....	2
1.2.2 Συλλογή και αξιολόγηση δεδομένων παραγωγής.....	3
1.2.3 Η σημασία των μετρήσεων στη διοίκηση παραγωγής.....	5
1.2.4 Από τα δεδομένα στη βελτίωση.....	6
1.3 Μετρήσεις απόδοσης.....	8
1.3.1 Ορισμός και προσέγγιση	8
1.3.2 Βασικές μετρήσεις απόδοσης ανά στόχο	9
1.4 Κρίσιμοι / Βασικοί Δείκτες Απόδοσης (KPIs)	11
1.4.1 Ορισμός και κριτήρια ενός σωστού Βασικού Δείκτη Απόδοσης.....	11
1.4.2 Οφέλη των Βασικών Δεικτών Απόδοσης στη βιομηχανική παραγωγή ..	12
1.4.3 Εφαρμογή Κρίσιμων / Βασικών Δεικτών Απόδοσης στην παραγωγική λειτουργία	13

1.4.4 Ψηφιακή διαχείριση δεικτών απόδοσης μέσω Συστημάτων Εκτέλεσης Παραγωγής.....	15
Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό πλαίσιο δεικτών απόδοσης, παραγωγικών απωλειών και ψηφιακής συλλογής δεδομένων	17
2.1 Εισαγωγή.....	17
2.2 Απόδοση γραμμής και έννοια απωλειών	18
2.3 Σύστημα αναφοράς παραγωγικού χρόνου τύπου «καταρράκτη»	20
2.4 Ορισμοί, μεταβλητές και υπολογισμός των δεικτών	23
2.4.1 Χρονικές μεταβλητές και ποσότητες παραγωγής	24
2.4.2 Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού.....	25
2.4.3 Χρόνοι στάσης και βλάβες	27
2.4.4 Ποσοστό απορρίψεων και απόδοση πρώτης διέλευσης.....	29
2.4.5 Χρόνος αλλαγής προϊόντος	31
2.4.6 Παραγωγή ανά βάρδια	33
2.4.7 Βαθμός χρήσης γραμμής και συνολική αποδοτικότητα.....	35
2.5 Ψηφιακή συλλογή δεδομένων και ζητήματα συγκρισιμότητας πριν και μετά την εφαρμογή Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής.....	40
2.6 Από τους δείκτες στη βελτίωση: ανάλυση απωλειών και ιεράρχηση ενεργειών	43
Κεφάλαιο 3. Μεθοδολογία – Μελέτη περίπτωσης και διαχείριση δεδομένων	45
3.1 Εισαγωγή.....	45
3.2 Περιγραφή της μελέτης περίπτωσης και λειτουργική οργάνωση	46
3.2.1 Περιγραφή της μηχανής συναρμολόγησης.....	46
3.3 Σχεδιασμός έρευνας – περίοδοι, μονάδα ανάλυσης και δείγμα	46

3.4 Πηγές δεδομένων και διαδικασία συλλογής	50
3.4.1 Δεδομένα περιόδου πριν από την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής.....	50
3.4.2 Δεδομένα περιόδου μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής PLEX.....	51
3.5 Ορισμοί χρονικών μεταβλητών, προγραμματισμένες διακοπές και βάση σύγκρισης	53
3.6 Λεξικό δεδομένων και αντιστοίχιση πεδίων καταγραφής	55
3.7 Προετοιμασία, καθαρισμός και έλεγχος ποιότητας δεδομένων	61
3.7.1 Έλεγχος πληρότητας και εγκυρότητας εγγραφών	62
3.7.2 Ομαδοποίηση δεδομένων σε επίπεδο βάρδιας	62
3.7.3 Έλεγχος μηδενικών και ακραίων τιμών	63
3.7.4 Τελική προετοιμασία δεδομένων για την ανάλυση.....	64
3.8 Υπολογισμός δεικτών και κανόνες συγκρισιμότητας μεταξύ των δύο περιόδων	65
3.9 Μέθοδος ανάλυσης δεδομένων	67
3.10 Περιορισμοί και ζητήματα εγκυρότητας της σύγκρισης	69
Κεφάλαιο 4. Ανάλυση αποτελεσμάτων και συγκριτική αξιολόγηση πριν και μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής PLEX.....	71
4.1 Εισαγωγή και περιγραφή τελικού δείγματος ανάλυσης	71
4.2 Συγκριτική παρουσίαση βασικών δεικτών απόδοσης	72
4.3 Ερμηνεία της διαφοροποίησης μεταξύ της περιόδου πριν και μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής.....	77
4.4 Κύρια ευρήματα από τη σύγκριση των δεικτών	79

4.5 Ανάλυση χρόνων στάσης και βασικών απωλειών	81
4.6 Ανάλυση Ποιότητας, απορρίψεων και παραγωγής ανά βάρδια	85
4.7 Στατιστική σύγκριση των δύο περιόδων.....	88
4.8 Συνολική αποτίμηση των αποτελεσμάτων.....	90
Κεφάλαιο 5. Συζήτηση αποτελεσμάτων, προτάσεις βελτίωσης και συμπεράσματα	93
5.1 Εισαγωγή.....	93
5.2 Συζήτηση βασικών ευρημάτων	94
5.3 Επίδραση του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής στην αξιοπιστία και την ακεραιότητα των δεδομένων	96
5.4 Προτάσεις βελτίωσης	99
5.4.1 Συστηματική ανάλυση χρόνων στάσης και ιεράρχηση απωλειών	99
5.4.2 Τυποποίηση των κωδικών αιτιολόγησης στάσεων	100
5.4.3 Εκπαίδευση και υποστήριξη των χειριστών στη χρήση του PLEX.....	100
5.4.4 Καθιέρωση περιοδικής ανασκόπησης δεικτών.....	101
5.4.5 Ενίσχυση συνεργασίας μεταξύ Παραγωγής, Συντήρησης και Ποιότητας	101
5.4.6 Διασφάλιση έγκαιρης ολοκλήρωσης των παραγωγικών δηλώσεων.....	102
5.5 Περιορισμοί και προτάσεις για μελλοντική έρευνα	102
5.6 Συμπεράσματα και προτάσεις αξιοποίησης του PLEX.....	104
Βιβλιογραφία	107
Παραρτήματα	110
Παράρτημα Α. Ενδεικτικό φύλλο χειροκίνητης καταγραφής πριν από την εφαρμογή του PLEX.....	110

Παράρτημα Β. Ενδεικτική οθόνη ή εξαγωγή δεδομένων από το PLEX.....	111
Παράρτημα Γ. Δείγμα δεδομένων πριν από την εφαρμογή του PLEX.....	112
Παράρτημα Δ. Δείγμα δεδομένων μετά την εφαρμογή του PLEX.....	112
Παράρτημα Ε. Παράδειγμα υπολογισμού Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού.....	113
Παράρτημα ΣΤ. Αντιστοίχιση πεδίων πριν και μετά την εφαρμογή του PLEX	114

Ευρετήριο Πινάκων

Πίνακας 1. Πίνακας Συντομογραφιών και Βασικών Όρων.....	xviii
Πίνακας 2. Βασικές μετρήσεις απόδοσης ανά στόχο	10
Πίνακας 3. Σύστημα αναφοράς παραγωγικού χρόνου και απωλειών	21
Πίνακας 4. Απαιτούμενα δεδομένα και πηγές άντλησης για τους βασικούς δείκτες απόδοσης	36
Πίνακας 5. Μεταδεδομένα δείγματος και δομή δεδομένων	48
Πίνακας 6. Λεξικό δεδομένων και αντιστοίχιση πεδίων καταγραφής πριν και μετά την εφαρμογή του PLEX	57
Πίνακας 7. Σύγκριση βασικών παραγωγικών δεικτών μεταξύ της περιόδου πριν και μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής	72
Πίνακας 8. Σύγκριση βασικών κατηγοριών χρόνων στάσης πριν και μετά την εφαρμογή του PLEX	82
Πίνακας 9. Σύγκριση δεικτών Ποιότητας, απορρίψεων και παραγωγής ανά βάρδια ..	86
Πίνακας 10. Αποτελέσματα στατιστικής σύγκρισης των βασικών δεικτών πριν και μετά την εφαρμογή του PLEX.....	88

Ευρετήριο Σχημάτων/Διαγραμμάτων

Σχήμα 1. Από τα δεδομένα στη βελτίωση της παραγωγής.....	7
Σχήμα 2. Σύστημα αναφοράς παραγωγικού χρόνου τύπου «καταρράκτη»	21
Διάγραμμα 1. Σύγκριση βασικών δεικτών παραγωγικής απόδοσης πριν και μετά την εφαρμογή του PLEX	74
Διάγραμμα 2. Απόλυτη μεταβολή βασικών δεικτών παραγωγικής απόδοσης	75
Διάγραμμα 3. Σύγκριση αποδεκτών τεμαχίων ανά βάρδια πριν και μετά την εφαρμογή του PLEX.....	75
Σχήμα A1. Ενδεικτικό φύλλο χειροκίνητης καταγραφής παραγωγικών δεδομένων πριν από την εφαρμογή του PLEX (σε ανωνυμοποιημένη μορφή).....	109
Σχήμα B1. Ενδεικτική οθόνη / εξαγωγή δεδομένων από το PLEX	110
Πίνακας Γ1. Ενδεικτικό δείγμα δεδομένων πριν από την εφαρμογή του PLEX.....	111
Πίνακας Δ1. Ενδεικτικό δείγμα δεδομένων μετά την εφαρμογή του PLEX.....	113
Πίνακας Ε1. Ενδεικτικό παράδειγμα υπολογισμού OEE	113
Πίνακας ΣΤ1. Αντιστοίχιση βασικών πεδίων δεδομένων πριν και μετά την εφαρμογή του PLEX.....	114

Πίνακας 1. Πίνακας Συντομογραφιών και Βασικών Όρων

Όρος / Συντομογραφία	Επεξήγηση
Κρίσιμοι / Βασικοί Δείκτες Απόδοσης (Key Performance Indicators – KPIs)	Επιλεγμένοι ποσοτικοί δείκτες που χρησιμοποιούνται για τη μέτρηση, την παρακολούθηση και την αξιολόγηση της απόδοσης μιας παραγωγικής διεργασίας σε σχέση με προκαθορισμένους στόχους.
Σύστημα Εκτέλεσης Παραγωγής (Manufacturing Execution System – MES)	Ψηφιακό πληροφοριακό σύστημα που υποστηρίζει την καταγραφή, την παρακολούθηση, την ιχνηλασιμότητα και την ανάλυση δεδομένων παραγωγής.
PLEX	Το Σύστημα Εκτέλεσης Παραγωγής που εξετάζεται στην παρούσα μελέτη περίπτωσης και χρησιμοποιείται για την ψηφιακή καταγραφή και ανάλυση δεδομένων παραγωγής.
Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού (Overall Equipment Effectiveness – OEE)	Σύνθετος δείκτης που αποτυπώνει τη συνολική αξιοποίηση του εξοπλισμού. Υπολογίζεται ως γινόμενο της Διαθεσιμότητας, της Απόδοσης και της Ποιότητας.
Διαθεσιμότητα (Availability)	Υποδείκτης της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού που αποτυπώνει το ποσοστό του προγραμματισμένου χρόνου παραγωγής κατά το οποίο η γραμμή βρίσκεται σε λειτουργία.
Απόδοση / ρυθμός παραγωγής (Performance)	Υποδείκτης της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού που δείχνει κατά πόσο η γραμμή λειτουργεί κοντά στον θεωρητικό ή ονομαστικό ρυθμό παραγωγής.

Ποιότητα (Quality)	Υποδείκτης της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού που αποτυπώνει το ποσοστό των αποδεκτών τεμαχίων σε σχέση με τη συνολική παραγωγή.
Προγραμματισμένος χρόνος παραγωγής (T_{prod})	Ο χρόνος κατά τον οποίο η γραμμή είναι προγραμματισμένο να παράγει, μετά την αφαίρεση των προγραμματισμένων διακοπών.
Χρόνος λειτουργίας (T_{run})	Ο πραγματικός χρόνος κατά τον οποίο ο εξοπλισμός βρίσκεται σε παραγωγική λειτουργία.
Χρόνος στάσεων ($T_{downtime}$)	Ο χρόνος εντός του προγραμματισμένου χρόνου παραγωγής κατά τον οποίο η γραμμή δεν παράγει λόγω στάσεων, βλαβών, ρυθμίσεων, αναμονών ή άλλων αιτιών.
Τεχνικές βλάβες ($T_{breakdown}$)	Στάσεις που οφείλονται σε μηχανικές, ηλεκτρολογικές ή άλλες τεχνικές αστοχίες του εξοπλισμού.
Συνολικά παραχθέντα τεμάχια (Q_{total})	Το σύνολο των τεμαχίων που παράγονται σε συγκεκριμένη βάρδια ή περίοδο.
Αποδεκτά τεμάχια (Q_{good})	Τα τεμάχια που πληρούν τις απαιτήσεις ποιότητας και θεωρούνται κατάλληλα.
Απορριπτόμενα / ελαττωματικά τεμάχια (Q_{scrap})	Τα τεμάχια που δεν πληρούν τις απαιτήσεις ποιότητας και απορρίπτονται.
Απόδοση πρώτης διέλευσης (First Pass Yield – FPY)	Δείκτης που αποτυπώνει το ποσοστό των τεμαχίων που ολοκληρώνονται σωστά από την πρώτη φορά, χωρίς επανακατεργασία, διόρθωση ή απόρριψη.

Χρόνος αλλαγής προϊόντος (<i>Tchangeover</i>)	Ο χρόνος που απαιτείται για τη μετάβαση της γραμμής από την παραγωγή ενός προϊόντος στην παραγωγή άλλου.
Παραγωγή ανά βάρδια	Ο αριθμός τεμαχίων που παράγονται σε μία εργασιακή βάρδια.
Βαθμός χρήσης γραμμής (<i>Line Utilization – LU</i>)	Συμπληρωματικός δείκτης που αποτυπώνει το ποσοστό του διαθέσιμου χρόνου κατά το οποίο η γραμμή αξιοποιείται για παραγωγική λειτουργία.
Ακεραιότητα δεδομένων (<i>Data Integrity</i>)	Η πληρότητα, η συνέπεια και η αξιοπιστία των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των δεικτών και τη λήψη αποφάσεων.
Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση (<i>Industry 4.0</i>)	Σύγχρονη προσέγγιση βιομηχανικής παραγωγής που συνδέεται με τη χρήση ψηφιακών τεχνολογιών, διασυνδεδεμένων συστημάτων, αισθητήρων και ανάλυσης δεδομένων.

Κεφάλαιο 1. Μετρήσεις και δείκτες απόδοσης στην παραγωγή

1.1 Εισαγωγή

Η βιομηχανική παραγωγή αποτελεί μια σύνθετη και δυναμική διαδικασία, στην οποία αλληλεπιδρούν άνθρωποι, μηχανές, υλικά, ενέργεια και πληροφορία. Για την παραγωγή του τελικού προϊόντος απαιτείται ένα σύνολο επιμέρους διεργασιών, οι οποίες πρέπει να εκτελούνται σύμφωνα με συγκεκριμένες προδιαγραφές και μέσα σε προκαθορισμένο χρόνο. Στο σύγχρονο ανταγωνιστικό περιβάλλον, οι επιχειρήσεις καλούνται να επιτυγχάνουν ταυτόχρονα υψηλή ποιότητα, περιορισμό απωλειών, σταθερή παραγωγική ροή και ασφαλείς συνθήκες εργασίας. Η απαίτηση αυτή καθιστά αναγκαία τη συστηματική αξιολόγηση και βελτίωση της παραγωγικής απόδοσης.

Η συστηματική συλλογή δεδομένων και η κατάλληλη αξιοποίησή τους για τον υπολογισμό δεικτών απόδοσης αποτελούν βασική προϋπόθεση για την κατανόηση της πραγματικής λειτουργίας μιας παραγωγικής γραμμής. Χωρίς οργανωμένες μετρήσεις, η εικόνα της παραγωγής μπορεί να βασίζεται περισσότερο σε εμπειρικές εκτιμήσεις, μεμονωμένα περιστατικά ή γενικές παρατηρήσεις. Αντίθετα, όταν τα δεδομένα συλλέγονται, οργανώνονται και αξιολογούνται με ενιαίο τρόπο, μπορούν να μετατραπούν σε χρήσιμη πληροφορία για τη διοίκηση της παραγωγής.

Τα τελευταία χρόνια, η βιομηχανία μεταβαίνει σταδιακά σε ψηφιακές πρακτικές παρακολούθησης της παραγωγικής απόδοσης. Η εξέλιξη αυτή συνδέεται με την Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση (Industry 4.0), στο πλαίσιο της οποίας τα δεδομένα παραγωγής αποκτούν κεντρικό ρόλο στην ανάλυση διεργασιών, στην υποστήριξη αποφάσεων και στη συνεχή βελτίωση. Σημαντικό ρόλο σε αυτή τη μετάβαση έχουν τα Συστήματα Εκτέλεσης Παραγωγής (Manufacturing Execution Systems – MES), τα οποία υποστηρίζουν την καταγραφή, την παρακολούθηση και την ανάλυση των δεδομένων παραγωγής σε πιο οργανωμένη και τυποποιημένη μορφή (Bianchini, Savini, Andreoni, Morolli, & Solfrini, 2024; Boudjenoun, Saib, Zemmouchi-Ghomari, & Rezgui, 2025).

Η αξιοπιστία των δεικτών παραγωγικής απόδοσης εξαρτάται άμεσα από την ποιότητα των δεδομένων στα οποία βασίζονται. Η μετάβαση από χειρόγραφες ή ημι-χειροκίνητες

καταγραφές σε ψηφιακά συστήματα μπορεί να ενισχύσει την πληρότητα, την ακρίβεια και την ιχνηλασιμότητα των δεδομένων. Ωστόσο, η ψηφιακή καταγραφή δεν εξαλείφει πλήρως την ανάγκη ελέγχου, καθώς η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εξακολουθεί να επηρεάζεται από τη σωστή ταξινόμηση των απωλειών, τη σαφήνεια των ορισμών και την ορθή χρήση του συστήματος από τους χρήστες (Hedman, Subramaniyan, & Almström, 2016; Wang & Pan, 2011).

Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι να παρουσιάσει το θεωρητικό πλαίσιο των μετρήσεων απόδοσης και των Κρίσιμων / Βασικών Δεικτών Απόδοσης (Key Performance Indicators – KPIs) στη βιομηχανική παραγωγή. Ειδικότερα, το κεφάλαιο εξηγεί τη μετάβαση από τα πρωτογενή δεδομένα στις μετρήσεις και στους δείκτες, αναδεικνύει τη σημασία των ενιαίων ορισμών και θέτει τις βάσεις για τη μελέτη περίπτωσης που ακολουθεί στα επόμενα κεφάλαια.

1.2 Θεωρητικό υπόβαθρο

1.2.1 Διαδικασίες παραγωγής και στόχοι απόδοσης

Ως διαδικασία παραγωγής μπορεί να οριστεί η οργανωμένη μετατροπή εισροών, όπως πρώτες ύλες, ενέργεια, ανθρώπινη εργασία και πληροφορία, σε εκροές, δηλαδή σε τελικά ή ενδιάμεσα προϊόντα. Κατά τη διαδικασία αυτή, οι επιμέρους δραστηριότητες πρέπει να εκτελούνται σύμφωνα με συγκεκριμένες τεχνικές, ποιοτικές και χρονικές απαιτήσεις. Για να θεωρείται μια παραγωγική διαδικασία αποτελεσματική και ελέγξιμη, πρέπει να είναι προγραμματισμένη, επαναλαμβανόμενη και να πραγματοποιείται με τυποποιημένο τρόπο.

Ωστόσο, η παραγωγική πραγματικότητα δεν είναι στατική. Στην καθημερινή λειτουργία μιας γραμμής εμφανίζονται διακυμάνσεις, απρόβλεπτες στάσεις, αλλαγές προϊόντων, αποκλίσεις στην ποιότητα και μεταβολές στον ρυθμό παραγωγής. Για τον λόγο αυτό, η αξιολόγηση της απόδοσης δεν μπορεί να βασίζεται σε ένα μόνο μέγεθος, όπως ο συνολικός αριθμός τεμαχίων που παρήχθησαν. Αντίθετα, απαιτείται η ταυτόχρονη παρακολούθηση διαφορετικών διαστάσεων της παραγωγικής λειτουργίας, ώστε να σχηματίζεται πιο ολοκληρωμένη εικόνα της απόδοσης.

Οι βασικές διαστάσεις απόδοσης μιας παραγωγικής διαδικασίας μπορούν να συνοψιστούν ως εξής:

- **Ποιότητα:** ο βαθμός συμμόρφωσης του προϊόντος με τις καθορισμένες απαιτήσεις και προδιαγραφές.
- **Ταχύτητα / ρυθμός παραγωγής:** η ικανότητα της γραμμής να παράγει στον απαιτούμενο χρόνο και με τον επιθυμητό ρυθμό.
- **Αξιοπιστία:** η σταθερότητα της λειτουργίας, η τήρηση του προγράμματος παραγωγής και ο περιορισμός των απρογραμμάτιστων στάσεων.
- **Ευελιξία:** η ικανότητα προσαρμογής σε αλλαγές προϊόντος, διαφορετικές απαιτήσεις ή μικρότερες παρτίδες παραγωγής.
- **Κόστος και χρήση πόρων:** η αποτελεσματική αξιοποίηση εργασίας, υλικών, ενέργειας και εξοπλισμού.

Η παραπάνω προσέγγιση δείχνει ότι η παραγωγική απόδοση δεν είναι μονοδιάστατη. Ένας υψηλός ρυθμός παραγωγής δεν έχει ουσιαστική αξία αν συνοδεύεται από αυξημένες απορρίψεις ή από συχνές στάσεις της μηχανής. Αντίστοιχα, η υψηλή ποιότητα δεν αρκεί από μόνη της, εάν η γραμμή χάνει σημαντικό μέρος του διαθέσιμου χρόνου λόγω βλαβών, αλλαγών προϊόντος ή άλλων απωλειών Διαθεσιμότητας.

Επομένως, η αξιολόγηση της παραγωγικής λειτουργίας απαιτεί ένα σύστημα μετρήσεων και δεικτών που να αποτυπώνει τη συνολική εικόνα της γραμμής και όχι ένα μεμονωμένο αποτέλεσμα. Σε αυτό το πλαίσιο προκύπτει η ανάγκη χρήσης Κρίσιμων / Βασικών Δεικτών Απόδοσης, οι οποίοι αποτυπώνουν την κατάσταση της παραγωγής με μετρήσιμα μεγέθη και υποστηρίζουν τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων.

1.2.2 Συλλογή και αξιολόγηση δεδομένων παραγωγής

Η συλλογή δεδομένων παραγωγής αποτελεί βασική προϋπόθεση για τη συστηματική αξιολόγηση της απόδοσης μιας παραγωγικής διεργασίας. Μέσω των δεδομένων, η επιχείρηση μπορεί να βασίζει τις αποφάσεις της σε πραγματικά στοιχεία και όχι αποκλειστικά σε εμπειρικές ή υποκειμενικές εκτιμήσεις. Τα δεδομένα αυτά μπορεί να αφορούν χρόνους

λειτουργίας, χρόνους στάσης, βλάβες, ποσότητες παραγωγής, απορρίψεις ή ελαττωματικά τεμάχια, αλλαγές προϊόντων και επιμέρους κατηγορίες απωλειών.

Ωστόσο, η απλή συλλογή δεδομένων δεν εξασφαλίζει από μόνη της αξιόπιστη πληροφόρηση. Για να μπορέσουν τα δεδομένα να αξιοποιηθούν ουσιαστικά, πρέπει να οργανωθούν, να τυποποιηθούν και να αξιολογηθούν με ενιαίους ορισμούς. Με τον τρόπο αυτό, οι πρωτογενείς καταγραφές μετατρέπονται σε πληροφορία που μπορεί να ερμηνευθεί, να συγκριθεί και να οδηγήσει σε συγκεκριμένες ενέργειες βελτίωσης.

Σε πολλές βιομηχανικές εφαρμογές, οι καταγραφές παραγωγής μπορούν να προέρχονται από χειρόγραφες φόρμες, ηλεκτρονικά αρχεία ή ψηφιακά συστήματα, όπως τα Συστήματα Εκτέλεσης Παραγωγής. Στις χειρόγραφες ή ημι-χειροκίνητες καταγραφές εμφανίζονται συχνότερα ζητήματα συνέπειας και πληρότητας. Για παράδειγμα, μπορεί να υπάρχει διαφορετική ερμηνεία των αιτιών στάσης μεταξύ βαρδιών, καθυστερημένη συμπλήρωση στοιχείων, ελλιπής καταγραφή μικρών στάσεων ή ομαδοποίηση γεγονότων που θα έπρεπε να καταγράφονται ξεχωριστά. Η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η χειροκίνητη συλλογή δεδομένων μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια και την αξιοπιστία των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση παραγωγικών διεργασιών (Jericho, Jagusch, Sender, & Flügge, 2024).

Για τον λόγο αυτό, στην πράξη απαιτείται ένα σαφές και κοινά αποδεκτό πλαίσιο καταγραφής. Πρέπει να είναι ξεκάθαρο τι καταγράφεται, πότε καταγράφεται, με ποιον ορισμό και σε ποια κατηγορία απώλειας αντιστοιχεί. Η ύπαρξη ενιαίων ορισμών είναι ιδιαίτερα σημαντική όταν τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για σύγκριση μεταξύ βαρδιών, προϊόντων ή χρονικών περιόδων. Διαφορετικά, υπάρχει ο κίνδυνος οι δείκτες να αποτυπώνουν όχι μόνο την πραγματική απόδοση, αλλά και διαφορές στον τρόπο καταγραφής.

Η αξία των δεδομένων συνδέεται επίσης με την ταχύτητα αντίδρασης. Σε ένα παραγωγικό περιβάλλον, η καθυστερημένη αναγνώριση μιας επαναλαμβανόμενης στάσης ή μιας αύξησης των απορρίψεων μπορεί να οδηγήσει σε απώλειες χρόνου, υλικών και παραγωγικής δυναμικότητας. Αντίθετα, όταν τα δεδομένα συλλέγονται και αξιολογούνται έγκαιρα, η επιχείρηση μπορεί να εντοπίζει ταχύτερα τις αποκλίσεις, να αναζητά τα αίτια και να προχωρά σε διορθωτικές ενέργειες.

Στο πλαίσιο αυτό, η ψηφιακή καταγραφή μέσω Συστημάτων Εκτέλεσης Παραγωγής μπορεί να ενισχύσει την πληρότητα, την ακρίβεια και την ιχνηλασιμότητα των δεδομένων παραγωγής. Η αυτοματοποιημένη συλλογή δεδομένων μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα των στοιχείων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού, ενώ τα Συστήματα Εκτέλεσης Παραγωγής μπορούν να υποστηρίξουν τη μετατροπή των πρωτογενών δεδομένων σε χρήσιμη πληροφορία για τη διοίκηση της παραγωγής (Bianchini et al., 2024; Wang & Pan, 2011)

Παράλληλα, η ψηφιακή καταγραφή δεν καταργεί την ανάγκη ελέγχου των δεδομένων. Η αξιοπιστία των δεικτών εξακολουθεί να εξαρτάται από τη σωστή ταξινόμηση των απωλειών, τη σαφήνεια των πεδίων καταχώρισης και την ορθή χρήση του συστήματος από τους χρήστες. Επομένως, η ποιότητα των δεδομένων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα τόσο στις χειροκίνητες όσο και στις ψηφιακές μεθόδους καταγραφής.

1.2.3 Η σημασία των μετρήσεων στη διοίκηση παραγωγής

Οι μετρήσεις αποτελούν βασικό εργαλείο της διοίκησης παραγωγής, καθώς επιτρέπουν την παρακολούθηση της πραγματικής λειτουργίας μιας γραμμής και τη σύγκρισή της με τους προκαθορισμένους στόχους. Χωρίς μετρήσιμα δεδομένα, η αξιολόγηση της παραγωγικής απόδοσης βασίζεται κυρίως σε εμπειρικές εκτιμήσεις, οι οποίες μπορεί να μην αποτυπώνουν με ακρίβεια την πραγματική κατάσταση. Αντίθετα, η ύπαρξη οργανωμένων μετρήσεων επιτρέπει στη διοίκηση να εντοπίζει αποκλίσεις, να αναγνωρίζει απώλειες και να λαμβάνει αποφάσεις με βάση τεκμηριωμένα στοιχεία.

Στη βιομηχανική πράξη, οι μετρήσεις αποτυπώνονται συνήθως μέσω αναφορών, πινάκων παρακολούθησης και ψηφιακών πινάκων ελέγχου. Οι ψηφιακοί πίνακες ελέγχου, γνωστοί και ως dashboards, συγκεντρώνουν βασικές πληροφορίες για την απόδοση της γραμμής και διευκολύνουν την παρακολούθηση των σημαντικότερων δεικτών. Με τον τρόπο αυτό, η διοίκηση παραγωγής μπορεί να παρακολουθεί τόσο τη συνολική εικόνα όσο και τις επιμέρους αιτίες που επηρεάζουν την απόδοση.

Ειδικότερα, οι μετρήσεις επιτρέπουν:

- την αποτύπωση της τρέχουσας κατάστασης της γραμμής,
- τη σύγκριση της απόδοσης με στόχους ή προηγούμενες περιόδους,
- τον εντοπισμό απωλειών, χρόνων στάσης και σημείων που απαιτούν προσοχή,
- την αξιολόγηση της αποτελεσματικότητας διορθωτικών ή βελτιωτικών ενεργειών.

Ιδιαίτερη σημασία έχει ότι οι μετρήσεις μετατρέπουν τη συζήτηση για την απόδοση από γενική και αόριστη σε συγκεκριμένη και τεκμηριωμένη. Για παράδειγμα, αντί η αξιολόγηση να περιορίζεται στη διαπίστωση ότι η γραμμή δεν αποδίδει ικανοποιητικά, οι δείκτες μπορούν να δείξουν εάν η μείωση της απόδοσης συνδέεται με αυξημένους χρόνους στάσης, συχνές αλλαγές προϊόντος, τεχνικές βλάβες ή ποιοτικές απώλειες.

Με αυτόν τον τρόπο, οι μετρήσεις διευκολύνουν τη στοχευμένη παρέμβαση και ενισχύουν την επικοινωνία μεταξύ παραγωγής, συντήρησης και ποιότητας. Η μέτρηση της παραγωγικής απόδοσης δεν αποτελεί μόνο εργαλείο παρακολούθησης, αλλά και μηχανισμό διοίκησης και συνεχούς βελτίωσης. Η αξία της αυξάνεται ακόμη περισσότερο όταν τα δεδομένα συλλέγονται με τυποποιημένο και αξιόπιστο τρόπο, καθώς τότε οι αποφάσεις βασίζονται σε πραγματική εικόνα της παραγωγικής λειτουργίας και όχι σε αποσπασματικές εκτιμήσεις.

1.2.4 Από τα δεδομένα στη βελτίωση

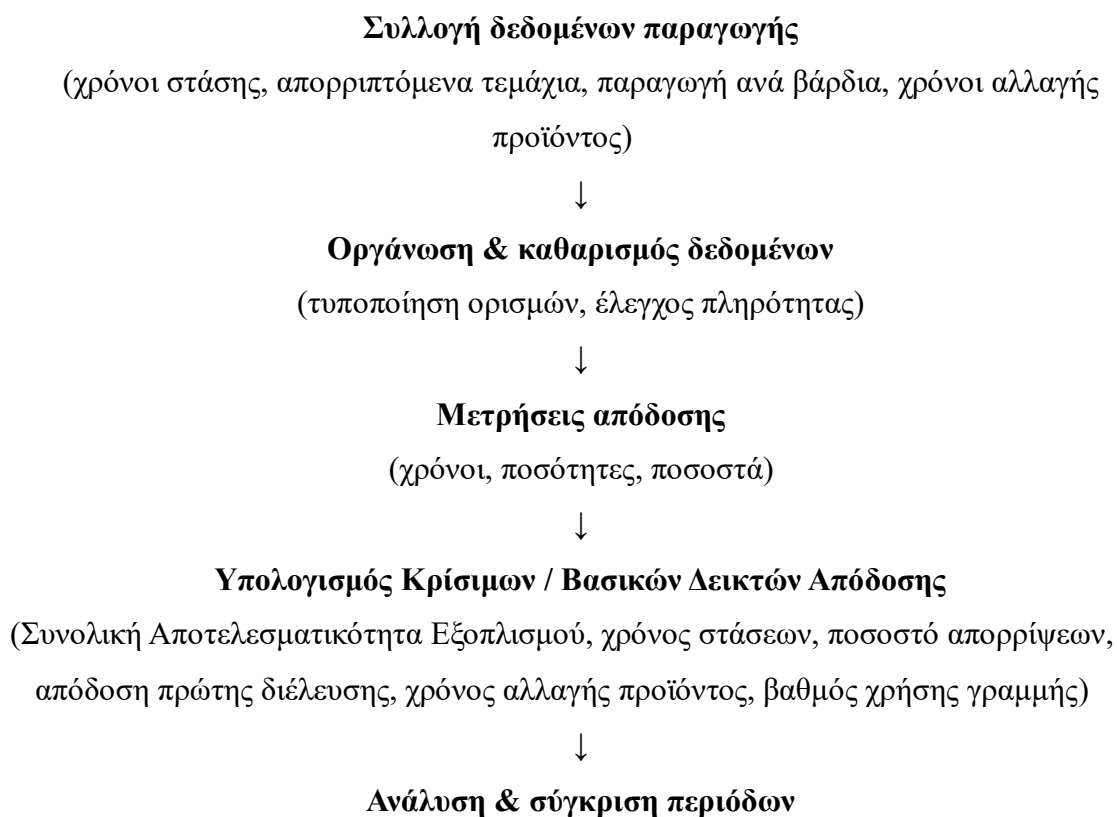
Η μετάβαση από τα πρωτογενή δεδομένα στη βελτίωση της παραγωγικής λειτουργίας δεν γίνεται αυτόματα. Απαιτείται μια συγκεκριμένη διαδικασία, μέσα από την οποία τα δεδομένα συλλέγονται, οργανώνονται, ελέγχονται και μετατρέπονται σε δείκτες που μπορούν να αξιοποιηθούν από τη διοίκηση παραγωγής. Η λογική αυτή είναι κεντρική στην παρούσα εργασία, καθώς η σύγκριση πριν και μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής βασίζεται ακριβώς στη δυνατότητα μετατροπής των δεδομένων παραγωγής σε τεκμηριωμένα συμπεράσματα.

Τα πρωτογενή δεδομένα μπορεί να περιλαμβάνουν χρόνους στάσης, παραγόμενες ποσότητες, απορριπτόμενα τεμάχια, χρόνους αλλαγής προϊόντος, τεχνικές βλάβες και ποιοτικές

αποκλίσεις. Τα δεδομένα αυτά, από μόνα τους, δεν επαρκούν για την αξιολόγηση της παραγωγικής απόδοσης. Για να αποκτήσουν πρακτική αξία, πρέπει να οργανωθούν με ενιαίους ορισμούς, να ελεγχθούν ως προς την πληρότητα και τη συνέπειά τους και στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό κατάλληλων δεικτών.

Η διαδικασία αυτή επιτρέπει στη διοίκηση να περάσει από την απλή καταγραφή γεγονότων στη συστηματική ανάλυση της παραγωγικής λειτουργίας. Μέσα από τους Κρίσιμους / Βασικούς Δείκτες Απόδοσης, όπως η Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού, οι χρόνοι στάσης, το ποσοστό απορρίψεων, η απόδοση πρώτης διέλευσης, ο χρόνος αλλαγής προϊόντος και ο βαθμός χρήσης της γραμμής, τα δεδομένα μετατρέπονται σε πληροφορία που μπορεί να οδηγήσει σε συγκεκριμένες ενέργειες βελτίωσης.

Η παρακάτω σχηματική απεικόνιση παρουσιάζει τη λογική που ακολουθείται στην παρούσα εργασία, από τη συλλογή δεδομένων έως τη διατύπωση προτάσεων βελτίωσης.



(χειρόγραφο/χειροκίνητη καταγραφή έναντι ψηφιακής καταγραφής μέσω Συστήματος
Εκτέλεσης Παραγωγής)



Συμπεράσματα & προτάσεις βελτίωσης

(στοχευμένες ενέργειες)

Σχήμα 1. Από τα δεδομένα στη βελτίωση της παραγωγής

1.3 Μετρήσεις απόδοσης

1.3.1 Ορισμός και προσέγγιση

Ως μέτρηση απόδοσης ορίζεται η διαδικασία ποσοτικοποίησης της επίδοσης μιας διεργασίας, με σκοπό την κατανόηση, την παρακολούθηση και τη βελτίωσή της. Στο βιομηχανικό περιβάλλον, αυτό σημαίνει ότι βασικές πτυχές της λειτουργίας μιας γραμμής, όπως ο χρόνος, η ποσότητα παραγωγής, η ποιότητα και οι απώλειες, αποτυπώνονται σε μετρήσιμα μεγέθη.

Με αυτόν τον τρόπο, η παραγωγική λειτουργία μπορεί να συγκριθεί με προκαθορισμένους στόχους, προηγούμενες περιόδους ή διαφορετικές βάρδιες. Η σύγκριση αυτή υποστηρίζει τη λήψη πιο τεκμηριωμένων αποφάσεων, καθώς η διοίκηση δεν βασίζεται μόνο σε γενικές παρατηρήσεις, αλλά σε συγκεκριμένα και συγκρίσιμα στοιχεία.

Οι μετρήσεις απόδοσης δεν περιορίζονται μόνο στα τελικά αποτελέσματα, όπως ο συνολικός αριθμός τεμαχίων που παρήχθησαν. Περιλαμβάνουν επίσης στοιχεία που βοηθούν στην ερμηνεία του αποτελέσματος, όπως ο διαθέσιμος χρόνος παραγωγής, ο χρόνος που χάθηκε λόγω στάσεων ή βλαβών, τα απορριπτόμενα τεμάχια και ο χρόνος που απαιτήθηκε για αλλαγές προϊόντος. Επομένως, οι μετρήσεις δεν δείχνουν μόνο τι παρήχθη, αλλά βοηθούν να εξηγηθεί και γιατί η απόδοση διαμορφώθηκε σε ένα συγκεκριμένο επίπεδο.

Στην πράξη, η μέτρηση απόδοσης υποστηρίζει τρεις βασικές λειτουργίες:

1. **Παρακολούθηση**, δηλαδή παροχή συνεχούς εικόνας της λειτουργίας της γραμμής.
2. **Διάγνωση**, δηλαδή εντοπισμό των βασικών αιτιών απωλειών ή αποκλίσεων.

3. **Βελτίωση**, δηλαδή τεκμηρίωση των ενεργειών βελτίωσης και αξιολόγηση της αποτελεσματικότητάς τους.

Η παρακολούθηση επιτρέπει στη διοίκηση να γνωρίζει την τρέχουσα κατάσταση της παραγωγής, η διάγνωση βοηθά στον εντοπισμό των κύριων προβλημάτων, ενώ η βελτίωση συνδέει τα ευρήματα με συγκεκριμένες διορθωτικές ή προληπτικές ενέργειες. Με αυτόν τον τρόπο, οι μετρήσεις απόδοσης αποτελούν τη βάση για την επιλογή Κρίσιμων / Βασικών Δεικτών Απόδοσης και για τη συστηματική διαχείριση της παραγωγικής αποτελεσματικότητας

1.3.2 Βασικές μετρήσεις απόδοσης ανά στόχο

Η παραγωγική απόδοση πρέπει να ερμηνεύεται πολυπαραγοντικά και όχι μόνο με βάση τον συνολικό αριθμό τεμαχίων που παράγονται. Κάθε στόχος απόδοσης συνδέεται με διαφορετικές μετρήσεις, οι οποίες βοηθούν στην κατανόηση της πραγματικής λειτουργίας της γραμμής. Για παράδειγμα, η Ποιότητα συνδέεται με τις απορρίψεις και την απόδοση πρώτης διέλευσης, ενώ η Αξιοπιστία συνδέεται με τους χρόνους στάσης, τις βλάβες και την τήρηση του προγράμματος.

Ο Πίνακας 2 παρουσιάζει ενδεικτικές μετρήσεις που συνδέονται με βασικούς στόχους απόδοσης της παραγωγικής λειτουργίας.

Πίνακας 2. Βασικές μετρήσεις απόδοσης ανά στόχο

Στόχος απόδοσης	Ενδεικτικές μετρήσεις
Ποιότητα	Ποσοστό απορρίψεων ή ελαττωματικών τεμαχίων, απόδοση πρώτης διέλευσης (First Pass Yield – FPY), εσωτερικά ελαττώματα, τάσεις απορρίψεων
Ταχύτητα / ρυθμός παραγωγής	Παραγωγή ανά βάρδια, ρυθμός παραγωγής, χρόνος κύκλου, σύγκριση πραγματικού και θεωρητικού ρυθμού παραγωγής
Αξιοπιστία	Χρόνος στάσεων, βλάβες, μέσος χρόνος μεταξύ βλαβών (Mean Time Between Failures – MTBF), μέσος χρόνος αποκατάστασης (Mean Time To Repair – MTTR), τήρηση προγράμματος
Ευελιξία	Χρόνος αλλαγής προϊόντος, χρόνος προετοιμασίας και ρυθμίσεων, εύρος προϊόντων, χρόνος αλλαγής προγράμματος παραγωγής
Χρήση πόρων	Αξιοποίηση εξοπλισμού, χρήση εργατοωρών, κατανάλωση υλικών, απώλειες παραγωγικού χρόνου

Στην παρούσα εργασία, ο πυρήνας των μετρήσεων επικεντρώνεται σε δείκτες που μπορούν να υποστηριχθούν από τα διαθέσιμα δεδομένα της γραμμής, όπως ο χρόνος στάσεων, οι τεχνικές βλάβες, οι απορρίψεις, η παραγωγή ανά βάρδια, οι χρόνοι αλλαγής προϊόντος και η απόδοση πρώτης διέλευσης. Οι επιμέρους αυτές μετρήσεις συνδέονται με σύνθετους δείκτες, όπως η Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού (Overall Equipment Effectiveness – OEE), η οποία συνδυάζει τη Διαθεσιμότητα, την Απόδοση και την Ποιότητα.

Η επιλογή των συγκεκριμένων μετρήσεων δεν είναι τυχαία. Οι δείκτες αυτοί συνδέονται άμεσα με τη συνολική αποδοτικότητα της γραμμής και είναι κατάλληλοι για τη σύγκριση δύο περιόδων με διαφορετικό τρόπο συλλογής δεδομένων: της περιόδου πριν από την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής και της περιόδου μετά την εφαρμογή του. Με αυτόν

τον τρόπο, η εργασία εξετάζει όχι μόνο τις αριθμητικές μεταβολές των δεικτών, αλλά και την επίδραση που έχει ο τρόπος καταγραφής στην αξιοπιστία των αποτελεσμάτων.

1.4 Κρίσιμοι / Βασικοί Δείκτες Απόδοσης (KPIs)

1.4.1 Ορισμός και κριτήρια ενός σωστού Βασικού Δείκτη Απόδοσης

Οι Κρίσιμοι / Βασικοί Δείκτες Απόδοσης (Key Performance Indicators – KPIs) αποτελούν επιλεγμένα μετρήσιμα μεγέθη, τα οποία αποτυπώνουν με συνοπτικό τρόπο την επίδοση μιας διεργασίας σε σχέση με προκαθορισμένους στόχους. Σε αντίθεση με τις απλές μετρήσεις ή καταγραφές, ένας Κρίσιμος / Βασικός Δείκτης Απόδοσης έχει συγκεκριμένο διοικητικό ρόλο, καθώς επιτρέπει την αξιολόγηση της κατάστασης, την αναγνώριση αποκλίσεων και την υποστήριξη αποφάσεων για διορθωτικές ή βελτιωτικές ενέργειες.

Η βασική διαφορά ανάμεσα σε μία απλή μέτρηση και σε έναν Κρίσιμο / Βασικό Δείκτη Απόδοσης είναι ότι ο δείκτης συνδέεται άμεσα με έναν στόχο. Για παράδειγμα, ο αριθμός των παραχθέντων τεμαχίων αποτελεί μία μέτρηση. Όταν όμως η ποσότητα αυτή συγκρίνεται με τον διαθέσιμο χρόνο παραγωγής, τον θεωρητικό ρυθμό ή τον στόχο της βάρδιας, τότε μπορεί να αξιοποιηθεί ως δείκτης απόδοσης. Με τον τρόπο αυτό, οι δείκτες δεν περιορίζονται στην περιγραφή της παραγωγικής λειτουργίας, αλλά βοηθούν στην ερμηνεία της και στη λήψη αποφάσεων.

Ένας Κρίσιμος / Βασικός Δείκτης Απόδοσης θεωρείται λειτουργικός όταν πληροί ορισμένα βασικά κριτήρια:

- είναι σαφώς ορισμένος, ώστε να είναι ξεκάθαρο τι ακριβώς μετράται,
- είναι μετρήσιμος και επαναλήψιμος, ώστε να υπολογίζεται με τον ίδιο τρόπο σε όλες τις βάρδιες και περιόδους,
- συνδέεται με συγκεκριμένο στόχο και απόφαση,
- είναι συγκρίσιμος στον χρόνο, ώστε να επιτρέπει την παρακολούθηση τάσεων,
- βασίζεται σε αξιόπιστη πηγή δεδομένων, με όσο το δυνατόν μικρότερη πιθανότητα σφάλματος.

Στη βιομηχανική πράξη, ένα σύστημα Κρίσιμων / Βασικών Δεικτών Απόδοσης πρέπει να ισορροπεί ανάμεσα στην πληρότητα και στην απλότητα. Ένας πολύ μικρός αριθμός δεικτών μπορεί να δίνει περιορισμένη εικόνα της πραγματικής λειτουργίας, ενώ η υπερβολική χρήση δεικτών μπορεί να δημιουργήσει πληροφοριακό θόρυβο και να δυσκολέψει την εστίαση στα πραγματικά σημαντικά προβλήματα. Για τον λόγο αυτό, οι δείκτες πρέπει να επιλέγονται με βάση τη δυνατότητά τους να αποτυπώνουν βασικές απώλειες, να συνδέονται με τους στόχους της παραγωγής και να οδηγούν σε στοχευμένες ενέργειες βελτίωσης.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, οι Κρίσιμοι / Βασικοί Δείκτες Απόδοσης αξιοποιούνται ως εργαλείο σύγκρισης μεταξύ της περιόδου πριν και μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής. Η επιλογή τους βασίζεται στη δυνατότητα αποτύπωσης της Διαθεσιμότητας, της Απόδοσης, της Ποιότητας, των χρόνων στάσης και της παραγωγής ανά βάρδια, δηλαδή των βασικών διαστάσεων που επηρεάζουν την αποδοτικότητα της εξεταζόμενης μηχανής συναρμολόγησης (Kamble, Gunasekaran, Ghadge, & Raut, 2020).

1.4.2 Οφέλη των Βασικών Δεικτών Απόδοσης στη βιομηχανική παραγωγή

Η συστηματική εφαρμογή Κρίσιμων / Βασικών Δεικτών Απόδοσης προσφέρει σημαντικά οφέλη στη διοίκηση και παρακολούθηση της βιομηχανικής παραγωγής. Οι δείκτες αυτοί δημιουργούν ένα κοινό πλαίσιο αξιολόγησης, μέσα από το οποίο η λειτουργία της γραμμής μπορεί να αποτυπωθεί με σαφή και συγκρίσιμο τρόπο.

Βασικό όφελος είναι η ενίσχυση της διαφάνειας στη λειτουργία της παραγωγής. Όταν οι χρόνοι, οι ποσότητες, οι απώλειες και τα ποσοστά αποτυπώνονται με ενιαίους ορισμούς, όλα τα εμπλεκόμενα τμήματα μπορούν να βασίζονται στην ίδια εικόνα της πραγματικότητας. Με αυτόν τον τρόπο, η συζήτηση για την απόδοση δεν βασίζεται σε υποκειμενικές εκτιμήσεις, αλλά σε κοινά αποδεκτά δεδομένα.

Παράλληλα, οι δείκτες υποστηρίζουν τη στοχευμένη βελτίωση, καθώς βοηθούν στον εντοπισμό των σημαντικότερων πηγών απωλειών. Όταν οι απώλειες κατηγοριοποιούνται, γίνεται πιο σαφές ποια σημεία απαιτούν προτεραιότητα. Έτσι, οι ενέργειες βελτίωσης μπορούν να βασίζονται σε πραγματικά δεδομένα και όχι σε γενικές εκτιμήσεις. Η Συνολική

Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα δείκτη που δεν αποτυπώνει μόνο μια τελική τιμή απόδοσης, αλλά βοηθά στον εντοπισμό απωλειών που σχετίζονται με τη Διαθεσιμότητα, την Απόδοση και την Ποιότητα (Muchiri & Pintelon, 2008; Ng Corrales, Lambán, Hernandez Korner, & Royo, 2020).

Ένα ακόμη σημαντικό όφελος είναι η βελτίωση της συνεργασίας μεταξύ των τμημάτων Παραγωγής, Συντήρησης και Ποιότητας. Οι Κρίσιμοι / Βασικοί Δείκτες Απόδοσης λειτουργούν ως κοινή γλώσσα επικοινωνίας, καθώς συνδέουν τεχνικά προβλήματα, ποιοτικές αποκλίσεις και παραγωγικές απώλειες με μετρήσιμα αποτελέσματα. Με τον τρόπο αυτό, διευκολύνεται η κατανόηση των αιτιών και η ανάληψη συντονισμένων ενεργειών.

Επιπλέον, οι δείκτες επιτρέπουν την παρακολούθηση της προόδου στον χρόνο. Μέσω της σύγκρισης μεταξύ βαρδιών, εβδομάδων ή περιόδων, μπορεί να αξιολογηθεί αν μια διορθωτική ή βελτιωτική ενέργεια είχε πραγματικό αποτέλεσμα. Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς αξιοποιεί τη μέτρηση ως εργαλείο συνεχούς βελτίωσης και όχι ως απλή αναφορά αποτελεσμάτων.

Στο πλαίσιο παραγωγικών συστημάτων που μεταβαίνουν από χειρόγραφη ή ημι-χειροκίνητη καταγραφή σε ψηφιακή καταγραφή μέσω Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής, οι δείκτες αποκτούν πρόσθετη αξία. Λειτουργούν ως γέφυρα σύγκρισης μεταξύ των δύο τρόπων καταγραφής και επιτρέπουν να αξιολογηθεί αν η ψηφιακή μέθοδος βελτιώνει την ακρίβεια, την πληρότητα και την αξιοπιστία της πληροφορίας. Τα Συστήματα Εκτέλεσης Παραγωγής μπορούν να υποστηρίξουν την ανάπτυξη και παρακολούθηση κατάλληλων δεικτών απόδοσης, μετατρέποντας τα παραγωγικά δεδομένα σε χρήσιμη πληροφορία για τη διοίκηση της παραγωγής (Bianchini et al., 2024).

1.4.3 Εφαρμογή Κρίσιμων / Βασικών Δεικτών Απόδοσης στην παραγωγική λειτουργία

Η εφαρμογή ενός συστήματος Κρίσιμων / Βασικών Δεικτών Απόδοσης δεν ολοκληρώνεται με τον απλό ορισμό των δεικτών. Για να αποκτήσει πρακτική αξία, απαιτείται να ενταχθεί στην καθημερινή λειτουργία της παραγωγής και να συνδεθεί με συγκεκριμένες διαδικασίες παρακολούθησης, αξιολόγησης και βελτίωσης. Με άλλα λόγια, οι δείκτες πρέπει να λειτουργούν όχι μόνο ως μέσο αναφοράς, αλλά και ως εργαλείο διοίκησης.

Για την αποτελεσματική εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος απαιτούνται ορισμένα βασικά βήματα:

1. **Καθορισμός σκοπού:** πρέπει να είναι σαφές ποιος είναι ο στόχος κάθε δείκτη, όπως η μείωση των χρόνων στάσης, η μείωση των απορρίψεων ή η σταθεροποίηση της παραγωγής ανά βάρδια.
2. **Τυποποίηση ορισμών:** απαιτείται κοινή κατανόηση του τι θεωρείται χρόνος στάσης, πότε ολοκληρώνεται μια αλλαγή προϊόντος και πότε ένα τεμάχιο χαρακτηρίζεται ως απορριπτόμενο ή ελαττωματικό.
3. **Καθορισμός πηγών δεδομένων:** πρέπει να προσδιορίζεται από πού αντλούνται τα δεδομένα, ποιος είναι υπεύθυνος για την καταχώριση ή την επιβεβαίωσή τους και με ποιον τρόπο ελέγχεται η αξιοπιστία τους.
4. **Διαδικασία αναφοράς:** οι δείκτες πρέπει να παρουσιάζονται σε συγκεκριμένη μορφή και σε προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα, όπως ανά βάρδια, ανά ημέρα ή ανά εβδομάδα.
5. **Τακτική ανασκόπηση:** απαιτείται καθιερωμένη διαδικασία συζήτησης των αποτελεσμάτων, ώστε οι αποκλίσεις να αναλύονται και να ορίζονται διορθωτικές ή βελτιωτικές ενέργειες.
6. **Σύνδεση με ενέργειες βελτίωσης:** κάθε σημαντική απόκλιση από τον στόχο πρέπει να οδηγεί σε συγκεκριμένο πλάνο ενεργειών, όπως διερεύνηση αιτίας, διορθωτική παρέμβαση ή προληπτική ενέργεια.

Η εμπειρία από τη βιομηχανική πράξη δείχνει ότι οι δείκτες δεν οδηγούν απαραίτητα σε βελτίωση μόνο και μόνο επειδή υπάρχουν. Όταν χρησιμοποιούνται αποκλειστικά ως μέσο αναφοράς αποτελεσμάτων, χωρίς σύνδεση με αποφάσεις και ενέργειες, η πρακτική τους αξία περιορίζεται. Αντίθετα, όταν εντάσσονται σε οργανωμένη διαδικασία συνεχούς βελτίωσης, μπορούν να υποστηρίξουν την αναγνώριση απωλειών, την ιεράρχηση προβλημάτων, την επιλογή στοχευμένων παρεμβάσεων και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων τους.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η λειτουργική χρήση των Κρίσιμων / Βασικών Δεικτών Απόδοσης είναι ιδιαίτερα σημαντική, διότι η σύγκριση πριν και μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής δεν αποσκοπεί μόνο στην παρουσίαση αριθμητικών

διαφορών. Στόχος είναι να εξεταστεί κατά πόσο η ψηφιακή καταγραφή μπορεί να βελτιώσει την ορατότητα των απωλειών, την αξιοπιστία της πληροφορίας και τελικά τη δυνατότητα λήψης καλύτερα τεκμηριωμένων αποφάσεων για τη βελτίωση της παραγωγικής λειτουργίας.

1.4.4 Ψηφιακή διαχείριση δεικτών απόδοσης μέσω Συστημάτων Εκτέλεσης Παραγωγής

Η ενσωμάτωση ψηφιακών συστημάτων στην παραγωγή μεταβάλλει ουσιαστικά τον τρόπο με τον οποίο συλλέγονται, οργανώνονται και αξιοποιούνται τα δεδομένα απόδοσης. Στο πλαίσιο αυτό, ιδιαίτερο ρόλο έχουν τα Συστήματα Εκτέλεσης Παραγωγής, τα οποία υποστηρίζουν την παρακολούθηση της παραγωγικής λειτουργίας σε επίπεδο γραμμής, μηχανής ή βάρδιας. Μέσω των συστημάτων αυτών, η πληροφορία συγκεντρώνεται πιο συστηματικά, συνδέεται με χρονικές σημάνσεις και μπορεί να αναλυθεί με μεγαλύτερη ακρίβεια (Kletti, 2007; Mayer, Mehdiyev, & Fettke, 2021).

Η ψηφιακή αυτή προσέγγιση συνδέεται με την Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση (Industry 4.0), η οποία αναφέρεται στη χρήση ψηφιακών τεχνολογιών, διασυνδεδεμένων συστημάτων, δεδομένων και αυτοματισμών στη βιομηχανική παραγωγή. Στόχος είναι η δημιουργία πιο ευέλικτων, διαφανών και αποδοτικών παραγωγικών συστημάτων, στα οποία η λήψη αποφάσεων βασίζεται περισσότερο σε πραγματικά δεδομένα και λιγότερο σε εμπειρικές εκτιμήσεις (Lee, Bagheri, & Kao, 2015; Mourtzis, Vlachou, & Milas, 2016).

Στο πλαίσιο αυτό, τα δεδομένα παραγωγής αποκτούν ιδιαίτερη σημασία, καθώς μπορούν να αξιοποιηθούν για την παρακολούθηση της απόδοσης, την ανάλυση απωλειών, την αναγνώριση αποκλίσεων και τη βελτίωση της ποιότητας. Η σχετική βιβλιογραφία αναδεικνύει ότι τα Συστήματα Εκτέλεσης Παραγωγής μπορούν να υποστηρίξουν την αναλυτική επεξεργασία παραγωγικών διεργασιών, δηλαδή τη συστηματική αποτύπωση της συμπεριφοράς της παραγωγικής διαδικασίας, τον εντοπισμό προβλημάτων και την παραγωγή τεκμηριωμένων συμπερασμάτων (Bianchini et al., 2024; Boudjenoun et al., 2025).

Η ψηφιακή διαχείριση των δεικτών δεν σημαίνει μόνο ταχύτερη συλλογή δεδομένων. Σημαίνει επίσης καλύτερη οργάνωση, δυνατότητα ελέγχου, ιχνηλασιμότητα και πιο άμεση σύνδεση των δεδομένων με αποφάσεις. Για παράδειγμα, οι χρόνοι στάσης μπορούν να

συνδεθούν με συγκεκριμένες αιτίες, οι ποιοτικές αποκλίσεις με συγκεκριμένες χρονικές περιόδους και η παραγωγή ανά βάρδια με συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας.

Σημαντικό στοιχείο της ψηφιοποίησης είναι η βελτίωση της ακεραιότητας των δεδομένων. Η ακεραιότητα των δεδομένων (data integrity) αναφέρεται στην πληρότητα, τη συνέπεια, την ακρίβεια και την αξιοπιστία των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση της παραγωγικής απόδοσης. Η χρήση ψηφιακών συστημάτων δεν εξαλείφει πλήρως τα προβλήματα καταγραφής, αλλά παρέχει καλύτερες δυνατότητες ελέγχου, ιχνηλασιμότητας και τυποποίησης.

Ωστόσο, η αξιοπιστία των ψηφιακών δεδομένων εξακολουθεί να εξαρτάται από την ορθή χρήση του συστήματος. Η σωστή επιλογή κωδικών αιτιολόγησης, η έγκαιρη καταχώριση συμβάντων, η επιβεβαίωση παραγωγής και η εκπαίδευση των χρηστών αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την αξιοποίηση των δεδομένων στην πράξη. Η αποδοχή και η σωστή χρήση ενός Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής από τους τελικούς χρήστες επηρεάζουν σημαντικά την επιτυχή εφαρμογή του (Innecco, Martins, & Gonçalves, 2022).

Με βάση τα παραπάνω, η ψηφιακή διαχείριση των δεικτών απόδοσης μέσω ενός Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εργαλείο για τη βελτίωση της παραγωγικής λειτουργίας. Η αξία του συστήματος, όμως, δεν εξαρτάται μόνο από την τεχνική εγκατάστασή του, αλλά και από την ποιότητα των δεδομένων, την τυποποίηση των διαδικασιών και τη σταθερή χρήση του από τους ανθρώπους που συμμετέχουν στην παραγωγική διαδικασία.

Κεφάλαιο 2. Θεωρητικό πλαίσιο δεικτών απόδοσης, παραγωγικών απωλειών και ψηφιακής συλλογής δεδομένων

2.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό πλαίσιο που αφορά τους δείκτες απόδοσης, τις παραγωγικές απώλειες και την ψηφιακή συλλογή δεδομένων στη βιομηχανική παραγωγή. Η ανάλυση εστιάζει στον τρόπο με τον οποίο οι πρωτογενείς καταγραφές μιας παραγωγικής γραμμής μπορούν να μετατραπούν σε ποσοτικές μετρήσεις και, στη συνέχεια, σε δομημένους δείκτες που αποτυπώνουν την απόδοση, τις απώλειες και τη συνολική αξιοποίηση του εξοπλισμού.

Κεντρικό άξονα του κεφαλαίου αποτελεί η Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού (Overall Equipment Effectiveness – OEE), καθώς συνδυάζει τρεις βασικές διαστάσεις της παραγωγικής λειτουργίας: τη Διαθεσιμότητα, την Απόδοση και την Ποιότητα. Η Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού αποτελεί έναν από τους πιο διαδεδομένους δείκτες αξιολόγησης της παραγωγικής απόδοσης, καθώς δεν περιορίζεται στην αποτύπωση της τελικής παραγωγής, αλλά βοηθά στον εντοπισμό των βασικών απωλειών που επηρεάζουν τη λειτουργία μιας μηχανής ή γραμμής παραγωγής (Muchiri & Pintelon, 2008; Ng Corrales et al., 2020).

Παράλληλα, αναλύονται επιμέρους μετρήσεις που επηρεάζουν άμεσα την παραγωγική αποτελεσματικότητα, όπως οι χρόνοι στάσης, οι τεχνικές βλάβες, το ποσοστό απορρίψεων, η απόδοση πρώτης διέλευσης, ο χρόνος αλλαγής προϊόντος και η παραγωγή ανά βάρδια. Οι μετρήσεις αυτές είναι απαραίτητες, διότι επιτρέπουν την ερμηνεία των τελικών δεικτών και βοηθούν στον εντοπισμό των σημείων όπου εμφανίζονται οι σημαντικότερες απώλειες.

Το κεφάλαιο εξετάζει επίσης τον ρόλο των Συστημάτων Εκτέλεσης Παραγωγής (Manufacturing Execution Systems – MES) στη συλλογή, οργάνωση και αξιοποίηση των βιομηχανικών δεδομένων. Τα συστήματα αυτά μπορούν να υποστηρίξουν τη συστηματική παρακολούθηση της παραγωγής, την ανάπτυξη δεικτών απόδοσης και τη μετατροπή των

πρωτογενών δεδομένων σε χρήσιμη πληροφορία για τη διοίκηση της παραγωγής (Bianchini et al., 2024). Η ψηφιακή συλλογή δεδομένων συνδέεται επίσης με το ευρύτερο πλαίσιο της Τέταρτης Βιομηχανικής Επανάστασης (Industry 4.0), όπου η παραγωγική λειτουργία παρακολουθείται με μεγαλύτερη ακρίβεια και οι αποφάσεις μπορούν να βασίζονται περισσότερο σε πραγματικά δεδομένα.

Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στην ποιότητα και την αξιοπιστία των δεδομένων. Η μετάβαση από χειρόγραφες ή ημι-χειροκίνητες καταγραφές σε ψηφιακή συλλογή δεδομένων μπορεί να βελτιώσει την πληρότητα και την ακρίβεια των πληροφοριών που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των δεικτών. Ωστόσο, η ύπαρξη ψηφιακού συστήματος δεν εξαλείφει πλήρως την ανάγκη ελέγχου, καθώς η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εξακολουθεί να εξαρτάται από τη σωστή ταξινόμηση των απωλειών, την πληρότητα των καταχωρίσεων και την ορθή χρήση του συστήματος από τους χρήστες (Hedman et al., 2016; Wang & Pan, 2011).

Η διάσταση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για την παρούσα εργασία, καθώς η μελέτη περίπτωσης επικεντρώνεται στη σύγκριση δύο διακριτών περιόδων: της περιόδου πριν από την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής και της περιόδου μετά την εφαρμογή του PLEX. Επομένως, η σύγκριση των αποτελεσμάτων δεν βασίζεται μόνο στις τελικές αριθμητικές τιμές των δεικτών, αλλά και στον τρόπο με τον οποίο τα δεδομένα συλλέγονται, οργανώνονται, ελέγχονται και ερμηνεύονται.

Συνοψίζοντας, στόχος του παρόντος κεφαλαίου είναι να διαμορφώσει το θεωρητικό υπόβαθρο πάνω στο οποίο θα στηριχθεί η μεθοδολογία του Κεφαλαίου 3, καθώς και η εμπειρική ανάλυση των αποτελεσμάτων στο Κεφάλαιο 4. Για τον λόγο αυτό, παρουσιάζονται οι βασικοί δείκτες, οι μεταβλητές που τους επηρεάζουν, οι παραγωγικές απώλειες και η σημασία της ψηφιακής συλλογής δεδομένων για τη διασφάλιση της αξιοπιστίας και της συγκρισιμότητας των συμπερασμάτων.

2.2 Απόδοση γραμμής και έννοια απωλειών

Η αξιολόγηση της απόδοσης μιας παραγωγικής γραμμής δεν μπορεί να περιοριστεί μόνο στον αριθμό των τεμαχίων που παράγονται. Για μια ολοκληρωμένη αποτίμηση της λειτουργίας

της, απαιτείται η ταυτόχρονη εξέταση περισσότερων παραμέτρων της παραγωγικής διαδικασίας. Ιδιαίτερη σημασία έχει ο χρόνος κατά τον οποίο ο εξοπλισμός είναι διαθέσιμος για παραγωγή, ο πραγματικός ρυθμός λειτουργίας της γραμμής σε σχέση με τον θεωρητικό ή ονομαστικό ρυθμό, καθώς και το ποσοστό της παραγωγής που είναι ποιοτικά αποδεκτό.

Η προσέγγιση που βασίζεται στην ανάλυση των απωλειών είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στη διοίκηση παραγωγής, καθώς μετατρέπει μια γενική διαπίστωση, όπως ότι η γραμμή δεν αποδίδει ικανοποιητικά, σε συγκεκριμένες και μετρήσιμες κατηγορίες απωλειών. Με αυτόν τον τρόπο, οι απώλειες μπορούν να εντοπιστούν, να ταξινομηθούν, να ιεραρχηθούν και να περιοριστούν μέσω στοχευμένων διορθωτικών ή βελτιωτικών ενεργειών.

Στη βιομηχανική πράξη, οι απώλειες μιας παραγωγικής γραμμής εμφανίζονται με διαφορετικές μορφές. Μπορεί να σχετίζονται με χρόνους στάσης και τεχνικές βλάβες, μικροδιακοπές, μειωμένη ταχύτητα λειτουργίας, απορρίψεις ή ελαττωματικά τεμάχια, χρόνους αλλαγής προϊόντος και οργανωτικές καθυστερήσεις, όπως αναμονές για υλικά, ελέγχους ή εγκρίσεις. Η κατηγοριοποίηση αυτών των απωλειών συνδέεται άμεσα με τη θεωρία της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού και της Ολικής Παραγωγικής Συντήρησης, καθώς επιτρέπει την αναγνώριση των βασικών αιτιών που περιορίζουν την αξιοποίηση του εξοπλισμού (Muchiri & Pintelon, 2008; Ng Corrales et al., 2020).

Η πρακτική αξία της ανάλυσης απωλειών βρίσκεται στην ικανότητά της να κατευθύνει την προσπάθεια βελτίωσης στα σημαντικότερα προβλήματα. Σε πολλές παραγωγικές διεργασίες, ένας περιορισμένος αριθμός αιτιών μπορεί να ευθύνεται για μεγάλο μέρος των συνολικών απωλειών. Επομένως, η συστηματική καταγραφή και ταξινόμηση των απωλειών βοηθά στην ιεράρχηση προτεραιοτήτων και στη λήψη πιο τεκμηριωμένων αποφάσεων.

Στο πλαίσιο της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού, οι απώλειες μπορούν να συνδεθούν με τρεις βασικές διαστάσεις. Οι χρόνοι στάσης, οι τεχνικές βλάβες, οι αναμονές και οι καθυστερήσεις επηρεάζουν κυρίως τη Διαθεσιμότητα. Οι μικροδιακοπές, η μειωμένη ταχύτητα και οι αποκλίσεις από τον θεωρητικό ρυθμό παραγωγής επηρεάζουν την Απόδοση. Αντίστοιχα, οι απορρίψεις, τα ελαττωματικά τεμάχια και οι επανακατεργασίες επηρεάζουν την Ποιότητα. Με τον τρόπο αυτό, η ανάλυση των απωλειών δεν λειτουργεί ανεξάρτητα από τους δείκτες, αλλά αποτελεί τη βάση για την ερμηνεία τους.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η έννοια των απωλειών είναι κρίσιμη, καθώς η σύγκριση της περιόδου πριν και μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής δεν βασίζεται μόνο στη μεταβολή των συνολικών δεικτών. Αντίθετα, εστιάζει και στην καλύτερη κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν τη Διαθεσιμότητα, την Απόδοση, την Ποιότητα και την παραγωγή ανά βάρδια. Με αυτόν τον τρόπο, η ανάλυση δεν περιορίζεται στην καταγραφή αριθμητικών διαφορών, αλλά συνδέεται με την αναγνώριση των πραγματικών πηγών απωλειών και των δυνατοτήτων βελτίωσης της γραμμής.

2.3 Σύστημα αναφοράς παραγωγικού χρόνου τύπου «καταρράκτη»

Για την ορθή κατανόηση και ερμηνεία των δεικτών απόδοσης είναι απαραίτητη η αποσαφήνιση της χρονικής βάσης πάνω στην οποία αυτοί υπολογίζονται. Στη βιομηχανική πράξη, ο συνολικός χρόνος μιας βάρδιας δεν μετατρέπεται εξ ολοκλήρου σε ωφέλιμο παραγωγικό χρόνο. Αντίθετα, η αρχική αυτή χρονική διάρκεια μειώνεται σταδιακά, καθώς αφαιρούνται διαφορετικές κατηγορίες χρόνων και απωλειών.

Αρχικά, από τον συνολικό χρόνο βάρδιας αφαιρούνται οι προγραμματισμένες στάσεις, όπως διαλείμματα, προγραμματισμένη συντήρηση, εκπαίδευση ή άλλες προγραμματισμένες δραστηριότητες. Με αυτόν τον τρόπο προκύπτει ο προγραμματισμένος χρόνος παραγωγής, δηλαδή ο χρόνος κατά τον οποίο η γραμμή είναι προγραμματισμένο να παράγει. Στη συνέχεια, από τον χρόνο αυτό αφαιρούνται οι απρογραμμάτιστες στάσεις, οι τεχνικές βλάβες, οι αναμονές υλικών, οι ρυθμίσεις και άλλες απώλειες Διαθεσιμότητας. Έτσι προκύπτει ο πραγματικός χρόνος λειτουργίας της γραμμής.

Η σταδιακή αυτή απομείωση του διαθέσιμου χρόνου μπορεί να παρουσιαστεί με λογική τύπου «καταρράκτη», όπου κάθε επίπεδο αφαιρεί μία συγκεκριμένη κατηγορία απωλειών από το προηγούμενο. Η προσέγγιση αυτή συνδέεται με τη θεωρία της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού και της Ολικής Παραγωγικής Συντήρησης, καθώς βοηθά στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο οι διαφορετικές μορφές απωλειών επηρεάζουν τη συνολική παραγωγική απόδοση (Muchiri & Pintelon, 2008; Ng Corrales et al., 2020).

Η βασική λογική του συστήματος παρουσιάζεται στο ακόλουθο σχήμα.

Συνολικός χρόνος βάρδιας

↓ μείον προγραμματισμένες στάσεις

Προγραμματισμένος χρόνος παραγωγής

↓ μείον απρογραμματίστες στάσεις και απώλειες Διαθεσιμότητας

Χρόνος λειτουργίας

↓ μείον απώλειες ταχύτητας και μικροδιακοπές

Παραγωγικός χρόνος σε θεωρητικό ρυθμό

↓ μείον απώλειες Ποιότητας

Ωφέλιμος χρόνος παραγωγής

Σχήμα 2. Σύστημα αναφοράς παραγωγικού χρόνου τύπου «καταρράκτη»

Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει αναλυτικά τα στάδια της παραπάνω λογικής και τις βασικές κατηγορίες απωλειών που αφαιρούνται σε κάθε επίπεδο.

Πίνακας 3. Σύστημα αναφοράς παραγωγικού χρόνου και απωλειών

Στάδιο ανάλυσης	Περιγραφή / αφαιρούμενες απώλειες
Συνολικός χρόνος βάρδιας	Ο συνολικός χρόνος παρουσίας του προσωπικού και διαθεσιμότητας της γραμμής κατά τη διάρκεια της βάρδιας.
Μείον προγραμματισμένες στάσεις	Διαλείμματα, προγραμματισμένη συντήρηση, εκπαίδευση ή άλλες προγραμματισμένες δραστηριότητες.
Προγραμματισμένος χρόνος παραγωγής	Ο καθαρός χρόνος κατά τον οποίο η γραμμή είναι προγραμματισμένο να παράγει.
Μείον χρόνοι στάσης / απώλειες Διαθεσιμότητας	Βλάβες, ρυθμίσεις, αναμονές υλικών, καθυστερήσεις ελέγχων ή άλλες απρογραμματίστες στάσεις.
Χρόνος λειτουργίας	Ο πραγματικός χρόνος κατά τον οποίο η μηχανή ή η γραμμή βρίσκεται σε λειτουργία.
Μείον απώλειες ταχύτητας / Απόδοσης	Μικροδιακοπές, μειωμένη ταχύτητα λειτουργίας ή απόκλιση από τον θεωρητικό ρυθμό παραγωγής.
Παραγωγικός χρόνος σε θεωρητικό ρυθμό	Ο χρόνος που αντιστοιχεί στην παραγωγή που πραγματοποιήθηκε, λαμβάνοντας υπόψη τον θεωρητικό ή πρότυπο ρυθμό λειτουργίας.
Μείον απώλειες Ποιότητας	Ελαττωματικά ή απορριπτόμενα τεμάχια, επανακατεργασίες και λοιπές ποιοτικές αποκλίσεις.
Ωφέλιμος χρόνος παραγωγής	Ο χρόνος που αντιστοιχεί στην αποδεκτή παραγωγή και αξιοποιείται για την αποτίμηση της τελικής παραγωγικής αποτελεσματικότητας.

Όπως αποτυπώνεται στο Σχήμα 2 και στον Πίνακα 3, η προσέγγιση τύπου «καταρράκτη» επιτρέπει τη σταδιακή μετάβαση από τον συνολικό χρόνο βάρδιας στον πραγματικά ωφέλιμο χρόνο παραγωγής. Με τον τρόπο αυτό, οι απώλειες δεν αντιμετωπίζονται ως ένα ενιαίο και ασαφές μέγεθος, αλλά κατανέμονται σε διακριτές κατηγορίες που συνδέονται με συγκεκριμένες διαστάσεις της παραγωγικής απόδοσης.

Οι απώλειες που σχετίζονται με προγραμματίσιμες στάσεις, βλάβες, αναμονές και ρυθμίσεις επηρεάζουν κυρίως τη Διαθεσιμότητα. Οι αποκλίσεις από τον θεωρητικό ρυθμό παραγωγής, οι μικροδιακοπές και η μειωμένη ταχύτητα λειτουργίας επηρεάζουν την Απόδοση. Αντίστοιχα, οι απορρίψεις, τα ελαττωματικά τεμάχια και οι επανακατεργασίες επηρεάζουν την Ποιότητα. Η οργάνωση αυτή αποτελεί τη βάση για τον υπολογισμό της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού, καθώς ο δείκτης συνδυάζει τις τρεις αυτές διαστάσεις σε μία συνολική αποτίμηση της αξιοποίησης του εξοπλισμού.

Στην παρούσα εργασία, το σύστημα αναφοράς παραγωγικού χρόνου τύπου «καταρράκτη» χρησιμοποιείται ως θεωρητικό πλαίσιο για τη σύγκριση της περιόδου πριν και μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής. Η λογική αυτή επιτρέπει την εξέταση όχι μόνο της τελικής τιμής των δεικτών, αλλά και του τρόπου με τον οποίο οι επιμέρους απώλειες καταγράφονται, ταξινομούνται και επηρεάζουν το αποτέλεσμα. Επομένως, η μετάβαση από χειρόγραφη ή χειροκίνητη καταγραφή σε ψηφιακή καταγραφή μέσω PLEX συνδέεται άμεσα με την καλύτερη αποτύπωση των απωλειών και τη βελτίωση της αξιοπιστίας των δεδομένων.

2.4 Ορισμοί, μεταβλητές και υπολογισμός των δεικτών

Βασική προϋπόθεση για την αξιόπιστη εφαρμογή των Κρίσιμων / Βασικών Δεικτών Απόδοσης είναι η ύπαρξη σαφών και ενιαίων ορισμών. Εάν οι ορισμοί ή ο τρόπος μέτρησης των μεταβλητών διαφοροποιούνται μεταξύ βαρδιών ή μεταξύ της περιόδου πριν και μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής, οι δείκτες χάνουν τη συγκρισιμότητά τους και τα αποτελέσματα μπορεί να οδηγήσουν σε λανθασμένα συμπεράσματα.

Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία υιοθετούνται ενιαίοι ορισμοί, οι οποίοι συνδέονται με τη λογική του συστήματος αναφοράς παραγωγικού χρόνου τύπου «καταρράκτη»

που παρουσιάστηκε στην προηγούμενη ενότητα. Στις ενότητες που ακολουθούν παρουσιάζονται οι βασικές χρονικές μεταβλητές, οι ποσότητες παραγωγής, οι τύποι υπολογισμού και οι ελάχιστες απαιτήσεις δεδομένων που είναι απαραίτητες για τον προσδιορισμό κάθε δείκτη.

Με αυτόν τον τρόπο, η σύγκριση μεταξύ των δύο εξεταζόμενων περιόδων βασίζεται σε κοινή λογική υπολογισμού και όχι σε διαφορετικές πρακτικές καταγραφής. Η σαφής οριοθέτηση των μεταβλητών είναι ιδιαίτερα σημαντική στην παρούσα μελέτη, καθώς η περίοδος πριν από την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής βασίζεται σε χειρόγραφες ή ημι-χειροκίνητες καταγραφές, ενώ η περίοδος μετά την εφαρμογή του συστήματος βασίζεται σε ψηφιακή καταγραφή μέσω PLEX.

2.4.1 Χρονικές μεταβλητές και ποσότητες παραγωγής

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας χρησιμοποιούνται χρονικές μεταβλητές και ποσότητες παραγωγής, οι οποίες αποτελούν τη βάση για τον υπολογισμό των δεικτών απόδοσης. Οι μεταβλητές αυτές πρέπει να ορίζονται με ενιαίο τρόπο, ώστε να διασφαλίζεται η συγκρισιμότητα μεταξύ της περιόδου πριν και μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής.

Η σαφής οριοθέτησή τους είναι απαραίτητη, καθώς οι ίδιοι ορισμοί θα χρησιμοποιηθούν στους υπολογισμούς της Διαθεσιμότητας, της Απόδοσης, της Ποιότητας και της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού.

Οι βασικές χρονικές μεταβλητές είναι οι εξής:

- **Συνολικός χρόνος βάρδιας (T_{total}):** η συνολική διάρκεια της βάρδιας, η οποία στην παρούσα εργασία αντιστοιχεί σε οκτώ ώρες ή 480 λεπτά.
- **Προγραμματισμένος χρόνος παραγωγής (T_{prod}):** ο χρόνος της βάρδιας μετά την αφαίρεση των προγραμματισμένων στάσεων, όπως διάλειμμα, προγραμματισμένη συντήρηση, εκπαίδευση ή άλλες προγραμματισμένες δραστηριότητες.

- **Χρόνος στάσεων / χρόνος μη διαθεσιμότητας (Tdowntime):** ο χρόνος εντός του προγραμματισμένου χρόνου παραγωγής κατά τον οποίο η μηχανή ή η γραμμή δεν παράγει, με καταγεγραμμένη αιτιολογία.
- **Χρόνος λειτουργίας (Trun):** ο χρόνος που προκύπτει μετά την αφαίρεση του χρόνου στάσεων από τον προγραμματισμένο χρόνο παραγωγής.
- **Θεωρητικός χρόνος κύκλου ή ονομαστικός ρυθμός παραγωγής:** η θεωρητική ταχύτητα ή ο πρότυπος ρυθμός με τον οποίο αναμένεται να λειτουργεί η γραμμή για συγκεκριμένο προϊόν.

Ο Χρόνος λειτουργίας υπολογίζεται ως εξής:

Χρόνος λειτουργίας = Προγραμματισμένος χρόνος παραγωγής – Χρόνος στάσεων

$$Trun = Tprod - Tdowntime$$

(2.1)

Οι βασικές ποσότητες παραγωγής είναι οι εξής:

- **Συνολικά παραχθέντα τεμάχια (Qtotal):** το σύνολο των τεμαχίων που παρήχθησαν σε συγκεκριμένη περίοδο ή βάρδια.
- **Αποδεκτά τεμάχια (Qgood):** τα τεμάχια που πληρούν τις απαιτήσεις ποιότητας και μπορούν να θεωρηθούν κατάλληλα.
- **Απορριπτόμενα / ελαττωματικά τεμάχια (Qscrap):** τα τεμάχια που δεν πληρούν τις απαιτήσεις ποιότητας και απορρίπτονται.
- **Τεμάχια επανακατεργασίας, όπου υπάρχουν (Qrework):** τεμάχια που απαιτούν πρόσθετη εργασία ή διόρθωση πριν χαρακτηριστούν αποδεκτά.

Η παραπάνω σειρά ακολουθείται και στην παρουσίαση των δεικτών στις επόμενες υποενότητες, ώστε η ανάλυση να είναι συνεπής και ευκολότερα κατανοητή. Με αυτόν τον τρόπο, ο αναγνώστης μπορεί να παρακολουθήσει τη μετάβαση από τις βασικές χρονικές μεταβλητές και ποσότητες παραγωγής προς τους σύνθετους δείκτες απόδοσης.

2.4.2 Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού

Η Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού (Overall Equipment Effectiveness – OEE) αποτελεί έναν από τους βασικότερους δείκτες αξιολόγησης της παραγωγικής απόδοσης μιας

μηχανής ή γραμμής παραγωγής. Ο δείκτης αποτυπώνει σε μία ενιαία ποσοστιαία τιμή τον βαθμό αξιοποίησης του εξοπλισμού, λαμβάνοντας υπόψη τρεις βασικές διαστάσεις της παραγωγικής λειτουργίας: τη Διαθεσιμότητα, την Απόδοση και την Ποιότητα.

Η έννοια της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού συνδέεται ιστορικά με τη φιλοσοφία της Ολικής Παραγωγικής Συντήρησης (Total Productive Maintenance – TPM). Η Ολική Παραγωγική Συντήρηση αποτελεί προσέγγιση διοίκησης και βελτίωσης της παραγωγής, η οποία στοχεύει στη μέγιστη αξιοποίηση του εξοπλισμού μέσω της μείωσης βλαβών, απωλειών, μικροδιακοπών και ποιοτικών αποκλίσεων. Στο πλαίσιο αυτό, η Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού χρησιμοποιείται ως εργαλείο παρακολούθησης της απόδοσης του εξοπλισμού και εντοπισμού των απωλειών που περιορίζουν την παραγωγική αποτελεσματικότητα (Dal, Tugwell, & Greatbanks, 2000; Muchiri & Pintelon, 2008; Nakajima, 1988; Ng Corrales et al., 2020).

Μαθηματικά, ο δείκτης υπολογίζεται ως γινόμενο των τριών επιμέρους συνιστωσών του:

$$\text{Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού} = \text{Διαθεσιμότητα} \times \text{Απόδοση} \times \text{Ποιότητα}$$
$$\text{OEE} = \text{Availability} \times \text{Performance} \times \text{Quality}$$

(2.2)

Η **Διαθεσιμότητα** προσδιορίζει το μέρος του προγραμματισμένου χρόνου παραγωγής κατά το οποίο η γραμμή βρίσκεται πραγματικά σε λειτουργία. Επηρεάζεται κυρίως από χρόνους στάσης, βλάβες, ρυθμίσεις, αναμονές και άλλες απώλειες χρόνου.

$$\text{Διαθεσιμότητα} = \text{Χρόνος λειτουργίας} / \text{Προγραμματισμένος χρόνος παραγωγής}$$

$$\text{Availability} = \text{T}_{\text{run}} / \text{T}_{\text{prod}}$$

(2.3)

Η **Απόδοση** αποτυπώνει κατά πόσο η γραμμή λειτουργεί κοντά στον θεωρητικό ή ονομαστικό ρυθμό παραγωγής. Επηρεάζεται κυρίως από μικροδιακοπές, μειωμένη ταχύτητα και αποκλίσεις από τον πρότυπο ρυθμό λειτουργίας.

Όταν χρησιμοποιείται θεωρητικός χρόνος κύκλου, η Απόδοση μπορεί να υπολογιστεί ως εξής:

$$\text{Απόδοση} = (\text{Θεωρητικός χρόνος κύκλου} \times \text{Συνολικά παραχθέντα τεμάχια}) / \text{Χρόνος λειτουργίας}$$

$$\text{Performance} = (\text{Ideal Cycle Time} \times Q_{\text{total}}) / \text{Trun}$$

(2.4)

Εναλλακτικά, όταν χρησιμοποιείται ονομαστικός ρυθμός παραγωγής, η Απόδοση μπορεί να εκφραστεί ως σύγκριση της πραγματικής παραγωγής με τη θεωρητικά αναμενόμενη παραγωγή για τον διαθέσιμο χρόνο λειτουργίας:

$$\text{Απόδοση} = \text{Πραγματική παραγωγή} / \text{Θεωρητικά αναμενόμενη παραγωγή}$$

$$\text{Performance} = Q_{\text{total}} / Q_{\text{theoretical}}$$

(2.5)

Η **Ποιότητα** αποτυπώνει το ποσοστό των αποδεκτών τεμαχίων σε σχέση με τη συνολική παραγωγή. Επηρεάζεται από απορρίψεις, ελαττωματικά τεμάχια και, όπου υπάρχουν, επανακατεργασίες.

$$\text{Ποιότητα} = \text{Αποδεκτά τεμάχια} / \text{Συνολικά παραχθέντα τεμάχια}$$

$$\text{Quality} = Q_{\text{good}} / Q_{\text{total}}$$

(2.6)

Όταν οι παραπάνω δείκτες παρουσιάζονται ως ποσοστά, οι τιμές πολλαπλασιάζονται επί 100. Για παράδειγμα, τιμή 0,82 αντιστοιχεί σε 82,00%.

Με βάση τα παραπάνω, η Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού δεν αποτελεί απλό δείκτη παραγωγής, αλλά σύνθετο δείκτη που ενσωματώνει απώλειες χρόνου, απώλειες ταχύτητας και απώλειες ποιότητας. Για τον λόγο αυτό, είναι ιδιαίτερα χρήσιμη στη σύγκριση διαφορετικών περιόδων λειτουργίας, όπως στην παρούσα εργασία, όπου εξετάζεται η περίοδος πριν και μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής.

2.4.3 Χρόνοι στάσης και βλάβες

Οι χρόνοι στάσης αποτελούν μία από τις σημαντικότερες πηγές απωλειών σε μια βιομηχανική διεργασία, καθώς μειώνουν άμεσα τη Διαθεσιμότητα της γραμμής. Όταν η μηχανή ή η γραμμή δεν παράγει ενώ είναι προγραμματισμένη να λειτουργεί, ο διαθέσιμος παραγωγικός χρόνος μειώνεται και, κατά συνέπεια, επηρεάζεται αρνητικά η συνολική παραγωγική απόδοση.

Η μέτρηση του συνολικού χρόνου στάσης είναι απαραίτητη, αλλά δεν είναι από μόνη της επαρκής για τη βελτίωση της λειτουργίας. Για να μπορεί η επιχείρηση να παρέμβει αποτελεσματικά, πρέπει να είναι γνωστό όχι μόνο πόσος χρόνος χάθηκε, αλλά και για ποιον λόγο χάθηκε. Για τον λόγο αυτό, οι χρόνοι στάσης πρέπει να αναλύονται ανά κατηγορία αιτίας, όπως τεχνικές βλάβες, ρυθμίσεις, αλλαγές προϊόντος, αναμονές υλικών, καθυστερήσεις ελέγχων ή άλλες οργανωτικές καθυστερήσεις.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, οι τεχνικές βλάβες εξετάζονται ως υποκατηγορία των συνολικών χρόνων στάσης. Συγκεκριμένα, οι δύο βασικές έννοιες ορίζονται ως εξής:

- **Συνολικός χρόνος στάσεων (Tdowntime):** το άθροισμα όλων των χρονικών διαστημάτων κατά τα οποία η γραμμή δεν παράγει εντός του προγραμματισμένου χρόνου παραγωγής, ανεξάρτητα από την αιτία της στάσης.
- **Χρόνος τεχνικών βλαβών (Tbreakdown):** το μέρος του συνολικού χρόνου στάσεων που οφείλεται σε τεχνικές αστοχίες, μηχανικές ή ηλεκτρολογικές βλάβες και γενικότερες δυσλειτουργίες του εξοπλισμού.

Η διάκριση αυτή είναι σημαντική, διότι δεν έχουν όλες οι στάσεις την ίδια αιτία ούτε απαιτούν την ίδια διορθωτική ενέργεια. Για παράδειγμα, μια στάση λόγω τεχνικής βλάβης συνδέεται κυρίως με τη συντήρηση και μπορεί να οδηγήσει σε επανεξέταση του προγράμματος προληπτικής συντήρησης. Αντίθετα, μια στάση λόγω αναμονής υλικών συνδέεται περισσότερο με τον προγραμματισμό παραγωγής, την τροφοδοσία της γραμμής ή την εφοδιαστική ροή.

Ο συνολικός χρόνος στάσεων μπορεί να εκφραστεί ως άθροισμα επιμέρους κατηγοριών απωλειών:

Συνολικός χρόνος στάσεων = Χρόνος τεχνικών βλαβών + Χρόνος ρυθμίσεων + Χρόνος αλλαγών προϊόντος + Χρόνος αναμονών + Λοιπές στάσεις

$T_{downtime} = T_{breakdown} + T_{adjustment} + T_{changeover} + T_{waiting} + T_{other}$
(2.7)

Η παραπάνω σχέση δείχνει ότι η μείωση των χρόνων στάσης δεν εξαρτάται μόνο από τη μείωση των τεχνικών βλαβών. Σε αρκετές περιπτώσεις, σημαντικές απώλειες μπορεί να προκύπτουν από οργανωτικούς ή διαδικαστικούς παράγοντες, όπως καθυστερήσεις στην

τροφοδοσία υλικών, αναμονή ελέγχων, αλλαγές προϊόντος ή μη έγκαιρη επιβεβαίωση παραγωγικών ενεργειών.

Στην ψηφιακή καταγραφή μέσω Συστημάτων Εκτέλεσης Παραγωγής, η κατηγοριοποίηση των στάσεων μπορεί να πραγματοποιείται με πιο τυποποιημένο τρόπο, μέσω χρονικών σημάτων και κωδικών αιτιολόγησης. Αυτό επιτρέπει πιο αξιόπιστη ανάλυση των απωλειών, καθώς οι στάσεις μπορούν να συνδεθούν με συγκεκριμένες αιτίες, χρονικές περιόδους, βάρδιες ή προϊόντα. Η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η αξία της αυτόματης ή ψηφιακής καταγραφής δεν βρίσκεται μόνο στη συλλογή περισσότερων δεδομένων, αλλά και στη δυνατότητα καλύτερης ταξινόμησης και ερμηνείας των απωλειών που επηρεάζουν τη Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού (Hedman et al., 2016; Wang & Pan, 2011).

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, η ανάλυση των χρόνων στάσης είναι ιδιαίτερα σημαντική, επειδή η Διαθεσιμότητα αποτελεί τη συνιστώσα που επηρεάζει περισσότερο τη μεταβολή της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού μετά την εφαρμογή του PLEX. Επομένως, η καταγραφή και η σωστή κατηγοριοποίηση των στάσεων αποτελούν βασική προϋπόθεση για την κατανόηση των αποτελεσμάτων και τη διατύπωση στοχευμένων προτάσεων βελτίωσης.

2.4.4 Ποσοστό απορρίψεων και απόδοση πρώτης διέλευσης

Οι ποιοτικές αποκλίσεις, οι οποίες εκφράζονται μέσα από την παραγωγή ελαττωματικών ή απορριπτόμενων τεμαχίων, αποτελούν σημαντική πηγή απωλειών για μια παραγωγική γραμμή. Η απώλεια αυτή δεν περιορίζεται μόνο στο κόστος των υλικών που απορρίπτονται, αλλά επεκτείνεται στον χρόνο, την εργασία και τους πόρους που χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή τεμαχίων τα οποία τελικά δεν μπορούν να αξιοποιηθούν ως αποδεκτή παραγωγή.

Για τον λόγο αυτό, η συστηματική παρακολούθηση των ποιοτικών απωλειών είναι απαραίτητη για την αξιολόγηση της συνολικής παραγωγικής απόδοσης. Στο πλαίσιο της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού, οι ποιοτικές απώλειες επηρεάζουν τη συνιστώσα της Ποιότητας και, κατά συνέπεια, τη συνολική τιμή του δείκτη.

Ο βασικός δείκτης που χρησιμοποιείται για την ποσοτική αποτύπωση των απορρίψεων είναι το ποσοστό απορρίψεων. Με βάση τις ποσότητες παραγωγής που ορίστηκαν στην ενότητα 2.4.1, ο δείκτης υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Ποσοστό απορρίψεων} = \text{Απορριπτόμενα τεμάχια} / \text{Συνολικά παραχθέντα τεμάχια} \times 100$$

$$\text{Scrap Rate} = Q_{\text{scrap}} / Q_{\text{total}} \times 100$$

(2.8)

Ο δείκτης αυτός αποτυπώνει το ποσοστό της συνολικής παραγωγής που δεν πληροί τις απαιτήσεις ποιότητας. Όσο υψηλότερο είναι το ποσοστό απορρίψεων, τόσο μεγαλύτερη είναι η ποιοτική απώλεια. Συνεπώς, επηρεάζεται αρνητικά η συνιστώσα της Ποιότητας, καθώς και η συνολική παραγωγική αποτελεσματικότητα της γραμμής.

Πέρα από το ποσοστό απορρίψεων, σημαντικός δείκτης για την αξιολόγηση της εσωτερικής ποιότητας της διεργασίας είναι η απόδοση πρώτης διέλευσης (First Pass Yield – FPY). Ο δείκτης αυτός αποτυπώνει το ποσοστό των τεμαχίων που ολοκληρώνονται σωστά από την πρώτη φορά, χωρίς επανακατεργασία, διόρθωση ή απόρριψη.

Όταν υπάρχει διαθέσιμη πληροφορία για τα αποδεκτά τεμάχια πρώτης διέλευσης, ο δείκτης υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Απόδοση πρώτης διέλευσης} = \text{Αποδεκτά τεμάχια πρώτης διέλευσης} / \text{Συνολικά παραχθέντα τεμάχια} \times 100$$

$$\text{FPY} = Q_{\text{good first time}} / Q_{\text{total}} \times 100$$

(2.9)

Εναλλακτικά, όταν υπάρχουν διαθέσιμα δεδομένα για απορρίψεις και επανακατεργασίες, η απόδοση πρώτης διέλευσης μπορεί να προσεγγιστεί ως εξής:

$$\text{Απόδοση πρώτης διέλευσης} = [\text{Συνολικά παραχθέντα τεμάχια} - (\text{Απορριπτόμενα τεμάχια} + \text{Τεμάχια επανακατεργασίας})] / \text{Συνολικά παραχθέντα τεμάχια} \times 100$$

$$\text{FPY} = [Q_{\text{total}} - (Q_{\text{scrap}} + Q_{\text{rework}})] / Q_{\text{total}} \times 100$$

(2.10)

Η απόδοση πρώτης διέλευσης παρέχει βαθύτερη εικόνα για την ποιότητα της διεργασίας, διότι δεν εξετάζει μόνο τα τεμάχια που τελικά απορρίπτονται, αλλά και το κατά πόσο η

παραγωγική διαδικασία παράγει σωστά προϊόντα χωρίς πρόσθετες διορθώσεις. Με αυτόν τον τρόπο, ο δείκτης μπορεί να αναδείξει προβλήματα σταθερότητας της διεργασίας, τα οποία δεν φαίνονται πάντα μόνο από το τελικό ποσοστό απορρίψεων.

Όταν τα δεδομένα πρώτης διέλευσης δεν είναι διαθέσιμα με απόλυτη ακρίβεια, ο δείκτης πρέπει να χρησιμοποιείται με προσοχή. Στην περίπτωση αυτή, μπορεί να υπολογιστεί ή να προσεγγιστεί μόνο εφόσον υπάρχουν επαρκή και αξιόπιστα δεδομένα για απορρίψεις, επανακατεργασίες ή αποδεκτά τεμάχια πρώτης διέλευσης. Διαφορετικά, είναι προτιμότερο να αναφέρεται ως περιορισμός της ανάλυσης, ώστε να μην εξαχθούν συμπεράσματα που δεν υποστηρίζονται πλήρως από τα διαθέσιμα στοιχεία.

Στο σύγχρονο πλαίσιο της ψηφιακής παρακολούθησης της ποιότητας, η δυνατότητα υπολογισμού τέτοιων δεικτών ενισχύεται από την αυξημένη διαθεσιμότητα δεδομένων παραγωγής και ποιοτικού ελέγχου. Τα Συστήματα Εκτέλεσης Παραγωγής μπορούν να υποστηρίξουν την πιο συστηματική καταγραφή ποιοτικών αποκλίσεων, απορρίψεων και επανακατεργασιών, δημιουργώντας καλύτερη βάση για την ανάλυση της Ποιότητας και τη λήψη διορθωτικών ενεργειών (Bianchini et al., 2024; Boudjenoun et al., 2025; Stavropoulos, Papacharalampopoulos, Sabatakakis, & Mourtzis, 2021).

Στην παρούσα εργασία, οι ποιοτικοί δείκτες εξετάζονται συμπληρωματικά προς τη Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού. Η ανάλυσή τους είναι απαραίτητη, ώστε να αξιολογηθεί αν η μεταβολή της συνολικής απόδοσης της γραμμής οφείλεται σε ποιοτικές απώλειες ή κυρίως σε απώλειες χρόνου και Διαθεσιμότητας.

2.4.5 Χρόνος αλλαγής προϊόντος

Ο χρόνος αλλαγής προϊόντος αποτελεί σημαντική μεταβλητή της παραγωγικής απόδοσης, καθώς επηρεάζει άμεσα τη Διαθεσιμότητα και την ευελιξία της γραμμής. Σε παραγωγικά συστήματα όπου διαφορετικοί κωδικοί προϊόντων παράγονται στην ίδια μηχανή, η μετάβαση από το ένα προϊόν στο άλλο απαιτεί χρόνο για διακοπή της παραγωγής, καθαρισμούς, ρυθμίσεις, αλλαγές εξαρτημάτων, δοκιμές και σταθεροποίηση της παραγωγής.

Επομένως, ο χρόνος αλλαγής προϊόντος δεν αποτελεί μόνο τεχνική δραστηριότητα, αλλά συνδέεται και με την ικανότητα της γραμμής να ανταποκρίνεται αποτελεσματικά σε διαφορετικές απαιτήσεις παραγωγής. Όσο μεγαλύτερος ή συχνότερος είναι ο χρόνος αλλαγής προϊόντος, τόσο περισσότερο περιορίζεται ο διαθέσιμος παραγωγικός χρόνος και, κατά συνέπεια, επηρεάζεται η συνολική παραγωγική απόδοση.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, ο χρόνος αλλαγής προϊόντος συμβολίζεται ως **Tchangeover** και ορίζεται ως το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί από την ολοκλήρωση της παραγωγής του τελευταίου αποδεκτού τεμαχίου του προηγούμενου προϊόντος έως την παραγωγή του πρώτου σταθερά αποδεκτού τεμαχίου του νέου προϊόντος. Ο ορισμός αυτός είναι σημαντικός, καθώς περιλαμβάνει όχι μόνο τη μηχανική αλλαγή ή ρύθμιση του εξοπλισμού, αλλά και τη μεταβατική περίοδο κατά την οποία η γραμμή επανέρχεται σε σταθερή παραγωγική λειτουργία.

Ο συνολικός χρόνος αλλαγών προϊόντος σε μία περίοδο μπορεί να υπολογιστεί ως άθροισμα όλων των επιμέρους αλλαγών:

Συνολικός χρόνος αλλαγών προϊόντος = Άθροισμα χρόνων επιμέρους αλλαγών προϊόντος

$$T_{\text{changeover,total}} = \sum T_{\text{changeover},i}$$

(2.11)

Επιπλέον, όταν απαιτείται σύγκριση μεταξύ περιόδων ή βαρδιών, μπορεί να υπολογιστεί και ο μέσος χρόνος αλλαγής προϊόντος:

Μέσος χρόνος αλλαγής προϊόντος = Συνολικός χρόνος αλλαγών προϊόντος / Αριθμός αλλαγών προϊόντος

$$T_{\text{changeover,avg}} = T_{\text{changeover,total}} / N_{\text{changeovers}}$$

(2.12)

Η σαφής οριοθέτηση της έναρξης και της λήξης του χρόνου αλλαγής προϊόντος είναι απαραίτητη για τη συγκρισιμότητα των δεδομένων. Εάν σε μία βάρδια ο χρόνος αλλαγής μετράτε μόνο μέχρι την ολοκλήρωση των τεχνικών ρυθμίσεων, ενώ σε άλλη βάρδια μετράτε μέχρι την παραγωγή σταθερά αποδεκτού προϊόντος, τότε οι δείκτες δεν είναι πλήρως

συγκρίσιμοι. Για τον λόγο αυτό, ο χρόνος αλλαγής προϊόντος πρέπει να καταγράφεται με ενιαίο λειτουργικό ορισμό σε όλες τις περιόδους και βάρδιες.

Η σημασία του χρόνου αλλαγής προϊόντος συνδέεται με τη θεωρία της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού και της Ολικής Παραγωγικής Συντήρησης, καθώς οι αλλαγές προϊόντων αποτελούν μορφή απώλειας που μειώνει τον διαθέσιμο παραγωγικό χρόνο και επηρεάζει τη Διαθεσιμότητα της γραμμής (Muchiri & Pintelon, 2008; Ng Corrales et al., 2020). Παράλληλα, η μείωση του χρόνου αλλαγής προϊόντος συνδέεται με την αύξηση της ευελιξίας της γραμμής, ιδιαίτερα όταν απαιτούνται συχνές αλλαγές προϊόντων ή μικρότερες παρτίδες παραγωγής.

Η ψηφιακή καταγραφή μέσω Συστημάτων Εκτέλεσης Παραγωγής μπορεί να υποστηρίξει πιο τυποποιημένη αποτύπωση του χρόνου αλλαγής προϊόντος. Μέσω χρονικών σημάνσεων και κωδικών αιτιολόγησης, είναι δυνατόν να διαχωριστεί καλύτερα ο χρόνος τεχνικής ρύθμισης από τον χρόνο σταθεροποίησης της γραμμής. Με αυτόν τον τρόπο, η διοίκηση μπορεί να εντοπίσει με μεγαλύτερη ακρίβεια σε ποιο στάδιο της αλλαγής προϊόντος εμφανίζονται οι κυριότερες καθυστερήσεις και να σχεδιάσει πιο στοχευμένες ενέργειες βελτίωσης.

Επιπλέον, κατά την αξιολόγηση των δεδομένων δεν πρέπει να εξετάζεται μόνο η διάρκεια των αλλαγών προϊόντος, αλλά και η συχνότητά τους. Συχνές αλλαγές προϊόντων μπορεί να αυξήσουν τον συνολικό χαμένο χρόνο, ακόμη και αν κάθε επιμέρους αλλαγή δεν έχει ιδιαίτερα μεγάλη διάρκεια. Για τον λόγο αυτό, η ανάλυση του χρόνου αλλαγής προϊόντος πρέπει να συνδυάζεται με τον αριθμό αλλαγών ανά βάρδια ή ανά περίοδο, ώστε να αξιολογείται καλύτερα η επίδρασή του στη συνολική παραγωγική απόδοση.

2.4.6 Παραγωγή ανά βάρδια

Η παραγωγή ανά βάρδια αποτελεί έναν άμεσο δείκτη φυσικής παραγωγικότητας, καθώς αποτυπώνει τον αριθμό των τεμαχίων που παράγονται σε μία συγκεκριμένη εργασιακή βάρδια. Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η παραγωγή ανά βάρδια χρησιμοποιείται συμπληρωματικά προς τη Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού, ώστε να αξιολογηθεί

όχι μόνο η ποσοστιαία απόδοση της γραμμής, αλλά και το πραγματικό παραγωγικό αποτέλεσμα σε επίπεδο βάρδιας.

Η παραγωγή ανά βάρδια μπορεί να αναφέρεται είτε στα συνολικά παραχθέντα τεμάχια είτε στα αποδεκτά τεμάχια. Τα συνολικά παραχθέντα τεμάχια δείχνουν τη συνολική παραγωγική δραστηριότητα της γραμμής, ενώ τα αποδεκτά τεμάχια αποτυπώνουν το τελικό αξιοποιήσιμο αποτέλεσμα της παραγωγικής διαδικασίας. Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα εργασία δίνεται ιδιαίτερη έμφαση στα αποδεκτά τεμάχια ανά βάρδια, καθώς συνδέονται άμεσα με την πραγματική παραγωγική απόδοση της γραμμής.

Η παραγωγή ανά βάρδια μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

Παραγωγή ανά βάρδια = Συνολικά παραχθέντα τεμάχια στη βάρδια

$$\text{Output per shift} = Q_{\text{total,shift}}$$

(2.13)

Αντίστοιχα, η αποδεκτή παραγωγή ανά βάρδια υπολογίζεται ως εξής:

Αποδεκτή παραγωγή ανά βάρδια = Αποδεκτά τεμάχια στη βάρδια

$$\text{Good output per shift} = Q_{\text{good,shift}}$$

(2.14)

Όταν μία βάρδια περιλαμβάνει περισσότερες από μία παραγωγικές εγγραφές, όπως μπορεί να συμβεί σε ψηφιακές εξαγωγές δεδομένων από Σύστημα Εκτέλεσης Παραγωγής, η συνολική παραγωγή της βάρδιας πρέπει να προκύπτει από την άθροιση των επιμέρους εγγραφών της ίδιας ημερομηνίας, βάρδιας και μηχανής:

Συνολική παραγωγή βάρδιας = Άθροισμα επιμέρους παραγωγικών εγγραφών της ίδιας βάρδιας

$$Q_{\text{total,shift}} = \sum Q_{\text{total},i}$$

(2.15)

Αντίστοιχα, για την αποδεκτή παραγωγή:

Αποδεκτή παραγωγή βάρδιας = Άθροισμα αποδεκτών τεμαχίων των επιμέρους εγγραφών της ίδιας βάρδιας

$$Q_{\text{good,shift}} = \sum Q_{\text{good},i}$$

(2.16)

Η ερμηνεία της παραγωγής ανά βάρδια δεν πρέπει να γίνεται απομονωμένα. Ένας χαμηλότερος αριθμός παραχθέντων ή αποδεκτών τεμαχίων δεν σημαίνει απαραίτητα χαμηλότερη απόδοση της ομάδας ή της γραμμής. Μπορεί να οφείλεται σε μικρότερο διαθέσιμο παραγωγικό χρόνο, αυξημένους χρόνους στάσης, μεγαλύτερους χρόνους αλλαγής προϊόντος, αναμονές υλικών ή άλλες οργανωτικές καθυστερήσεις.

Για τον λόγο αυτό, η παραγωγή ανά βάρδια πρέπει να εξετάζεται σε συνδυασμό με τον προγραμματισμένο χρόνο παραγωγής, τον χρόνο λειτουργίας, τον συνολικό χρόνο στάσεων και τον χρόνο αλλαγής προϊόντος. Η σύνδεση της παραγόμενης ποσότητας με τις αντίστοιχες χρονικές μεταβλητές επιτρέπει ακριβέστερη σύγκριση μεταξύ βαρδιών και περιόδων. Με αυτόν τον τρόπο, οι διαφορές στην παραγωγή δεν αποδίδονται αποκλειστικά στον ανθρώπινο παράγοντα ή στη λειτουργική απόδοση της βάρδιας, αλλά εξετάζονται σε σχέση με τις πραγματικές συνθήκες λειτουργίας της γραμμής.

Η ψηφιακή καταγραφή μέσω Συστημάτων Εκτέλεσης Παραγωγής μπορεί να ενισχύσει αυτή τη δυνατότητα, καθώς επιτρέπει τη συσχέτιση των παραγόμενων ποσοτήτων με τους αντίστοιχους χρόνους λειτουργίας, στάσης και αλλαγής προϊόντος. Ωστόσο, όταν τα δεδομένα εξάγονται σε επίπεδο παραγωγικής εγγραφής και όχι απευθείας σε επίπεδο βάρδιας, απαιτείται κατάλληλη ομαδοποίηση πριν από την ανάλυση. Η διαδικασία αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική στην παρούσα εργασία, επειδή η βασική μονάδα σύγκρισης είναι η εργασιακή βάρδια.

Συνεπώς, η παραγωγή ανά βάρδια λειτουργεί ως πρακτικός και κατανοητός δείκτης παραγωγικού αποτελέσματος. Σε συνδυασμό με τη Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού και τις επιμέρους συνιστώσες της, βοηθά στην καλύτερη ερμηνεία της μεταβολής της παραγωγικής απόδοσης πριν και μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής.

2.4.7 Βαθμός χρήσης γραμμής και συνολική αποδοτικότητα

Ο βαθμός χρήσης γραμμής (Line Utilization – LU) χρησιμοποιείται συμπληρωματικά στην παρούσα εργασία, όταν είναι απαραίτητο να αποτυπωθεί το ποσοστό του διαθέσιμου χρόνου που αξιοποιείται πραγματικά για παραγωγική λειτουργία. Σε αντίθεση με τη Συνολική

Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού, η οποία εστιάζει στην αποτελεσματικότητα του εξοπλισμού κατά τον προγραμματισμένο χρόνο παραγωγής, ο βαθμός χρήσης γραμμής βοηθά στην κατανόηση του βαθμού αξιοποίησης του συνολικού διαθέσιμου χρονικού πλαισίου.

Ο δείκτης μπορεί να εκφραστεί ως εξής:

$$\text{Βαθμός χρήσης γραμμής} = \text{Χρόνος λειτουργίας} / \text{Θεωρητικά διαθέσιμος χρόνος} \times 100$$
$$\text{Line Utilization} = \text{Trun} / \text{Tavailable} \times 100$$

(2.17)

Ο ακριβής ορισμός του θεωρητικά διαθέσιμου χρόνου εξαρτάται από το πρόγραμμα λειτουργίας και τον τρόπο με τον οποίο η επιχείρηση ορίζει τον διαθέσιμο χρόνο της γραμμής. Για τον λόγο αυτό, ο βαθμός χρήσης γραμμής χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία ως βοηθητικό μέτρο ερμηνείας και όχι ως υποκατάστατο της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού.

Σε ορισμένα συστήματα αναφοράς, ο βαθμός χρήσης γραμμής μπορεί να συνδέεται με ευρύτερους δείκτες συνολικής αποδοτικότητας. Ωστόσο, στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, η κύρια έμφαση δίνεται στη Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού και στις επιμέρους συνιστώσες της, δηλαδή τη Διαθεσιμότητα, την Απόδοση και την Ποιότητα. Ο βαθμός χρήσης γραμμής αξιοποιείται μόνο συμπληρωματικά, όπου απαιτείται καλύτερη ερμηνεία της χρήσης του διαθέσιμου χρόνου.

Προκειμένου να συνοψιστεί η μεθοδολογική προσέγγιση του κεφαλαίου και να προετοιμαστεί η πρακτική εφαρμογή που ακολουθεί, ο Πίνακας 4 παρουσιάζει τους βασικούς δείκτες που χρησιμοποιούνται στην εργασία, τα ελάχιστα απαιτούμενα δεδομένα για τον υπολογισμό τους και τις αντίστοιχες πηγές άντλησης δεδομένων για την περίοδο πριν και μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής.

Πίνακας 4. Απαιτούμενα δεδομένα και πηγές άντλησης για τους βασικούς δείκτες απόδοσης

Κρίσιμος / Βασικός Δείκτης Απόδοσης	Ελάχιστα απαιτούμενα δεδομένα	Περίοδος πριν από την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής	Περίοδος μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής
Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού	Προγραμματισμένος χρόνος παραγωγής, χρόνος στάσεων, χρόνος λειτουργίας, ονομαστικός ρυθμός παραγωγής, συνολικά παραχθέντα τεμάχια, αποδεκτά και απορριπτόμενα τεμάχια	Έντυπες φόρμες βάρδιας, ημερολόγια παραγωγής και χειρόγραφες ή ημι- χειροκίνητες καταγραφές	Ψηφιακή καταγραφή συμβάντων, κωδικοί αιτιολόγησης, ηλεκτρονικοί μετρητές παραγωγής και ποιοτικές εγγραφές
Χρόνοι στάσης	Διάρκεια στάσης, αιτιολογία και κατηγορία στάσης	Χειρόγραφη καταγραφή ή εκτίμηση των στάσεων από τον χειριστή	Ψηφιακές χρονικές σημάνσεις και επιλογή κωδικών αιτιολόγησης
Τεχνικές βλάβες	Χρόνος στάσης που αποδίδεται σε μηχανική, ηλεκτρολογική ή άλλη τεχνική αστοχία	Φόρμες βάρδιας και διαθέσιμα δελτία συντήρησης	Ψηφιακοί κωδικοί βλαβών και σύνδεση με ηλεκτρονικές εγγραφές συντήρησης, όπου υπάρχουν

Κρίσιμος / Βασικός Δείκτης Απόδοσης	Ελάχιστα απαιτούμενα δεδομένα	Περίοδος πριν από την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής	Περίοδος μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής
Ποσοστό απορρίψεων	Πλήθος απορριπτόμενων ή ελαττωματικών τεμαχίων και συνολικά παραχθέντα τεμάχια	Χειρόγραφα δελτία ποιοτικού ελέγχου και φόρμες παραγωγής	Ψηφιακές εγγραφές απορρίψεων και ποιοτικών αποκλίσεων
Απόδοση πρώτης διέλευσης	Αποδεκτά τεμάχια πρώτης διέλευσης ή διαθέσιμα στοιχεία απορρίψεων και επανακατεργασίας	Χειρόγραφες φόρμες ποιοτικού ελέγχου, όπου υπήρχε διαθέσιμη πληροφορία	Ψηφιακές εγγραφές ποιοτικού ελέγχου και διαθέσιμα πεδία πρώτης διέλευσης ή επανακατεργασίας
Χρόνος αλλαγής προϊόντος	Χρονικό διάστημα από το τελευταίο αποδεκτό τεμάχιο του προηγούμενου προϊόντος έως το πρώτο σταθερά αποδεκτό τεμάχιο του νέου προϊόντος	Χειρόγραφη εκτίμηση ή αναγραφή του χρόνου αλλαγής από τον χειριστή	Ψηφιακές χρονικές σημάνσεις και αλλαγές κατάστασης της μηχανής

Κρίσιμος / Βασικός Δείκτης Απόδοσης	Ελάχιστα απαιτούμενα δεδομένα	Περίοδος πριν από την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής	Περίοδος μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής
Παραγωγή ανά βάρδια	Συνολικά παραχθέντα και αποδεκτά τεμάχια ανά βάρδια	Χειρόγραφες αναφορές παραγωγής και ανάγνωση μετρητών μηχανής	Ψηφιακές αναφορές βάρδιας και ηλεκτρονικοί μετρητές παραγωγής
Βαθμός χρήσης γραμμής	Χρόνος λειτουργίας και θεωρητικά διαθέσιμος χρόνος γραμμής	Συνδυασμός προγράμματος παραγωγής και χειρόγραφων φορμών βάρδιας	Συσχέτιση ψηφιακών χρονικών καταστάσεων με το πρόγραμμα παραγωγής

Ο Πίνακας 4 δείχνει ότι η σύγκριση των δεικτών δεν εξαρτάται μόνο από τους μαθηματικούς τύπους υπολογισμού, αλλά και από την ποιότητα, την πληρότητα και την τυποποίηση των δεδομένων που τους τροφοδοτούν. Στην περίοδο πριν από την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής, τα δεδομένα βασίζονται κυρίως σε χειρόγραφες ή ημι-χειροκίνητες πρακτικές καταγραφής. Αντίθετα, στην περίοδο μετά την εφαρμογή του συστήματος, η καταγραφή γίνεται ψηφιακά, με μεγαλύτερη δυνατότητα τυποποίησης, ιχνηλασιμότητας και συσχέτισης των συμβάντων με συγκεκριμένες αιτίες.

Η ανάγκη για συστηματική επιλογή, υπολογισμό και παρακολούθηση των παραπάνω δεικτών συνδέεται άμεσα με τη δυνατότητα των Συστημάτων Εκτέλεσης Παραγωγής να υποστηρίζουν τη διοίκηση παραγωγής με πιο αξιόπιστα και αξιοποιήσιμα δεδομένα. Με αυτόν τον τρόπο, τα δεδομένα της παραγωγής μπορούν να μετατραπούν από αποσπασματικές καταγραφές σε οργανωμένη πληροφορία, η οποία υποστηρίζει την παρακολούθηση, την κατανόηση και τη συνεχή βελτίωση της παραγωγικής απόδοσης.

2.5 Ψηφιακή συλλογή δεδομένων και ζητήματα συγκρισιμότητας πριν και μετά την εφαρμογή Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής

Στο σύγχρονο βιομηχανικό περιβάλλον, τα Συστήματα Εκτέλεσης Παραγωγής διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη συλλογή, οργάνωση και αξιοποίηση των δεδομένων παραγωγής. Τα συστήματα αυτά λειτουργούν ως ενδιάμεσο επίπεδο μεταξύ του προγραμματισμού παραγωγής και της πραγματικής λειτουργίας της γραμμής, υποστηρίζοντας την καταγραφή χρόνων, συμβάντων, ποσοτήτων, ποιοτικών αποκλίσεων και αιτιών στάσης. Με τον τρόπο αυτό, η παραγωγική λειτουργία μπορεί να αποτυπώνεται με πιο συστηματικό, τυποποιημένο και αναλυτικό τρόπο (Costa, Almeida, & Reis, 2024; Kletti, 2007; Shojaeinasab et al., 2022).

Η ψηφιακή συλλογή δεδομένων συνδέεται με το ευρύτερο πλαίσιο της Τέταρτης Βιομηχανικής Επανάστασης (Industry 4.0), όπου η χρήση διασυνδεδεμένων συστημάτων, αισθητήρων και ψηφιακών τεχνολογιών επιτρέπει την καλύτερη παρακολούθηση της

παραγωγής και την αξιοποίηση μεγαλύτερου όγκου δεδομένων. Στο πλαίσιο αυτό, τα δεδομένα παραγωγής δεν αποτελούν απλώς αρχεία καταγραφής, αλλά μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την ανάλυση διεργασιών, την παρακολούθηση της ποιότητας, την αναγνώριση απωλειών και τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων (Bianchini et al., 2024; Boudjenoun et al., 2025; Mourtzis et al., 2016).

Σε σύγκριση με τις χειρόγραφες ή ημι-χειροκίνητες πρακτικές καταγραφής, η ψηφιακή συλλογή δεδομένων μπορεί να ενισχύσει την πληρότητα, την ακρίβεια και την ιχνηλασιμότητα της πληροφορίας. Μικρές στάσεις, καθυστερήσεις, αλλαγές κατάστασης μηχανής και ποιοτικές αποκλίσεις μπορούν να αποτυπωθούν με μεγαλύτερη λεπτομέρεια, εφόσον το σύστημα χρησιμοποιείται σωστά και οι καταχωρίσεις πραγματοποιούνται με ενιαίο τρόπο. Η βιβλιογραφία αναδεικνύει ότι η αυτοματοποιημένη ή ψηφιακή συλλογή δεδομένων μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα των στοιχείων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό δεικτών όπως η Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού (Jericho et al., 2024; Peixoto, Oliveira, Oliveira, & Ribeiro, 2025; Wang & Pan, 2011).

Ωστόσο, η ύπαρξη ενός ψηφιακού συστήματος δεν εξασφαλίζει από μόνη της την πλήρη αξιοπιστία των δεδομένων. Η ποιότητα των αποτελεσμάτων εξακολουθεί να εξαρτάται από τη σαφήνεια των ορισμών, τη σωστή ταξινόμηση των απωλειών, την πληρότητα των καταχωρίσεων και την ορθή χρήση του συστήματος από τους χρήστες. Εάν οι κωδικοί αιτιολόγησης δεν χρησιμοποιούνται με ενιαίο τρόπο ή εάν οι καταχωρίσεις γίνονται καθυστερημένα, τότε οι δείκτες μπορεί να επηρεαστούν και να μην αποτυπώνουν με απόλυτη ακρίβεια τη χρονική κατανομή των γεγονότων. Για τον λόγο αυτό, η ψηφιακή καταγραφή πρέπει να συνοδεύεται από εκπαίδευση, τυποποιημένες διαδικασίες και συστηματικό έλεγχο ποιότητας των δεδομένων (Hedman et al., 2016; Innecco et al., 2022).

Η παράμετρος αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική στη συγκριτική αξιολόγηση της περιόδου πριν και μετά την εφαρμογή ενός Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής. Ένα μέρος της μεταβολής των δεικτών μπορεί να μην οφείλεται αποκλειστικά σε πραγματική λειτουργική βελτίωση ή επιδείνωση, αλλά και στη διαφοροποίηση του τρόπου καταγραφής. Για παράδειγμα, μικρές στάσεις ή σύντομες καθυστερήσεις που δεν καταγράφονταν συστηματικά στη χειρόγραφη περίοδο μπορεί να αποτυπώνονται πλέον με μεγαλύτερη ακρίβεια στο ψηφιακό

σύστημα. Ως αποτέλεσμα, δείκτες όπως η Διαθεσιμότητα μπορεί να εμφανίζονται χαμηλότεροι μετά την εφαρμογή του συστήματος, χωρίς αυτό να σημαίνει απαραίτητα ότι η πραγματική λειτουργία της γραμμής έχει επιδεινωθεί.

Παράλληλα, κατά την αρχική περίοδο εφαρμογής ενός νέου συστήματος, η προσαρμογή των χρηστών στις νέες διαδικασίες μπορεί να επηρεάσει προσωρινά την πληρότητα και τη χρονική ακρίβεια των δεδομένων. Η καθυστερημένη επιβεβαίωση παραγωγής, η μη έγκαιρη σάρωση υλικών, η λανθασμένη επιλογή αιτίας στάσης ή η ετεροχρονισμένη καταχώριση παραγωγικών στοιχείων μπορούν να δημιουργήσουν αποκλίσεις μεταξύ της πραγματικής παραγωγικής δραστηριότητας και της χρονικής απεικόνισής της στο σύστημα. Επομένως, η περίοδος προσαρμογής πρέπει να λαμβάνεται υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Για τον λόγο αυτό, η σύγκριση των δύο περιόδων πρέπει να γίνεται με προσοχή. Η ανάλυση δεν πρέπει να περιορίζεται μόνο στη μεταβολή των αριθμητικών τιμών των δεικτών, αλλά να λαμβάνει υπόψη και την ποιότητα, την πληρότητα και την τυποποίηση των δεδομένων κάθε περιόδου. Στην παρούσα εργασία, η διάσταση αυτή είναι κρίσιμη, καθώς η μετάβαση από χειρόγραφη ή χειροκίνητη καταγραφή σε ψηφιακή καταγραφή μέσω PLEX επηρεάζει όχι μόνο τον τρόπο υπολογισμού των δεικτών, αλλά και τον βαθμό ορατότητας των πραγματικών απωλειών της παραγωγικής διαδικασίας.

Συνεπώς, η ψηφιακή συλλογή δεδομένων δεν αξιολογείται μόνο ως τεχνολογική αλλαγή, αλλά και ως αλλαγή στον τρόπο με τον οποίο η παραγωγική λειτουργία γίνεται ορατή, μετρήσιμη και ερμηνεύσιμη. Η αξία του PLEX στην παρούσα μελέτη δεν περιορίζεται στην καταγραφή των αποτελεσμάτων, αλλά συνδέεται με τη δυνατότητα καλύτερης ανάλυσης των χρόνων στάσης, των απωλειών, της παραγωγής και της ποιότητας. Με αυτόν τον τρόπο, το σύστημα μπορεί να αποτελέσει βάση για πιο αξιόπιστη παρακολούθηση και για στοχευμένες ενέργειες συνεχούς βελτίωσης.

2.6 Από τους δείκτες στη βελτίωση: ανάλυση απωλειών και ιεράρχηση ενεργειών

Οι Κρίσιμοι / Βασικοί Δείκτες Απόδοσης αποκτούν ουσιαστική αξία όταν δεν περιορίζονται στην απλή αναφορά αποτελεσμάτων, αλλά αξιοποιούνται για την κατανόηση των απωλειών και τη λήψη διορθωτικών ή βελτιωτικών ενεργειών. Στη διοίκηση παραγωγής, η μέτρηση από μόνη της δεν αρκεί. Απαιτείται η ερμηνεία των δεδομένων, η αναγνώριση των βασικών αιτιών και η σύνδεση των ευρημάτων με συγκεκριμένες αποφάσεις.

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, η αξιοποίηση των δεικτών οργανώνεται γύρω από τέσσερις βασικούς άξονες. Ο πρώτος αφορά τη συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ της περιόδου πριν και μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής. Μέσα από τη σύγκριση αυτή εξετάζεται η μεταβολή της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού και των επιμέρους συνιστωσών της, δηλαδή της Διαθεσιμότητας, της Απόδοσης και της Ποιότητας. Η σύγκριση πραγματοποιείται σε επίπεδο βάρδιας και, όπου απαιτείται, συμπληρωματικά σε επίπεδο εβδομάδας, ώστε να αποτυπωθεί τόσο η συνολική εικόνα όσο και οι επιμέρους μεταβολές της παραγωγικής λειτουργίας.

Ο δεύτερος άξονας αφορά την ανάλυση και ιεράρχηση των απωλειών. Οι καταγεγραμμένες απώλειες, όπως οι χρόνοι στάσης, οι τεχνικές βλάβες, οι χρόνοι αλλαγής προϊόντος, οι αναμονές και οι απορρίψεις, ομαδοποιούνται με βάση την αιτία τους. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αναγνώριση των σημαντικότερων πηγών απώλειας και βοηθά τη διοίκηση να εστιάσει στα προβλήματα που έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στην παραγωγική απόδοση. Η Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού είναι ιδιαίτερα χρήσιμη σε αυτό το πλαίσιο, καθώς επιτρέπει τη σύνδεση των απωλειών με τη Διαθεσιμότητα, την Απόδοση και την Ποιότητα (Muchiri & Pintelon, 2008; Ng Corrales et al., 2020).

Ο τρίτος άξονας αφορά τη συσχέτιση των μεταβολών μεταξύ διαφορετικών δεικτών. Για παράδειγμα, μια μείωση της παραγωγής ανά βάρδια δεν πρέπει να εξετάζεται απομονωμένα, αλλά σε συνδυασμό με τους χρόνους στάσης, τον χρόνο αλλαγής προϊόντος, την Απόδοση και την Ποιότητα. Αντίστοιχα, μια μεταβολή στο ποσοστό απορρίψεων πρέπει να ερμηνεύεται σε σχέση με την απόδοση πρώτης διέλευσης και με τις διαθέσιμες ποιοτικές εγγραφές. Με αυτόν

τον τρόπο, η ανάλυση αποφεύγει απλουστευτικές ερμηνείες και επιτρέπει πιο ολοκληρωμένη κατανόηση της παραγωγικής λειτουργίας.

Ο τέταρτος άξονας αφορά την τεκμηρίωση και αξιολόγηση των διορθωτικών ενεργειών. Κάθε ενέργεια βελτίωσης πρέπει να συνδέεται με συγκεκριμένο πρόβλημα, μετρήσιμο στόχο και επανέλεγχο του αποτελέσματος. Για παράδειγμα, εάν ένας σημαντικός χρόνος στάσης οφείλεται σε επαναλαμβανόμενη τεχνική βλάβη, η διορθωτική ενέργεια μπορεί να αφορά τη συντήρηση ή την τεχνική βελτίωση του εξοπλισμού. Αντίστοιχα, εάν οι απώλειες σχετίζονται με αναμονές υλικών ή καθυστερήσεις αλλαγών προϊόντος, οι ενέργειες μπορεί να αφορούν τον προγραμματισμό παραγωγής, την τροφοδοσία της γραμμής ή την οργάνωση της βάρδιας.

Η ψηφιακή καταγραφή μέσω Συστημάτων Εκτέλεσης Παραγωγής μπορεί να ενισχύσει αυτή τη διαδικασία, καθώς παρέχει πιο οργανωμένα και αξιοποιήσιμα δεδομένα για την αναγνώριση, την ταξινόμηση και την παρακολούθηση των απωλειών. Όταν οι χρόνοι στάσης, οι αιτίες, οι ποσότητες παραγωγής και οι ποιοτικές αποκλίσεις καταγράφονται με πιο τυποποιημένο τρόπο, η διοίκηση μπορεί να εντοπίζει πιο γρήγορα τις βασικές αιτίες και να αξιολογεί πιο αξιόπιστα την αποτελεσματικότητα των παρεμβάσεων. Παράλληλα, η σωστή χρήση του συστήματος και η ποιότητα των δεδομένων παραμένουν απαραίτητες προϋποθέσεις για την εξαγωγή αξιόπιστων συμπερασμάτων (Hedman et al., 2016; Wang & Pan, 2011).

Συνολικά, η μετάβαση από τους δείκτες στη βελτίωση απαιτεί συστηματική ανάλυση, σωστή ερμηνεία και σύνδεση των αποτελεσμάτων με πρακτικές ενέργειες. Στην παρούσα εργασία, το PLEX εξετάζεται ως μέσο που μπορεί να υποστηρίξει αυτή τη διαδικασία, παρέχοντας καλύτερη ορατότητα στις απώλειες της παραγωγικής γραμμής και δημιουργώντας πιο αξιόπιστη βάση για τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων. Με αυτόν τον τρόπο, οι δείκτες δεν λειτουργούν μόνο ως εργαλεία παρακολούθησης, αλλά και ως μηχανισμός συνεχούς βελτίωσης της παραγωγικής απόδοσης.

Κεφάλαιο 3. Μεθοδολογία – Μελέτη περίπτωσης και διαχείριση δεδομένων

3.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται η μεθοδολογία της έρευνας και περιγράφεται η μελέτη περίπτωσης που πραγματοποιήθηκε σε αυτοματοποιημένη μηχανή συναρμολόγησης ξυριστικής μηχανής σε βιομηχανία παραγωγής ξυριστικών προϊόντων. Κεντρικός στόχος της ανάλυσης είναι η συγκριτική αξιολόγηση των δεδομένων και δεικτών παραγωγικής απόδοσης πριν και μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής PLEX.

Η αξιολόγηση βασίζεται σε προκαθορισμένο σύνολο Κρίσιμων / Βασικών Δεικτών Απόδοσης, οι οποίοι ακολουθούν τη λογική και τη σειρά παρουσίασης του θεωρητικού πλαισίου του Κεφαλαίου 2. Οι δείκτες που εξετάζονται είναι η Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού, οι χρόνοι στάσης, οι τεχνικές βλάβες, το ποσοστό απορρίψεων, η απόδοση πρώτης διέλευσης, ο χρόνος αλλαγής προϊόντος, η παραγωγή ανά βάρδια και ο βαθμός χρήσης γραμμής.

Η μεθοδολογική προσέγγιση στηρίζεται στη μετατροπή των πρωτογενών δεδομένων παραγωγής σε τυποποιημένες μετρήσεις και δείκτες. Για να είναι δυνατή η σύγκριση των δύο περιόδων, υιοθετούνται ενιαίοι ορισμοί, κοινή χρονική βάση και συγκεκριμένοι κανόνες ελέγχου της ποιότητας των δεδομένων. Με αυτόν τον τρόπο, η ανάλυση δεν περιορίζεται στην απλή σύγκριση αριθμητικών τιμών, αλλά λαμβάνει υπόψη και τον τρόπο συλλογής, πληρότητας και αξιοπιστίας των δεδομένων.

Η προσέγγιση αυτή συνδέεται με τη βιβλιογραφία για τα Συστήματα Εκτέλεσης Παραγωγής και την αξιοποίηση ψηφιακών δεδομένων στη βιομηχανική παραγωγή, όπου η συστηματική συλλογή και ανάλυση δεδομένων υποστηρίζει την καλύτερη παρακολούθηση της παραγωγικής λειτουργίας και τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων (Bianchini et al., 2024; Wang & Pan, 2011). Παράλληλα, η ποιότητα, η πληρότητα και η σωστή ταξινόμηση των δεδομένων αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους για την αξιοπιστία των δεικτών και την ορθή ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Hedman et al., 2016; Jericho et al., 2024).

3.2 Περιγραφή της μελέτης περίπτωσης και λειτουργική οργάνωση

3.2.1 Περιγραφή της μηχανής συναρμολόγησης

Η μελέτη περίπτωσης επικεντρώνεται σε αυτοματοποιημένη μηχανή συναρμολόγησης ξυριστικής μηχανής, η οποία λειτουργεί σε βιομηχανία παραγωγής ξυριστικών προϊόντων. Ο ρόλος της συγκεκριμένης μηχανής στη γραμμή παραγωγής είναι η συναρμολόγηση επιμέρους εξαρτημάτων στο τελικό προϊόν (ξυριστική μηχανή), μετατρέποντας εισερχόμενα εξαρτήματα και υλικά σε συναρμολογημένη παραγωγική μονάδα. Για λόγους εμπιστευτικότητας, δεν παρουσιάζονται τεχνικά στοιχεία που θα μπορούσαν να αποκαλύψουν λεπτομέρειες του προϊόντος, του εξοπλισμού ή της παραγωγικής διάταξης.

Η λειτουργία της μηχανής χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό αυτοματοποίησης και συνεχή παραγωγική ροή, ενώ υπεύθυνο για τον χειρισμό της είναι εξειδικευμένο προσωπικό. Κατά τη διάρκεια της παραγωγής, η απόδοση της γραμμής επηρεάζεται από παράγοντες όπως οι χρόνοι λειτουργίας, οι απρογραμματίστες στάσεις, οι τεχνικές βλάβες και οι αλλαγές προϊόντος, οι παραγόμενες ποσότητες και οι ποιοτικές αποκλίσεις. Οι παράγοντες αυτοί αποτελούν τη βάση για τον υπολογισμό των δεικτών που παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2.

Η γραμμή λειτουργεί σε καθεστώς συνεχούς παραγωγής, με βάρδιες διάρκειας 8 ωρών. Η βάρδια ορίζεται ως η βασική μονάδα ανάλυσης, καθώς σε αυτό το επίπεδο καταγράφονται και συγκρίνονται οι χρόνοι παραγωγής, οι στάσεις, οι αλλαγές προϊόντος, οι παραγόμενες ποσότητες και τα ποιοτικά δεδομένα. Συμπληρωματικά, η εβδομάδα χρησιμοποιείται ως μονάδα συγκεντρωτικής ανάλυσης, στη βάση της οποίας γίνεται η παρακολούθηση και αξιολόγηση των δεικτών από τη διοίκηση.

3.3 Σχεδιασμός έρευνας – περίοδοι, μονάδα ανάλυσης και δείγμα

Η παρούσα έρευνα ακολουθεί συγκριτικό σχεδιασμό «πριν και μετά», με στόχο την αξιολόγηση της παραγωγικής απόδοσης πριν και μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής PLEX. Η σύγκριση πραγματοποιείται μεταξύ δύο χρονικών περιόδων ίσης διάρκειας, ώστε να υπάρχει κοινή βάση αξιολόγησης.

Η πρώτη περίοδος αφορά τη λειτουργία πριν από την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής. Κατά την περίοδο αυτή, η συλλογή των στοιχείων βασιζόταν σε χειρόγραφες ή χειροκίνητες πρακτικές καταγραφής, με συγκεντρωτική αποτύπωση σε ηλεκτρονικά αρχεία. Η δεύτερη περίοδος αφορά τη λειτουργία μετά την έναρξη εφαρμογής του PLEX, οπότε η καταγραφή πραγματοποιείται ψηφιακά. Συγκεκριμένα, το σύστημα είναι συνδεδεμένο με τον Προγραμματιζόμενο Λογικό Ελεγκτή (Programmable Logic Controller – PLC) της μηχανής, ώστε να καταγράφει αυτόματα χρόνους λειτουργίας, χρόνους στάσης, ποσότητες παραγωγής και απρογραμματίστα συμβάντα. Παράλληλα, ο χρήστης έχει τη δυνατότητα να επιλέγει από προκαθορισμένη λίστα κωδικών αιτιολόγησης στάσεων, να καταχωρίζει ποιοτικές αστοχίες και να επιβεβαιώνει τις καταγραφές των ψηφιακών μετρητών τεμαχίων.

Ως βασική μονάδα ανάλυσης της παρούσας έρευνας ορίστηκε η εργασιακή βάρδια διάρκειας οκτώ ωρών της εξεταζόμενης αυτοματοποιημένης μηχανής συναρμολόγησης. Η επιλογή αυτή κρίθηκε κατάλληλη, καθώς οι βασικοί δείκτες παραγωγικής απόδοσης που εξετάζονται, όπως η Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού, η Διαθεσιμότητα, η Απόδοση, η Ποιότητα, οι χρόνοι στάσης και η παραγωγή ανά βάρδια, παρακολουθούνται επιχειρησιακά σε επίπεδο βάρδιας. Συμπληρωματικά, χρησιμοποιείται και η ημερολογιακή εβδομάδα ως επίπεδο συγκεντρωτικής ανάλυσης, ώστε να είναι δυνατή η παρακολούθηση τάσεων και η σύγκριση της απόδοσης μεταξύ των δύο περιόδων.

Κατά την περίοδο πριν από την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής, κάθε εγγραφή αντιστοιχούσε σε μία συγκεκριμένη ημερομηνία, μία εργασιακή βάρδια και τη συγκεκριμένη μηχανή. Αντίθετα, κατά την περίοδο μετά την εφαρμογή του PLEX, η αρχική εξαγωγή των δεδομένων είχε πιο σύνθετη μορφή, καθώς μία βάρδια μπορούσε να εμφανίζεται σε περισσότερες από μία γραμμές. Αυτό οφειλόταν κυρίως στην παραγωγή διαφορετικών κωδικών προϊόντων εντός της ίδιας βάρδιας ή σε επιμέρους ψηφιακές δηλώσεις παραγωγής. Για τον λόγο αυτό, οι εγγραφές της περιόδου μετά την εφαρμογή του PLEX ομαδοποιήθηκαν με βάση την ημερομηνία, τη βάρδια και τη μηχανή, ώστε η τελική ανάλυση να πραγματοποιηθεί σε ενιαίο επίπεδο εργασιακής βάρδιας και όχι σε επίπεδο μεμονωμένης παραγωγικής εγγραφής.

Θεωρητικά, για λειτουργία 24 ωρών την ημέρα και 7 ημερών την εβδομάδα, με βάρδιες διάρκειας 8 ωρών, προκύπτουν 21 βάρδιες ανά εβδομάδα. Επομένως, για χρονική περίοδο 6 εβδομάδων, το θεωρητικό μέγιστο πλήθος βαρδιών ανέρχεται σε 126 βάρδιες.

Στο πραγματικό διαθέσιμο σύνολο δεδομένων, οι αξιοποιήσιμες εγγραφές της περιόδου πριν από την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής ανέρχονται σε 108 βάρδιες. Η απόκλιση από το θεωρητικό μέγιστο των 126 βαρδιών οφείλεται στη διαθεσιμότητα και πληρότητα των αξιοποιήσιμων εγγραφών, καθώς ορισμένες βάρδιες δεν ήταν διαθέσιμες ή δεν πληρούσαν τα ελάχιστα κριτήρια ποιότητας δεδομένων για να χρησιμοποιηθούν στην ανάλυση. Για την περίοδο μετά την εφαρμογή του PLEX, η αρχική εξαγωγή περιλάμβανε περισσότερες παραγωγικές εγγραφές από τον τελικό αριθμό βαρδιών, καθώς ορισμένες βάρδιες εμφανίζονταν σε περισσότερες από μία γραμμές. Μετά την ομαδοποίηση και τον έλεγχο των δεδομένων, οι τελικές παρατηρήσεις χρησιμοποιήθηκαν σε επίπεδο βάρδιας, ώστε να διατηρηθεί κοινή βάση σύγκρισης μεταξύ των δύο περιόδων.

Οι κανόνες ελέγχου ποιότητας των δεδομένων, οι οποίοι αφορούν την πληρότητα των πεδίων, τη συνέπεια των ορισμών, την ύπαρξη πολλαπλών εγγραφών ανά βάρδια και τη δυνατότητα αντιστοίχισης των μεταβλητών μεταξύ των δύο περιόδων, παρουσιάζονται αναλυτικά στην ενότητα 3.7.

Πίνακας 5. Μεταδεδομένα δείγματος και δομή δεδομένων

Παράμετρος	Περιγραφή
Τύπος μελέτης	Μελέτη περίπτωσης με συγκριτικό σχεδιασμό «πριν και μετά»
Λειτουργία γραμμής	Συνεχής λειτουργία 24 ωρών την ημέρα και 7 ημερών την εβδομάδα
Διάρκεια βάρδιας	8 ώρες

Θεωρητικές βάρδιες ανά εβδομάδα	21 βάρδιες
Θεωρητικό πλήθος βαρδιών σε 6 εβδομάδες	126 βάρδιες
Αξιοποιήσιμες βάρδιες πριν από την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής	108 βάρδιες
Δομή δεδομένων πριν από το PLEX	Μία εγγραφή ανά ημερομηνία, βάρδια και μηχανή
Δομή δεδομένων μετά την εφαρμογή του PLEX	Πολλαπλές παραγωγικές εγγραφές σε ορισμένες βάρδιες, λόγω διαφορετικών κωδικών προϊόντων ή επιμέρους ψηφιακών δηλώσεων
Κύριο επίπεδο ανάλυσης	Εργασιακή βάρδια
Συμπληρωματική χρονική ομαδοποίηση	Ημερολογιακή εβδομάδα
Κρίσιμοι / Βασικοί Δείκτες Απόδοσης	Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού, Διαθεσιμότητα, Απόδοση, Ποιότητα, χρόνοι στάσης, τεχνικές βλάβες, ποσοστό απορρίψεων, απόδοση πρώτης διέλευσης, χρόνος αλλαγής προϊόντος, παραγωγή ανά βάρδια, βαθμός χρήσης γραμμής
Στόχος σύγκρισης	Μεταβολή των Κρίσιμων / Βασικών Δεικτών Απόδοσης και των απωλειών μεταξύ της περιόδου πριν και μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής

3.4 Πηγές δεδομένων και διαδικασία συλλογής

Η συλλογή των δεδομένων πραγματοποιήθηκε από δύο διαφορετικές πηγές, οι οποίες αντιστοιχούν στις δύο εξεταζόμενες περιόδους της μελέτης. Η πρώτη πηγή αφορά την περίοδο πριν από την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής, κατά την οποία η καταγραφή βασιζόταν σε χειρόγραφες ή χειροκίνητες πρακτικές. Η δεύτερη πηγή αφορά την περίοδο μετά την εφαρμογή του PLEX, κατά την οποία τα δεδομένα αντλήθηκαν από το ψηφιακό σύστημα παραγωγής.

Η διαφοροποίηση των δύο πηγών δεδομένων αποτελεί κρίσιμο σημείο της παρούσας μελέτης, καθώς η σύγκριση δεν αφορά μόνο την αριθμητική μεταβολή των δεικτών απόδοσης, αλλά και τον τρόπο με τον οποίο τα δεδομένα συλλέγονται, καταγράφονται, οργανώνονται και τελικά χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό των δεικτών. Η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι τα Συστήματα Εκτέλεσης Παραγωγής μπορούν να υποστηρίξουν τη μετάβαση από τη συλλογή μεγάλου όγκου δεδομένων στη δημιουργία χρήσιμης και αξιοποιήσιμης πληροφορίας για τη διοίκηση της παραγωγής, μέσω της ανάπτυξης και παρακολούθησης κατάλληλων KPIs (Bianchini et al., 2024).

3.4.1 Δεδομένα περιόδου πριν από την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής

Κατά την περίοδο πριν από την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής, οι πρωτογενείς καταγραφές στη γραμμή πραγματοποιούνταν μέσω χειρόγραφων ή χειροκίνητων πρακτικών από τους χειριστές και τους υπεύθυνους παραγωγής. Στη συνέχεια, τα στοιχεία συγκεντρώνονταν σε ηλεκτρονική μορφή, με σκοπό την παρακολούθηση της παραγωγικής απόδοσης και τον υπολογισμό βασικών δεικτών.

Ως βασική πηγή δεδομένων για τη συγκεκριμένη περίοδο χρησιμοποιήθηκε συγκεντρωτικό αρχείο αναφοράς ανά εργασιακή βάρδια, σε μορφή υπολογιστικού φύλλου. Το αρχείο

περιλαμβάνει 108 αξιοποιήσιμες εγγραφές βαρδιών για τη χρονική περίοδο από 9 Ιουνίου 2025 έως 20 Ιουλίου 2025, η οποία αντιστοιχεί σε χρονικό διάστημα έξι εβδομάδων. Οι εγγραφές οργανώνονται ανά ημερολογιακή εβδομάδα και κάθε εγγραφή αντιστοιχεί σε μία ημερομηνία, μία εργασιακή βάρδια και τη συγκεκριμένη μηχανή.

Σε επίπεδο χρονικών μεταβλητών, το αρχείο περιλαμβάνει τον προγραμματισμένο χρόνο παραγωγής, τον χρόνο λειτουργίας και τον χρόνο στάσεων. Σε επίπεδο ποσοτήτων παραγωγής, περιλαμβάνει τα συνολικά παραχθέντα τεμάχια, τα αποδεκτά τεμάχια και τα απορριπτόμενα ή ελαττωματικά τεμάχια. Παράλληλα, όπου υπήρχαν διαθέσιμα στοιχεία, αποτυπώνονται επιμέρους κατηγορίες απωλειών, όπως τεχνικές βλάβες, ρυθμίσεις, αλλαγές προϊόντος και οργανωτικές καθυστερήσεις.

Το αρχείο της περιόδου πριν από την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής αποτέλεσε τη βάση σύγκρισης με την ψηφιακή περίοδο. Ωστόσο, επειδή προέρχεται από χειρόγραφες ή χειροκίνητες καταγραφές, απαιτείται προσοχή στην ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Πιθανές αποκλίσεις μπορεί να σχετίζονται με ελλιπή συμπλήρωση στοιχείων, διαφορετική ερμηνεία των αιτιών στάσης μεταξύ βαρδιών ή ομαδοποίηση μικρότερων γεγονότων, τα οποία στην ψηφιακή περίοδο καταγράφονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια.

Ενδεικτικό δείγμα των δεδομένων της περιόδου πριν από την εφαρμογή του PLEX παρατίθεται στο Παράρτημα Γ.

3.4.2 Δεδομένα περιόδου μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής PLEX

Κατά την περίοδο μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής, τα δεδομένα αντλήθηκαν από το πληροφοριακό σύστημα PLEX. Η περίοδος συλλογής των δεδομένων κάλυψε το χρονικό διάστημα από 16 Φεβρουαρίου 2026 έως 29 Μαρτίου 2026, συνολικής διάρκειας έξι εβδομάδων. Το PLEX χρησιμοποιείται στην παρούσα εργασία ως το ψηφιακό σύστημα μέσω του οποίου πραγματοποιείται η καταγραφή, οργάνωση και εξαγωγή δεδομένων παραγωγής. Τα Συστήματα Εκτέλεσης Παραγωγής συνδέονται με την παρακολούθηση της παραγωγής σε επίπεδο χώρου παραγωγής και μπορούν να υποστηρίξουν τη συλλογή

δεδομένων, την επεξεργασία τους και τον υπολογισμό δεικτών απόδοσης, όπως η Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού (Bianchini et al., 2024).

Η ψηφιακή καταγραφή περιλαμβάνει στοιχεία που σχετίζονται με τις καταστάσεις λειτουργίας της μηχανής, τους χρόνους λειτουργίας, τους χρόνους στάσης, τις χρονικές σημάνσεις, τους κωδικούς αιτιολόγησης στάσεων, τις παραγόμενες ποσότητες και τις ποιοτικές εγγραφές. Με τον τρόπο αυτό, είναι δυνατή η αντιστοίχιση των παραγωγικών γεγονότων με συγκεκριμένη ημερομηνία, βάρδια, μηχανή, προϊόν και αιτία απώλειας.

Σε αντίθεση με την περίοδο πριν από την εφαρμογή του συστήματος, όπου κάθε γραμμή του αρχείου αντιστοιχούσε σε μία βάρδια, η αρχική εξαγωγή από το PLEX είχε μορφή παραγωγικών εγγραφών. Επομένως, μία εργασιακή βάρδια μπορούσε να εμφανίζεται σε περισσότερες από μία γραμμές, κυρίως όταν εντός της ίδιας βάρδιας παράγονταν διαφορετικοί κωδικοί προϊόντων ή όταν υπήρχαν επιμέρους ψηφιακές δηλώσεις παραγωγής.

Για τον λόγο αυτό, τα δεδομένα της περιόδου μετά την εφαρμογή του PLEX δεν χρησιμοποιήθηκαν απευθείας όπως εξήχθησαν από το σύστημα. Πριν από την ανάλυση, πραγματοποιήθηκε έλεγχος και ομαδοποίηση των εγγραφών με βάση την ημερομηνία, τη βάρδια και τη μηχανή, ώστε η τελική επεξεργασία να γίνει σε επίπεδο εργασιακής βάρδιας. Με τον τρόπο αυτό, διατηρήθηκε κοινή μονάδα ανάλυσης μεταξύ των δύο περιόδων.

Αναφορικά με τις ποσότητες παραγωγής, το σύστημα παρέχει δεδομένα από ηλεκτρονικούς μετρητές και ψηφιακές καταχωρίσεις που αφορούν τα συνολικά παραχθέντα τεμάχια, τα αποδεκτά τεμάχια και τα απορριπτόμενα ή ελαττωματικά τεμάχια. Όπου τα διαθέσιμα πεδία το επιτρέπουν, τα δεδομένα αξιοποιούνται επίσης για την εκτίμηση της απόδοσης πρώτης διέλευσης και για τη διάκριση μεταξύ απορρίψεων και πιθανών επανακατεργασιών.

Κατά τον έλεγχο των δεδομένων της ψηφιακής περιόδου εντοπίστηκαν περιπτώσεις στις οποίες οι τιμές της Απόδοσης ή της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού υπερέβαιναν το 100%. Οι τιμές αυτές δεν ερμηνεύτηκαν ως πραγματική λειτουργία της μηχανής πάνω από τη θεωρητική της δυναμικότητα, αλλά εξετάστηκαν ως πιθανές ασυνέπειες χρονικής αντιστοίχισης της παραγωγής. Κατά την αρχική περίοδο χρήσης του PLEX, καθυστερήσεις ή ελλείψεις στη σάρωση υλικών μπορούσαν να εμποδίσουν την ολοκλήρωση της παραγωγικής δήλωσης εντός της ίδιας βάρδιας. Ως αποτέλεσμα, μέρος της παραγωγής μπορούσε να

καταχωριστεί χρονικά στην επόμενη βάρδια, επηρεάζοντας προσωρινά τους δείκτες της αντίστοιχης εγγραφής.

Το ζήτημα αυτό συνδέεται με την ανάγκη ελέγχου της ποιότητας των δεδομένων που παράγονται από ένα MES. Όπως επισημαίνεται στη βιβλιογραφία, μετά την εφαρμογή ενός συστήματος MES είναι απαραίτητο να αξιολογείται εάν τα δεδομένα που αποκτά και υπολογίζει το σύστημα ανταποκρίνονται στις πραγματικές συνθήκες της παραγωγικής διαδικασίας (Bianchini et al., 2024). Επομένως, η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων δεν εξαρτάται μόνο από την τεχνική δυνατότητα του συστήματος να συλλέγει δεδομένα, αλλά και από την ορθή χρήση του, την πληρότητα των καταχωρίσεων και την ενιαία εφαρμογή των ορισμών.

Για την τεκμηρίωση της ψηφιακής πηγής δεδομένων, ενδεικτικές εκτυπώσεις ή στιγμιότυπα από το PLEX παρατίθενται στο Παράρτημα Β.

3.5 Ορισμοί χρονικών μεταβλητών, προγραμματισμένες διακοπές και βάση σύγκρισης

Για να διατηρούν οι Κρίσιμοι / Βασικοί Δείκτες Απόδοσης τη συγκρισιμότητά τους μεταξύ της περιόδου πριν και μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής, είναι απαραίτητο να χρησιμοποιούνται ενιαίοι χρονικοί ορισμοί. Η Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού (Overall Equipment Effectiveness – OEE) αποτελεί σύνθετο δείκτη μέτρησης της παραγωγικής απόδοσης, ο οποίος βασίζεται στη Διαθεσιμότητα, την Απόδοση και την Ποιότητα και χρησιμοποιείται ευρέως για τον εντοπισμό παραγωγικών απωλειών και ευκαιριών βελτίωσης (Muchiri & Pintelon, 2008; Ng Corrales et al., 2020).

Η βασική χρονική μεταβλητή πάνω στην οποία στηρίζεται ο υπολογισμός της Διαθεσιμότητας και των χρόνων στάσης είναι ο προγραμματισμένος χρόνος παραγωγής. Ο συνολικός χρόνος βάρδιας ορίζεται ως η συνολική διάρκεια της εργασιακής βάρδιας. Στην παρούσα μελέτη, κάθε βάρδια έχει διάρκεια οκτώ ωρών, δηλαδή 480 λεπτών. Από τον συνολικό αυτό χρόνο αφαιρούνται οι προγραμματισμένες διακοπές λειτουργίας, δηλαδή τα χρονικά διαστήματα που είναι γνωστά εκ των προτέρων και δεν αντιμετωπίζονται ως απρογραμματίστες απώλειες της γραμμής.

Στις προγραμματισμένες διακοπές μπορούν να περιλαμβάνονται, ανάλογα με τον τρόπο λειτουργίας της γραμμής, τα προγραμματισμένα διαλείμματα, οι προγραμματισμένες παύσεις, η προγραμματισμένη συντήρηση ή χρονικά διαστήματα κατά τα οποία δεν υπάρχει προγραμματισμένη παραγωγική δραστηριότητα. Οι χρόνοι αυτοί δεν υπολογίζονται ως απώλειες Διαθεσιμότητας, καθώς δεν αντιστοιχούν σε μη αναμενόμενη αδυναμία λειτουργίας του εξοπλισμού. Αντίθετα, οι απρογραμμάτιστες στάσεις, όπως τεχνικές βλάβες, ρυθμίσεις, αναμονές υλικών, καθυστερήσεις ελέγχων ή άλλες μη προγραμματισμένες διακοπές, προσμετρώνται στον χρόνο στάσεων.

Ο προγραμματισμένος χρόνος παραγωγής υπολογίζεται ως εξής:

$$\text{Προγραμματισμένος χρόνος παραγωγής} = \text{Συνολικός χρόνος βάρδιας} - \text{Προγραμματισμένες διακοπές (3.1)}$$

Ο χρόνος λειτουργίας προκύπτει από τη διαφορά μεταξύ του προγραμματισμένου χρόνου παραγωγής και του χρόνου στάσεων:

$$\text{Χρόνος λειτουργίας} = \text{Προγραμματισμένος χρόνος παραγωγής} - \text{Χρόνος στάσεων (3.2)}$$

Η Διαθεσιμότητα υπολογίζεται ως ο λόγος του χρόνου λειτουργίας προς τον προγραμματισμένο χρόνο παραγωγής:

$$\text{Διαθεσιμότητα} = \text{Χρόνος λειτουργίας} / \text{Προγραμματισμένος χρόνος παραγωγής (3.3)}$$

Η παραπάνω διάκριση είναι σημαντική, διότι ο τρόπος ταξινόμησης των χρόνων επηρεάζει άμεσα το αποτέλεσμα της Διαθεσιμότητας και, κατά συνέπεια, της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού. Για τον λόγο αυτό, στην παρούσα μελέτη εφαρμόστηκε κοινή λογική ορισμού των χρονικών μεταβλητών και στις δύο περιόδους, ώστε η σύγκριση να μη βασίζεται μόνο στις τελικές αριθμητικές τιμές, αλλά και σε κοινή βάση υπολογισμού.

Στην περίοδο πριν από την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής, οι χρονικές μεταβλητές προέκυπταν από χειρόγραφες ή χειροκίνητες καταγραφές, οι οποίες στη συνέχεια συγκεντρώνονταν σε ηλεκτρονικό αρχείο. Στην περίοδο μετά την εφαρμογή του PLEX, οι αντίστοιχες μεταβλητές προέκυπταν από την ψηφιακή καταγραφή του συστήματος και από τις επιβεβαιώσεις των χειριστών. Η βιβλιογραφία αναφέρει ότι η αυτοματοποιημένη συλλογή δεδομένων μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα και την πληρότητα των δεδομένων που

χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του ΟΕΕ, ωστόσο η αξιοπιστία των δεικτών εξακολουθεί να εξαρτάται από τη σωστή αντιστοίχιση των καταγραφών με την πραγματική παραγωγική λειτουργία (Bianchini et al., 2024; Wang & Pan, 2011).

Επομένως, η βάση σύγκρισης της παρούσας εργασίας δεν περιορίζεται στη χρήση δύο χρονικών περιόδων ίσης διάρκειας. Περιλαμβάνει επίσης την εφαρμογή κοινών ορισμών για τον συνολικό χρόνο βάρδιας, τον προγραμματισμένο χρόνο παραγωγής, τις προγραμματισμένες διακοπές, τον χρόνο στάσεων, τον χρόνο λειτουργίας και τις ποσότητες παραγωγής. Με τον τρόπο αυτό, η σύγκριση των αποτελεσμάτων πραγματοποιείται σε κοινό μεθοδολογικό πλαίσιο, παρά τη διαφοροποίηση του τρόπου συλλογής δεδομένων μεταξύ της χειροκίνητης και της ψηφιακής περιόδου.

Οι επιμέρους μεταβλητές και η αντιστοίχισή τους μεταξύ των δύο περιόδων παρουσιάζονται αναλυτικά στην επόμενη ενότητα.

3.6 Λεξικό δεδομένων και αντιστοίχιση πεδίων καταγραφής

Για τη διασφάλιση της μεθοδολογικής διαφάνειας, κρίθηκε απαραίτητη η σαφής αντιστοίχιση των μεταβλητών που χρησιμοποιούνται στην εργασία με τα αντίστοιχα πεδία των δύο πηγών δεδομένων. Η αντιστοίχιση αυτή λειτουργεί ως λεξικό δεδομένων, καθώς εξηγεί τι μετρά κάθε πεδίο, με ποια μονάδα εκφράζεται και πώς συνδέεται με τους δείκτες απόδοσης που παρουσιάστηκαν στο θεωρητικό μέρος της εργασίας.

Η ανάγκη ύπαρξης ενιαίου λεξικού δεδομένων είναι ιδιαίτερα σημαντική στην παρούσα μελέτη, διότι οι δύο εξεταζόμενες περίοδοι βασίζονται σε διαφορετικό τρόπο συλλογής και καταγραφής των στοιχείων. Στην περίοδο πριν από την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής, τα δεδομένα προέρχονται από χειρόγραφες ή χειροκίνητες καταγραφές που συγκεντρώθηκαν σε ηλεκτρονικό αρχείο. Αντίθετα, στην περίοδο μετά την εφαρμογή του PLEX, τα δεδομένα προέρχονται από ψηφιακή εξαγωγή του συστήματος. Η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η αξιοπιστία των δεικτών απόδοσης εξαρτάται όχι μόνο από τη συλλογή των δεδομένων, αλλά και από την ποιότητα, την πληρότητα και την ορθή αντιστοίχισή τους με την πραγματική παραγωγική λειτουργία (Bianchini et al., 2024; Wang & Pan, 2011).

Οι χρονικές μεταβλητές χρησιμοποιούνται κυρίως για τον υπολογισμό της Διαθεσιμότητας και της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού. Ο προγραμματισμένος χρόνος παραγωγής αποτυπώνει το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η γραμμή είναι προγραμματισμένο να παράγει, αφού αφαιρεθούν οι προγραμματισμένες διακοπές. Ο χρόνος λειτουργίας αποτυπώνει το πραγματικό χρονικό διάστημα κατά το οποίο η μηχανή βρίσκεται σε παραγωγική λειτουργία, ενώ ο χρόνος στάσεων αφορά το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η μηχανή δεν παράγει λόγω απρογραμματίστων στάσεων, βλαβών, ρυθμίσεων, αναμονών ή άλλων αιτιών.

Οι ποσοτικές μεταβλητές παραγωγής χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό της Απόδοσης, της Ποιότητας και της παραγωγής ανά βάρδια. Τα συνολικά παραχθέντα τεμάχια αντιστοιχούν στη συνολική ποσότητα παραγωγής της βάρδιας, τα αποδεκτά τεμάχια στη ποσότητα που πληροί τις απαιτήσεις ποιότητας, ενώ τα απορριπτόμενα ή ελαττωματικά τεμάχια αποτυπώνουν τις ποιοτικές απώλειες. Επιπλέον, οι επιμέρους κατηγορίες στάσεων, όπως τεχνικές βλάβες, ρυθμίσεις, καθαριότητα, αλλαγές προϊόντος, αναμονές υλικών και λοιπές καθυστερήσεις, χρησιμοποιούνται για την ανάλυση των βασικών πηγών απωλειών.

Η χρήση κοινού λεξικού δεδομένων είναι απαραίτητη, διότι η ίδια παραγωγική έννοια μπορεί να εμφανίζεται με διαφορετική μορφή στις δύο πηγές. Για παράδειγμα, στην προ-MES περίοδο μία γραμμή του αρχείου αντιστοιχούσε σε μία βάρδια, ενώ στην περίοδο μετά την εφαρμογή του PLEX μία βάρδια μπορούσε να εμφανίζεται σε περισσότερες από μία παραγωγικές εγγραφές. Για τον λόγο αυτό, πριν από τον υπολογισμό των δεικτών, τα πεδία των δύο περιόδων αντιστοιχίστηκαν εννοιολογικά και λειτουργικά, ώστε η τελική ανάλυση να πραγματοποιηθεί σε κοινό επίπεδο εργασιακής βάρδιας.

Η ποιότητα της αντιστοίχισης των δεδομένων αποτελεί κρίσιμο στοιχείο της ανάλυσης. Ακόμη και σε συστήματα αυτόματης ή ψηφιακής μέτρησης, η αξιοπιστία του ΟΕΕ μπορεί να επηρεαστεί όταν οι κατηγορίες απωλειών είναι ελλιπείς, ασαφείς ή δεν χρησιμοποιούνται με ενιαίο τρόπο από τους χρήστες (Hedman et al., 2016). Αντίστοιχα, στις χειροκίνητες καταγραφές, η ποιότητα των δεδομένων μπορεί να επηρεαστεί από παραλείψεις, καθυστερημένη συμπλήρωση ή διαφορετική ερμηνεία των πεδίων από τους χρήστες (Jericho et al., 2024).

Ο Πίνακας 6 παρουσιάζει το λεξικό δεδομένων και την αντιστοίχιση των βασικών μεταβλητών μεταξύ της περιόδου πριν από την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής και της περιόδου μετά την εφαρμογή του PLEX.

Πίνακας 6. Λεξικό δεδομένων και αντιστοίχιση πεδίων καταγραφής πριν και μετά την εφαρμογή του PLEX

Δείκτης / μεταβλητή	Πεδίο πριν από το PLEX	Πεδίο μετά την εφαρμογή του PLEX	Μονάδα μέτρησης	Λειτουργική επεξήγηση
Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού	OEE ανά βάρδια	OEE ανά παραγωγική εγγραφή ή βάρδια, μετά από ομαδοποίηση	%	Σύνθετος δείκτης που συνδυάζει Διαθεσιμότητα, Απόδοση και Ποιότητα.
Διαθεσιμότητα	Διαθεσιμότητα ανά βάρδια	Διαθεσιμότητα από ψηφιακή καταγραφή χρόνων λειτουργίας και στάσης	%	Δείχνει το ποσοστό του προγραμματισμένου χρόνου παραγωγής κατά το οποίο η γραμμή βρίσκεται σε λειτουργία.
Απόδοση	Απόδοση ανά βάρδια	Απόδοση βάσει πραγματικής	%	Δείχνει κατά πόσο η γραμμή

Δείκτης / μεταβλητή	Πεδίο πριν από το PLEX	Πεδίο μετά την εφαρμογή του PLEX	Μονά δα μέτρηση ς	Λειτουργική επεξήγηση
		παραγωγής και θεωρητικού ρυθμού		λειτουργεί κοντά στον θεωρητικό ή ονομαστικό ρυθμό παραγωγής.
Ποιότητα	Ποιότητα ανά βάρδια	Ποιότητα βάσει αποδεκτών και συνολικών τεμαχίων	%	Δείχνει το ποσοστό των αποδεκτών τεμαχίων σε σχέση με τη συνολική παραγωγή.
Προγραμματισμέ νος χρόνος παραγωγής	Προγραμματισμέ νος χρόνος παραγωγής ανά βάρδια	Προγραμματισμέ νος χρόνος παραγωγής από το πρόγραμμα ή την ψηφιακή καταγραφή	Λεπτά	Χρόνος κατά τον οποίο η γραμμή είναι προγραμματισμέν ο να παράγει, μετά την αφαίρεση προγραμματισμέν ων διακοπών.

Δείκτης / μεταβλητή	Πεδίο πριν από το PLEX	Πεδίο μετά την εφαρμογή του PLEX	Μονά δα μέτρηση ς	Λειτουργική επεξήγηση
Χρόνος λειτουργίας	Χρόνος λειτουργίας ανά βάρδια	Ψηφιακά καταγεγραμμένος χρόνος λειτουργίας	Λεπτά	Πραγματικός χρόνος κατά τον οποίο η μηχανή βρίσκεται σε παραγωγική λειτουργία.
Χρόνος στάσεων	Συνολικός χρόνος στάσεων ανά βάρδια	Καταγεγραμμένε ς στάσεις από το PLEX	Λεπτά	Χρόνος κατά τον οποίο η γραμμή δεν παράγει λόγω βλαβών, ρυθμίσεων, αναμονών ή άλλων απρογραμματίστ ων αιτιών.
Τεχνικές βλάβες	Χειροκίνητη καταγραφή βλαβών	Κωδικοί αιτιολόγησης στάσεων στο PLEX	Λεπτά ή πλήθος συμβάντ ων	Στάσεις που συνδέονται με μηχανικές, ηλεκτρολογικές ή άλλες τεχνικές αστοχίες.

Δείκτης / μεταβλητή	Πεδίο πριν από το PLEX	Πεδίο μετά την εφαρμογή του PLEX	Μονά δα μέτρηση ς	Λειτουργική επεξήγηση
Συνολικά παραχθέντα τεμάχια	Συνολική παραγωγή βάρδιας	Ψηφιακή καταγραφή παραγωγής / επιβεβαίωση παραγωγής	Τεμάχι α	Σύνολο τεμαχίων που παρήχθησαν στη βάρδια.
Αποδεκτά τεμάχια	Καλά τεμάχια	Αποδεκτά τεμάχια από ψηφιακή καταχώριση	Τεμάχι α	Τεμάχια που πληρούν τις απαιτήσεις ποιότητας.
Απορριπτόμενα ή ελαττωματικά τεμάχια	Απορρίψεις / ελαττωματικά	Ποιοτικές εγγραφές ή δηλωμένες απορρίψεις στο PLEX	Τεμάχι α	Τεμάχια που δεν πληρούν τις απαιτήσεις ποιότητας.
Χρόνος αλλαγής προϊόντος	Χειροκίνητη καταγραφή αλλαγής	Ψηφιακή καταγραφή αλλαγής ή σχετικός κωδικός στάσης	Λεπτά	Χρόνος που απαιτείται για τη μετάβαση από έναν κωδικό προϊόντος σε άλλον.
Παραγωγή ανά βάρδια	Συνολική παραγωγή βάρδιας	Άθροισμα παραγωγικών εγγραφών ανά	Τεμάχι α	Συνολική παραγωγή που αντιστοιχεί σε

Δείκτης / μεταβλητή	Πεδίο πριν από το PLEX	Πεδίο μετά την εφαρμογή του PLEX	Μονά δα μέτρηση ς	Λειτουργική επεξήγηση
		ημερομηνία, βάρδια και μηχανή		μία εργασιακή βάρδια.

Η αντιστοίχιση των πεδίων δεν περιορίστηκε στην απλή σύγκριση ονομασιών, αλλά βασίστηκε στη λειτουργική σημασία κάθε μεταβλητής. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στις περιπτώσεις όπου το PLEX εμφάνιζε περισσότερες από μία παραγωγικές εγγραφές για την ίδια βάρδια. Στις περιπτώσεις αυτές, οι επιμέρους εγγραφές ενοποιήθηκαν σε επίπεδο ημερομηνίας, βάρδιας και μηχανής. Με τον τρόπο αυτό, η παραγωγή, οι χρόνοι λειτουργίας και οι χρόνοι στάσης αντιστοιχίστηκαν στην ίδια μονάδα ανάλυσης με την περίοδο πριν από την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής.

3.7 Προετοιμασία, καθαρισμός και έλεγχος ποιότητας δεδομένων

Πριν από τον υπολογισμό και τη σύγκριση των δεικτών απόδοσης, πραγματοποιήθηκε έλεγχος των δεδομένων και στις δύο εξεταζόμενες περιόδους. Ο έλεγχος αυτός κρίθηκε απαραίτητος, καθώς τα δεδομένα προέρχονται από διαφορετικές πηγές και διαφορετικό τρόπο καταγραφής. Στην περίοδο πριν από την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής, τα στοιχεία βασίζονταν σε χειρόγραφες ή χειροκίνητες καταγραφές, ενώ στην περίοδο μετά την εφαρμογή του PLEX τα στοιχεία προέρχονταν από ψηφιακή εξαγωγή του συστήματος.

Η ποιότητα των δεδομένων αποτελεί βασική προϋπόθεση για την αξιόπιστη μέτρηση των δεικτών παραγωγικής απόδοσης. Η αυτοματοποιημένη συλλογή δεδομένων μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια και την πληρότητα των καταγραφών, ωστόσο δεν εξαλείφει την ανάγκη

ελέγχου, καθώς η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων επηρεάζεται από τη σωστή ταξινόμηση των απωλειών, τη συμπλήρωση των απαιτούμενων πεδίων και την ορθή χρήση του συστήματος από τους χρήστες (Hedman et al., 2016; Peixoto et al., 2025; Wang & Pan, 2011).

Αντίστοιχα, στις χειροκίνητες καταγραφές, η ποιότητα των δεδομένων μπορεί να επηρεαστεί από παραλείψεις, καθυστερημένη συμπλήρωση ή διαφορετική ερμηνεία των πεδίων από τους εργαζομένους (Jericho et al., 2024).

3.7.1 Έλεγχος πληρότητας και εγκυρότητας εγγραφών

Στο πρώτο στάδιο εξετάστηκε η πληρότητα των αρχείων, δηλαδή αν κάθε εγγραφή περιλάμβανε τα απαραίτητα στοιχεία για τον υπολογισμό των δεικτών. Συγκεκριμένα, ελέγχθηκε η ύπαρξη ημερομηνίας, βάρδιας, μηχανής, χρόνων λειτουργίας, χρόνων στάσης, παραγωγικών ποσοτήτων και ποιοτικών στοιχείων.

Εγγραφές που δεν περιείχαν επαρκή στοιχεία για τον υπολογισμό των βασικών δεικτών δεν χρησιμοποιήθηκαν στην τελική ανάλυση. Ο έλεγχος αυτός ήταν ιδιαίτερα σημαντικός, καθώς η σύγκριση πριν και μετά την εφαρμογή του PLEX απαιτούσε κοινή βάση δεδομένων και αντίστοιχα πεδία υπολογισμού.

3.7.2 Ομαδοποίηση δεδομένων σε επίπεδο βάρδιας

Στο δεύτερο στάδιο εξετάστηκε η συνέπεια της μονάδας ανάλυσης. Στην περίοδο πριν από την εφαρμογή του PLEX, κάθε γραμμή του αρχείου αντιστοιχούσε σε μία ημερομηνία, μία βάρδια και μία μηχανή. Αντίθετα, στην περίοδο μετά την εφαρμογή του PLEX, μία βάρδια μπορούσε να εμφανίζεται σε περισσότερες από μία παραγωγικές εγγραφές.

Το φαινόμενο αυτό συνδεόταν κυρίως με την παραγωγή διαφορετικών κωδικών προϊόντων εντός της ίδιας βάρδιας ή με επιμέρους ψηφιακές δηλώσεις παραγωγής. Για να υπάρχει κοινή βάση σύγκρισης, οι εγγραφές της περιόδου μετά την εφαρμογή του PLEX ομαδοποιήθηκαν με βάση την ημερομηνία, τη βάρδια και τη μηχανή. Με τον τρόπο αυτό, η τελική ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε επίπεδο εργασιακής βάρδιας, όπως και στην περίοδο πριν από την εφαρμογή του συστήματος.

3.7.3 Έλεγχος μηδενικών και ακραίων τιμών

Στο τρίτο στάδιο εξετάστηκαν οι μηδενικές και ακραίες τιμές. Στο αρχικό αρχείο της περιόδου μετά την εφαρμογή του PLEX εντοπίστηκαν 20 εγγραφές με μηδενική παραγωγή και μηδενική τιμή Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού (OEE). Οι εγγραφές αυτές δεν αντιστοιχούσαν σε παραγωγική λειτουργία και, ως εκ τούτου, δεν συμπεριλήφθηκαν στο τελικό σύνολο παραγωγικών εγγραφών που χρησιμοποιήθηκε για την ανάλυση. Μετά τον συγκεκριμένο έλεγχο παρέμειναν 114 παραγωγικές εγγραφές, οι οποίες στη συνέχεια ομαδοποιήθηκαν σε επίπεδο ημερομηνίας, βάρδιας και μηχανής, όπως περιγράφεται στην προηγούμενη ενότητα, προκύπτοντας σε 103 διακριτές παραγωγικές βάρδιες.

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε και στις περιπτώσεις όπου η Απόδοση ή η Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού υπερέβαιναν το 100%. Σε αντίθεση με τις μηδενικές μη παραγωγικές εγγραφές, οι συγκεκριμένες περιπτώσεις αντιστοιχούσαν σε πραγματικές παραγωγικές βάρδιες και διέθεταν επαρκή στοιχεία για τον υπολογισμό των δεικτών. Για τον λόγο αυτό δεν αποκλείστηκαν από το τελικό δείγμα. Οι τιμές αυτές, ωστόσο, δεν ερμηνεύτηκαν ως πραγματική λειτουργία της μηχανής πάνω από τη θεωρητική της δυναμικότητα, αλλά εξετάστηκαν ως πιθανές ασυνέπειες στη χρονική αντιστοίχιση της παραγωγής.

Κατά τη λειτουργική διερεύνηση των συγκεκριμένων περιπτώσεων διαπιστώθηκε ότι, στην αρχική περίοδο χρήσης του PLEX, ορισμένες παραγωγικές δηλώσεις ολοκληρώνονταν με καθυστέρηση. Ως αποτέλεσμα, ποσότητες που είχαν παραχθεί κατά τη διάρκεια μίας βάρδιας μπορούσαν να καταχωριστούν χρονικά στην επόμενη, δημιουργώντας υποεκτίμηση της παραγωγής στην πρώτη βάρδια και αντίστοιχη υπερεκτίμηση στην επόμενη. Η χρονική αυτή ασυνέπεια μπορούσε να επηρεάσει τον υπολογισμό της Απόδοσης και, κατ' επέκταση, της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού.

Για την αντιμετώπιση του ζητήματος πραγματοποιήθηκε επαναληπτική εκπαίδευση των χειριστών από την ομάδα υποστήριξης του PLEX και καθιερώθηκε η ολοκλήρωση της παραγωγικής δήλωσης τουλάχιστον δεκαπέντε λεπτά πριν από τη λήξη της βάρδιας, ώστε να υπάρχει επαρκής χρόνος για την επίλυση τυχόν προβλημάτων καταχώρισης. Μετά την

εφαρμογή των ενεργειών αυτών, αντίστοιχα περιστατικά χρονικής μεταφοράς της παραγωγής δεν παρατηρήθηκαν εκ νέου.

Δεδομένου ότι το δείγμα που εξετάζεται στην παρούσα εργασία προέρχεται από την αρχική περίοδο εφαρμογής του PLEX, οι ακραίες αυτές αποκλίσεις διατηρήθηκαν στο πλαίσιο της ανάλυσης και αξιολογήθηκαν σε συνδυασμό με τη λειτουργική πραγματικότητα της παραγωγής, χωρίς να αντιμετωπιστούν ως πραγματική υπέρβαση της θεωρητικής δυναμικότητας της μηχανής. Η προσέγγιση αυτή αποτρέπει την εκ των υστέρων αφαίρεση πραγματικών παραγωγικών παρατηρήσεων αποκλειστικά λόγω της ακραίας τιμής ενός δείκτη και αναδεικνύει παράλληλα τη σημασία της ορθής και έγκαιρης χρήσης του συστήματος για την ποιότητα των δεδομένων (Innecco et al., 2022).

3.7.4 Τελική προετοιμασία δεδομένων για την ανάλυση

Στο τελευταίο στάδιο πραγματοποιήθηκε η τελική προετοιμασία των δεδομένων για τον υπολογισμό των δεικτών. Οι παραγωγικές εγγραφές της περιόδου μετά την εφαρμογή του PLEX ενοποιήθηκαν σε επίπεδο εργασιακής βάρδιας, ώστε να αντιστοιχούν στη δομή του αρχείου της περιόδου πριν από την εφαρμογή του συστήματος.

Για κάθε βάρδια υπολογίστηκαν ή επαληθεύτηκαν οι βασικοί δείκτες: Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού, Διαθεσιμότητα, Απόδοση και Ποιότητα. Παράλληλα, ελέγχθηκε η λογική σχέση μεταξύ των επιμέρους δεικτών, ώστε οι τελικές τιμές να είναι συνεπείς με τους ορισμούς που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες.

Η διαδικασία αυτή δεν είχε ως στόχο την τεχνητή βελτίωση ή διόρθωση των αποτελεσμάτων, αλλά τη διασφάλιση ότι η σύγκριση πριν και μετά την εφαρμογή του PLEX βασίζεται σε κοινή και κατανοητή βάση. Με αυτόν τον τρόπο, οι διαφορές που εμφανίζονται στους δείκτες δεν αποδίδονται άκριτα σε πραγματική βελτίωση ή επιδείνωση της παραγωγικής απόδοσης, αλλά εξετάζονται σε συνδυασμό με τον τρόπο συλλογής, καταγραφής και επεξεργασίας των δεδομένων.

3.8 Υπολογισμός δεικτών και κανόνες συγκρισιμότητας μεταξύ των δύο περιόδων

Οι μαθηματικοί τύποι και οι βασικοί ορισμοί των δεικτών απόδοσης παρουσιάστηκαν στο Κεφάλαιο 2. Στην παρούσα ενότητα προσδιορίζονται οι κανόνες με βάση τους οποίους οι δείκτες υπολογίστηκαν και συγκρίθηκαν μεταξύ της περιόδου πριν και μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής PLEX.

Βασική προϋπόθεση της σύγκρισης ήταν η χρήση κοινής μονάδας ανάλυσης. Για τον λόγο αυτό, όλοι οι δείκτες υπολογίστηκαν σε επίπεδο εργασιακής βάρδιας. Η επιλογή αυτή κρίθηκε απαραίτητη, καθώς στην περίοδο πριν από την εφαρμογή του PLEX κάθε εγγραφή αντιστοιχούσε σε μία βάρδια, ενώ στην περίοδο μετά την εφαρμογή του PLEX μία βάρδια μπορούσε να εμφανίζεται σε περισσότερες από μία παραγωγικές εγγραφές. Πριν από τον τελικό υπολογισμό των δεικτών, οι επιμέρους εγγραφές της ψηφιακής περιόδου ενοποιήθηκαν με βάση την ημερομηνία, τη βάρδια και τη μηχανή.

Ο πρώτος κανόνας συγκρισιμότητας αφορά τη χρήση κοινής χρονικής βάσης. Όλοι οι υπολογισμοί που σχετίζονται με τη Διαθεσιμότητα και τους χρόνους στάσης αναφέρονται στον προγραμματισμένο χρόνο παραγωγής. Με τον τρόπο αυτό, οι δύο περίοδοι συγκρίνονται με κοινό παρονομαστή και αποφεύγεται η σύγκριση τιμών που προκύπτουν από διαφορετική χρονική βάση.

Ο δεύτερος κανόνας αφορά την ενιαία ερμηνεία των βασικών μεταβλητών. Ο χρόνος λειτουργίας, ο χρόνος στάσεων, οι προγραμματισμένες διακοπές, τα συνολικά παραχθέντα τεμάχια, τα αποδεκτά τεμάχια και τα απορριπτόμενα τεμάχια ορίστηκαν με τον ίδιο τρόπο και στις δύο περιόδους. Η ενιαία ερμηνεία των μεταβλητών είναι απαραίτητη, διότι ακόμη και μικρές διαφορές στον τρόπο καταγραφής μπορούν να επηρεάσουν το αποτέλεσμα των δεικτών. Για λόγους μεθοδολογικής σαφήνειας, οι βασικές σχέσεις που εφαρμόστηκαν στην ανάλυση συνοψίζονται ως εξής:

Η Διαθεσιμότητα υπολογίστηκε ως ο λόγος του χρόνου λειτουργίας προς τον προγραμματισμένο χρόνο παραγωγής:

$$\text{Διαθεσιμότητα} = \text{Χρόνος λειτουργίας} / \text{Προγραμματισμένος χρόνος παραγωγής} \quad (3.4)$$

Η Απόδοση υπολογίστηκε με βάση τη σχέση μεταξύ της πραγματικής παραγωγής και της θεωρητικά αναμενόμενης παραγωγής για τον διαθέσιμο χρόνο λειτουργίας:

$$\text{Απόδοση} = \text{Πραγματική παραγωγή} / \text{Θεωρητικά αναμενόμενη παραγωγή} \quad (3.5)$$

Η Ποιότητα υπολογίστηκε ως ο λόγος των αποδεκτών τεμαχίων προς το σύνολο των παραχθέντων τεμαχίων:

$$\text{Ποιότητα} = \text{Αποδεκτά τεμάχια} / \text{Συνολικά παραχθέντα τεμάχια} \quad (3.6)$$

Η Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού (Overall Equipment Effectiveness – OEE) υπολογίστηκε ως το γινόμενο των τριών επιμέρους δεικτών:

$$\text{Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού} = \text{Διαθεσιμότητα} \times \text{Απόδοση} \times \text{Ποιότητα} \quad (3.7)$$

Για κάθε εργασιακή βάρδια ο OEE υπολογίστηκε ξεχωριστά ως γινόμενο της αντίστοιχης Διαθεσιμότητας, Απόδοσης και Ποιότητας. Στις περιπτώσεις όπου μία βάρδια περιλάμβανε περισσότερες από μία παραγωγικές εγγραφές, αθροίστηκαν αρχικά οι αντίστοιχες πρωτογενείς χρονικές και παραγωγικές μεταβλητές και οι δείκτες υπολογίστηκαν εκ νέου σε επίπεδο βάρδιας, χωρίς χρήση απλού μέσου όρου των επιμέρους εγγραφών. Η μέση τιμή OEE κάθε περιόδου προέκυψε στη συνέχεια ως ο αριθμητικός μέσος των επιμέρους τιμών OEE των βαρδιών και όχι ως γινόμενο των μέσων τιμών της Διαθεσιμότητας, της Απόδοσης και της Ποιότητας. Για τον λόγο αυτό, μικρές αποκλίσεις μεταξύ του γινομένου των στρογγυλοποιημένων μέσων τιμών και της αναφερόμενης μέσης τιμής OEE είναι αναμενόμενες.

Οι δείκτες εκφράστηκαν σε ποσοστιαία μορφή, ώστε να είναι ευκολότερη η σύγκριση μεταξύ των δύο περιόδων. Για την τελική παρουσίαση των αποτελεσμάτων υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές ανά περίοδο, καθώς και οι μεταβολές μεταξύ της περιόδου πριν και μετά την εφαρμογή του PLEX.

Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στον τρόπο υπολογισμού των δεικτών της ψηφιακής περιόδου. Όταν υπήρχαν περισσότερες από μία παραγωγικές εγγραφές για την ίδια βάρδια, δεν έγινε απλή σύγκριση των επιμέρους γραμμών. Αντίθετα, οι εγγραφές ενοποιήθηκαν σε επίπεδο βάρδιας, ώστε οι ποσότητες παραγωγής και οι χρόνοι να αντιστοιχούν στην ίδια μονάδα ανάλυσης με την περίοδο πριν από την εφαρμογή του συστήματος.

Η προσέγγιση αυτή είναι σημαντική, διότι η απλή λήψη μέσων όρων από μεμονωμένες ψηφιακές εγγραφές θα μπορούσε να οδηγήσει σε παραπλανητικά αποτελέσματα. Για παράδειγμα, μία βάρδια με περισσότερους από έναν κωδικούς προϊόντων θα μπορούσε να επηρεάσει δυσανάλογα τον μέσο όρο, εάν κάθε παραγωγική εγγραφή αντιμετωπιζόταν ως ξεχωριστή βάρδια. Με την ενοποίηση των εγγραφών, η σύγκριση διατηρείται στο ίδιο επίπεδο ανάλυσης.

Ο τρίτος κανόνας αφορά τον έλεγχο των μηδενικών και ακραίων τιμών πριν από την τελική ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Τιμές μηδενικής Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού ή τιμές Απόδοσης άνω του 100% δεν ερμηνεύτηκαν αυτόματα ως πραγματική παραγωγική επίδοση. Αντίθετα, εξετάστηκαν σε σχέση με τη λειτουργική πραγματικότητα της βάρδιας και με πιθανές ασυνέπειες στην καταχώριση ή χρονική αντιστοίχιση της παραγωγής.

Η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η αυτόματη ή ψηφιακή συλλογή δεδομένων μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια των δεικτών, αλλά δεν εξαλείφει την ανάγκη ελέγχου της ποιότητας των δεδομένων. Η σωστή ταξινόμηση των απωλειών, η πληρότητα των καταχωρίσεων και η ορθή χρήση του συστήματος από τους χειριστές επηρεάζουν άμεσα την αξιοπιστία των τελικών αποτελεσμάτων (Hedman et al., 2016; Wang & Pan, 2011).

Συνεπώς, η σύγκριση των δύο περιόδων βασίστηκε σε τρεις βασικούς κανόνες: κοινή μονάδα ανάλυσης, ενιαίους ορισμούς μεταβλητών και έλεγχο της ποιότητας των δεδομένων πριν από την τελική ερμηνεία. Με αυτόν τον τρόπο, τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 4 δεν αποτελούν απλή παράθεση αριθμών, αλλά βασίζονται σε συγκεκριμένη και τεκμηριωμένη μεθοδολογική διαδικασία.

3.9 Μέθοδος ανάλυσης δεδομένων

Η ανάλυση των δεδομένων πραγματοποιήθηκε με περιγραφική, συγκριτική και επαγωγική στατιστική προσέγγιση, με στόχο την αποτύπωση και τη στατιστική διερεύνηση της μεταβολής των βασικών δεικτών απόδοσης πριν και μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής PLEX. Η ανάλυση δεν βασίστηκε σε πειραματικό σχεδιασμό, αλλά σε πραγματικά

παραγωγικά δεδομένα, τα οποία συλλέχθηκαν από τις δύο εξεταζόμενες περιόδους και επεξεργάστηκαν σύμφωνα με τους κανόνες που παρουσιάστηκαν στις προηγούμενες ενότητες.

Αρχικά, τα δεδομένα οργανώθηκαν σε επίπεδο εργασιακής βάρδιας. Για κάθε περίοδο υπολογίστηκαν οι μέσες τιμές των βασικών δεικτών, όπως η Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού, η Διαθεσιμότητα, η Απόδοση και η Ποιότητα. Παράλληλα, εξετάστηκαν οι μεταβολές στους χρόνους στάσης, στις τεχνικές βλάβες, στις απορρίψεις, στην παραγωγή ανά βάρδια και στον βαθμό χρήσης της γραμμής.

Η σύγκριση μεταξύ των δύο περιόδων πραγματοποιήθηκε με βάση τις μέσες τιμές των δεικτών και τη μεταξύ τους ποσοστιαία ή απόλυτη μεταβολή, ανάλογα με τη φύση κάθε μεταβλητής. Για τους δείκτες που εκφράζονται σε ποσοστό, όπως η Διαθεσιμότητα, η Απόδοση, η Ποιότητα και η Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού, η μεταβολή παρουσιάζεται σε ποσοστιαίες μονάδες. Για τις μεταβλητές που εκφράζονται σε τεμάχια ή λεπτά, όπως η παραγωγή ανά βάρδια και οι χρόνοι στάσης, η μεταβολή παρουσιάζεται σε απόλυτες τιμές και, όπου είναι χρήσιμο, σε ποσοστιαία μορφή.

Πέρα από την περιγραφική σύγκριση, πραγματοποιήθηκε επαγωγική στατιστική ανάλυση για τη διερεύνηση της στατιστικής σημαντικότητας των διαφορών μεταξύ των δύο περιόδων. Η κανονικότητα των κατανομών των βασικών δεικτών εξετάστηκε με τον έλεγχο Shapiro–Wilk. Για τη σύγκριση των δύο ανεξάρτητων δειγμάτων εφαρμόστηκε ο έλεγχος t του Welch, ο οποίος είναι κατάλληλος όταν δεν θεωρείται δεδομένη η ισότητα των διακυμάνσεων μεταξύ των ομάδων. Για κάθε δείκτη υπολογίστηκαν η διαφορά των μέσων τιμών, το 95% διάστημα εμπιστοσύνης της διαφοράς, η τιμή p και το μέγεθος επίδρασης Hedges' g . Ως επίπεδο στατιστικής σημαντικότητας ορίστηκε $\alpha=0,05$. Δεδομένου ότι σε αρκετούς δείκτες διαπιστώθηκε απόκλιση από την κανονική κατανομή, πραγματοποιήθηκε συμπληρωματικά και ο μη παραμετρικός έλεγχος Mann–Whitney U , με σκοπό τον έλεγχο της ευρωστίας των συμπερασμάτων.

Επιπλέον, τα αποτελέσματα εξετάστηκαν σε σχέση με τη δομή και την ποιότητα των δεδομένων. Ιδιαίτερη προσοχή δόθηκε στις περιπτώσεις όπου η ψηφιακή καταγραφή εμφάνιζε μηδενικές ή ακραίες τιμές, καθώς και στις περιπτώσεις όπου μία βάρδια εμφανιζόταν σε περισσότερες από μία παραγωγικές εγγραφές. Οι περιπτώσεις αυτές δεν αντιμετωπίστηκαν

μόνο αριθμητικά, αλλά αξιολογήθηκαν σε σχέση με τη λειτουργική πραγματικότητα της παραγωγής και τον τρόπο χρήσης του συστήματος.

Η τελική ερμηνεία των αποτελεσμάτων βασίστηκε στη σύγκριση των αριθμητικών ευρημάτων με τα χαρακτηριστικά της διαδικασίας συλλογής δεδομένων. Με τον τρόπο αυτό, οι μεταβολές των δεικτών δεν αποδίδονται αυτόματα σε πραγματική βελτίωση ή επιδείνωση της παραγωγικής απόδοσης, αλλά εξετάζονται σε συνδυασμό με τη μετάβαση από χειροκίνητη σε ψηφιακή καταγραφή, την ποιότητα των δεδομένων και την αρχική φάση προσαρμογής των χρηστών στο PLEX.

3.10 Περιορισμοί και ζητήματα εγκυρότητας της σύγκρισης

Η συγκριτική αξιολόγηση μεταξύ της περιόδου πριν και μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής παρουσιάζει ορισμένους μεθοδολογικούς περιορισμούς, οι οποίοι πρέπει να ληφθούν υπόψη κατά την ερμηνεία των αποτελεσμάτων. Οι περιορισμοί αυτοί δεν αναιρούν την αξία της ανάλυσης, αλλά βοηθούν στην πιο προσεκτική και τεκμηριωμένη αξιολόγηση των ευρημάτων.

Ο πρώτος περιορισμός σχετίζεται με τη διαφορετική μέθοδο συλλογής δεδομένων στις δύο περιόδους. Στην περίοδο πριν από την εφαρμογή του PLEX, η καταγραφή βασιζόταν σε χειρόγραφες ή ημι-χειροκίνητες πρακτικές, οι οποίες μπορεί να παρουσίαζαν περιορισμούς ως προς την πληρότητα, τη συνέπεια και τη λεπτομέρεια των καταχωρίσεων. Αντίθετα, στην περίοδο μετά την εφαρμογή του PLEX, η ψηφιακή καταγραφή παρέχει μεγαλύτερη δυνατότητα τυποποίησης, χρονικής σήμανσης και αντιστοίχισης των συμβάντων με συγκεκριμένες αιτίες. Η διαφορά αυτή μπορεί να επηρεάσει την εικόνα των δεικτών, καθώς ορισμένες απώλειες που δεν καταγράφονταν συστηματικά στο παρελθόν μπορεί πλέον να αποτυπώνονται με μεγαλύτερη λεπτομέρεια (Jericho et al., 2024; Wang & Pan, 2011).

Ο δεύτερος περιορισμός αφορά την αρχική φάση εφαρμογής του PLEX. Η περίοδος μετά την εφαρμογή του συστήματος περιλαμβάνει και τη φάση προσαρμογής των χειριστών και της παραγωγικής ομάδας στις νέες ψηφιακές διαδικασίες. Κατά το διάστημα αυτό, ενδέχεται να εμφανίστηκαν καθυστερήσεις ή ασυνέπειες που σχετίζονται με τη σωστή επιλογή κωδικών προϊόντος, τη σάρωση υλικών, την αλλαγή της κατάστασης της μηχανής στο σύστημα ή την

επιλογή των κατάλληλων κωδικών αιτιολόγησης. Επομένως, οι δείκτες της ψηφιακής περιόδου πρέπει να ερμηνεύονται λαμβάνοντας υπόψη και την καμπύλη εκμάθησης που συνοδεύει την εισαγωγή ενός νέου πληροφοριακού συστήματος. Η αποδοχή και η ορθή χρήση ενός Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής από τους τελικούς χρήστες αποτελούν σημαντικούς παράγοντες για την επιτυχή αξιοποίησή του στην πράξη (Innecco et al., 2022).

Ο τρίτος περιορισμός αφορά την ποιότητα και την πληρότητα των δεδομένων. Παρότι η ψηφιακή καταγραφή ενισχύει την ιχνηλασιμότητα και την τυποποίηση, η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εξακολουθεί να εξαρτάται από την ορθή χρήση του συστήματος και την πληρότητα των καταχωρίσεων. Η βιβλιογραφία τονίζει ότι η ποιότητα, η συνέπεια και η σωστή ταξινόμηση των δεδομένων αποτελούν βασικές προϋποθέσεις για την αξιόπιστη αξιοποίηση των δεικτών απόδοσης. Ακόμη και σε περιβάλλοντα αυτόματης ή ψηφιακής μέτρησης, η λανθασμένη ή ελλιπής ταξινόμηση των απωλειών μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια του ΟΕΕ (Bianchini et al., 2024; Hedman et al., 2016).

Ο τέταρτος περιορισμός σχετίζεται με την ερμηνεία ακραίων τιμών. Κατά την περίοδο μετά την εφαρμογή του PLEX, εντοπίστηκαν περιπτώσεις στις οποίες η Απόδοση ή η Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού υπερέβαιναν το 100%. Οι τιμές αυτές δεν ερμηνεύτηκαν ως πραγματική λειτουργία της μηχανής πάνω από τη θεωρητική της δυναμικότητα, αλλά ως πιθανές ασυνέπειες χρονικής αντιστοίχισης της παραγωγής. Σε ορισμένες περιπτώσεις, ποσότητες που είχαν παραχθεί σε μία βάρδια μπορούσαν να καταχωριστούν στην επόμενη, λόγω καθυστερημένης ολοκλήρωσης παραγωγικών δηλώσεων ή ελλιπούς σάρωσης υλικών. Το στοιχείο αυτό δείχνει ότι η ψηφιακή καταγραφή, παρότι πιο αναλυτική, εξακολουθεί να επηρεάζεται από τη σωστή εφαρμογή των διαδικασιών από τους χρήστες.

Τέλος, πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η παρούσα εργασία εξετάζει μία συγκεκριμένη μηχανή συναρμολόγησης και δύο συγκεκριμένες χρονικές περιόδους. Συνεπώς, τα αποτελέσματα δεν μπορούν να γενικευθούν άκριτα σε όλες τις γραμμές παραγωγής ή σε όλα τα παραγωγικά συστήματα. Ωστόσο, η μεθοδολογία που εφαρμόζεται μπορεί να αποτελέσει χρήσιμη βάση για αντίστοιχες αναλύσεις σε άλλα παραγωγικά περιβάλλοντα, υπό την προϋπόθεση ότι θα προσαρμοστεί στους αντίστοιχους ορισμούς, διαθέσιμα δεδομένα και λειτουργικά χαρακτηριστικά.

Κεφάλαιο 4. Ανάλυση αποτελεσμάτων και συγκριτική αξιολόγηση πριν και μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής PLEX

4.1 Εισαγωγή και περιγραφή τελικού δείγματος ανάλυσης

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται και αναλύονται τα αποτελέσματα που προέκυψαν από την επεξεργασία των δεδομένων της μελέτης περίπτωσης. Αντικείμενο του κεφαλαίου είναι η συγκριτική αξιολόγηση της παραγωγικής απόδοσης της εξεταζόμενης μηχανής συναρμολόγησης πριν και μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής PLEX.

Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε σε επίπεδο εργασιακής βάρδιας, σύμφωνα με τη μεθοδολογία που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3. Η επιλογή της βάρδιας ως βασικής μονάδας ανάλυσης κρίθηκε απαραίτητη, καθώς επιτρέπει τη σύγκριση των δύο περιόδων σε κοινή βάση, παρά τη διαφοροποίηση του τρόπου καταγραφής των δεδομένων.

Στην περίοδο πριν από την εφαρμογή του PLEX, τα διαθέσιμα δεδομένα είχαν τη μορφή μίας εγγραφής ανά ημερομηνία, βάρδια και μηχανή. Το τελικό δείγμα της περιόδου πριν από την εφαρμογή του συστήματος περιλάμβανε 108 αξιοποιήσιμες εγγραφές βαρδιών για τη μηχανή Flex 3.

Αντίθετα, στην περίοδο μετά την εφαρμογή του PLEX, η αρχική εξαγωγή του συστήματος περιλάμβανε 114 παραγωγικές εγγραφές. Ορισμένες βάρδιες εμφανίζονταν με περισσότερες από μία γραμμές, λόγω παραγωγής διαφορετικών κωδικών προϊόντων εντός της ίδιας βάρδιας. Για λόγους συγκρισιμότητας με την περίοδο πριν από το PLEX, οι εγγραφές της ψηφιακής περιόδου ομαδοποιήθηκαν με βάση την ημερομηνία, τη βάρδια και τη μηχανή. Μετά την ομαδοποίηση προέκυψαν 103 διακριτές παραγωγικές βάρδιες, οι οποίες αποτέλεσαν το τελικό δείγμα ανάλυσης για την περίοδο μετά την εφαρμογή του συστήματος.

Κατά τον έλεγχο των δεδομένων της περιόδου μετά την εφαρμογή του PLEX, εντοπίστηκαν επίσης ακραίες τιμές, όπως περιπτώσεις Απόδοσης άνω του 100% και μία περίπτωση Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού άνω του 100%. Οι τιμές αυτές δεν

αντιμετωπίστηκαν ως απλές αριθμητικές αποκλίσεις, αλλά εξετάστηκαν σε σχέση με τη λειτουργική πραγματικότητα της παραγωγής, την αρχική περίοδο προσαρμογής στο νέο σύστημα και πιθανές ασυνέπειες χρονικής καταχώρισης της παραγωγής.

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων ξεκινά από τη συνολική εικόνα των βασικών δεικτών παραγωγικής απόδοσης και στη συνέχεια επεκτείνεται στην ανάλυση των επιμέρους απωλειών και μεταβλητών. Με τον τρόπο αυτό, η σύγκριση δεν περιορίζεται στη μεταβολή της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού, αλλά εξετάζει και τους παράγοντες που επηρεάζουν τη Διαθεσιμότητα, την Απόδοση, την Ποιότητα και την παραγωγή ανά βάρδια.

4.2 Συγκριτική παρουσίαση βασικών δεικτών απόδοσης

Η πρώτη φάση της ανάλυσης επικεντρώνεται στη σύγκριση των μέσων τιμών των βασικών δεικτών παραγωγικής απόδοσης μεταξύ της περιόδου πριν και μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής PLEX. Στον Πίνακα 7 παρουσιάζονται η Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού, οι τρεις βασικές συνιστώσες της, δηλαδή η Διαθεσιμότητα, η Απόδοση και η Ποιότητα, καθώς και η μέση παραγωγή αποδεκτών τεμαχίων ανά βάρδια.

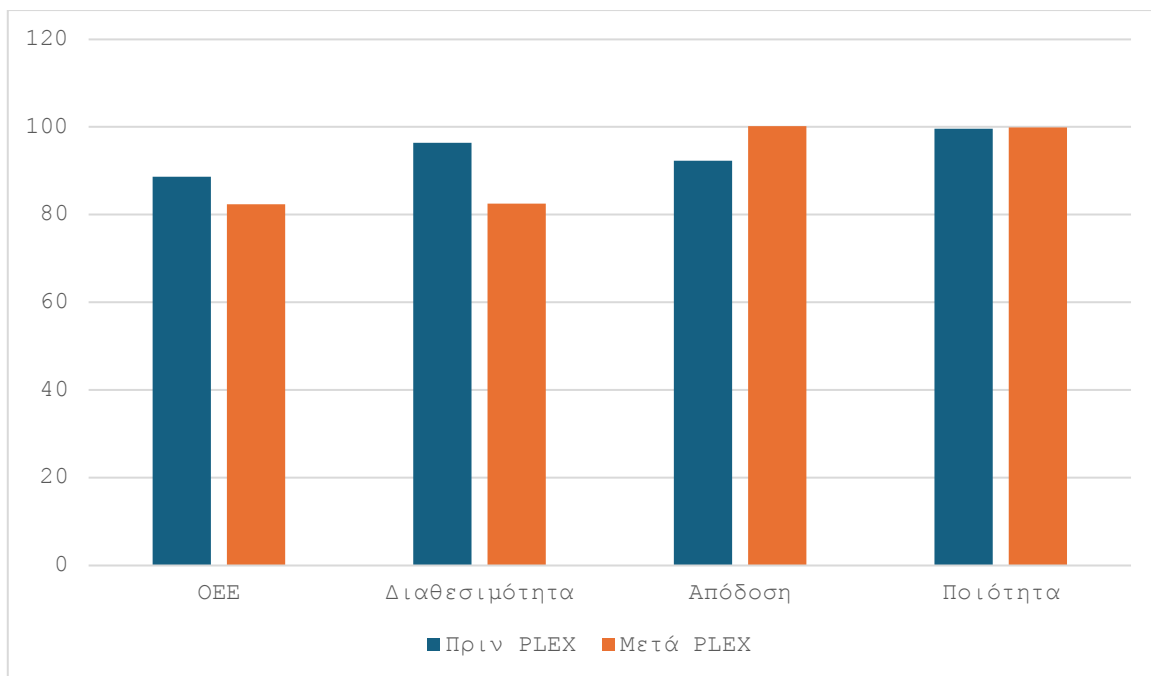
Ο Πίνακας 7 παρουσιάζει τη συνοπτική εικόνα των κεντρικών δεικτών παραγωγικής απόδοσης. Οι υπόλοιποι δείκτες που ορίστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια, όπως οι χρόνοι στάσης, οι τεχνικές βλάβες, το ποσοστό απορρίψεων, η απόδοση πρώτης διέλευσης, ο χρόνος αλλαγής προϊόντος και ο βαθμός χρήσης γραμμής, αναλύονται στις επόμενες ενότητες. Η διάκριση αυτή γίνεται ώστε πρώτα να παρουσιαστεί η συνολική εικόνα και στη συνέχεια να εξεταστούν οι επιμέρους παράγοντες που επηρεάζουν το τελικό αποτέλεσμα.

Οι τιμές του πίνακα αποτελούν μέσες τιμές του τελικού δείγματος ανάλυσης κάθε περιόδου, μετά τον έλεγχο και την επεξεργασία των δεδομένων που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 3. Η Ποιότητα υπολογίζεται ως λόγος των αποδεκτών τεμαχίων προς τα συνολικά παραχθέντα τεμάχια. Η συγκριτική απεικόνιση των βασικών δεικτών παρουσιάζεται στα Διαγράμματα 1, 2 και 3.

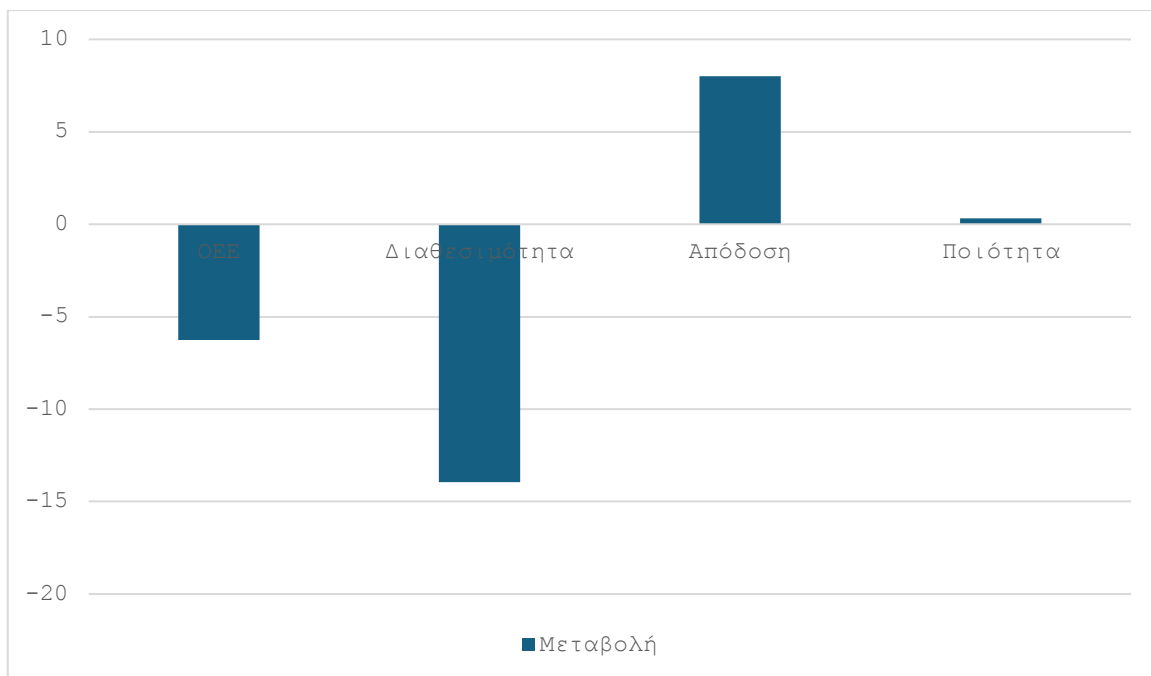
Πίνακας 7. Σύγκριση βασικών παραγωγικών δεικτών μεταξύ της περιόδου πριν και μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής

Κρίσιμος / Βασικός Δείκτης Απόδοσης	Περίοδος πριν από την εφαρμογή του PLEX	Περίοδος μετά την εφαρμογή του PLEX	Απόλυτη μεταβολή
Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού	88,63%	82,37%	-6,26 ποσοστιαίες μονάδες
Διαθεσιμότητα	96,42%	82,48%	-13,94 ποσοστιαίες μονάδες
Απόδοση	92,27%	100,28%	+8,00 ποσοστιαίες μονάδες
Ποιότητα	99,61%	99,92%	+0,31 ποσοστιαίες μονάδες
Αποδεκτά τεμάχια ανά βάρδια	42.831 τεμ.	39.838 τεμ.	-2.992 τεμ.

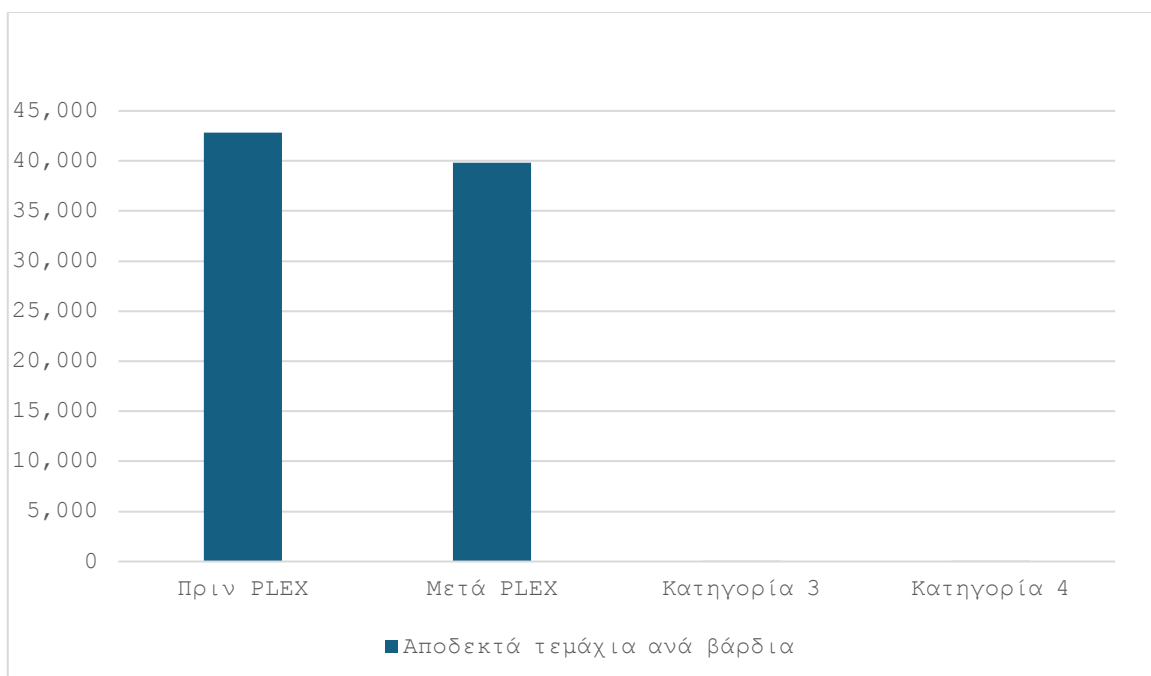
Σημείωση. Για την περίοδο μετά την εφαρμογή του PLEX, οι 114 αρχικές παραγωγικές εγγραφές ομαδοποιήθηκαν σε 103 διακριτές βάρδιες, με βάση την ημερομηνία, τη βάρδια και τη μηχανή, ώστε η σύγκριση με την περίοδο πριν από την εφαρμογή του συστήματος να γίνει στην ίδια μονάδα ανάλυσης.



Διάγραμμα 1. Σύγκριση βασικών δεικτών παραγωγικής απόδοσης πριν και μετά την εφαρμογή του PLEX



Διάγραμμα 2. Απόλυτη μεταβολή βασικών δεικτών παραγωγικής απόδοσης



Διάγραμμα 3. Σύγκριση αποδεκτών τεμαχίων ανά βάρδια πριν και μετά την εφαρμογή του PLEX

Από τα στοιχεία του Πίνακα 7 προκύπτει ότι η μέση Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού μειώθηκε από 88,63% στην περίοδο πριν από την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής σε 82,37% μετά την εφαρμογή του PLEX. Η μείωση αυτή αντιστοιχεί σε 6,26 ποσοστιαίες μονάδες. Το αποτέλεσμα αυτό δεν πρέπει να ερμηνευθεί μόνο ως ένδειξη λιγότερο αποτελεσματικής λειτουργίας της μηχανής, αλλά και σε σχέση με τη μετάβαση από τη χειροκίνητη στην ψηφιακή καταγραφή δεδομένων.

Η σημαντικότερη μεταβολή εντοπίζεται στη Διαθεσιμότητα, η οποία μειώθηκε από 96,42% σε 82,48%. Η μεταβολή αυτή επηρεάζει καθοριστικά τη συνολική τιμή της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού, καθώς η Διαθεσιμότητα αποτελεί μία από τις τρεις βασικές συνιστώσες του δείκτη. Η μείωση μπορεί να συνδέεται με την ακριβέστερη και πιο συστηματική αποτύπωση των χρόνων στάσης μέσω του PLEX, καθώς μικρές στάσεις, αναμονές ή καθυστερήσεις που στην προηγούμενη περίοδο ενδέχεται να μην καταγράφονταν με την ίδια λεπτομέρεια, πλέον αποτυπώνονται πιο οργανωμένα στο ψηφιακό σύστημα.

Για την ερμηνεία του αποτελέσματος αυτού είναι σημαντικό να σημειωθεί ότι οι απρογραμματίστες στάσεις της μηχανής καταγράφονται μέσω της σύνδεσης του PLEX με τον εξοπλισμό, ενώ ορισμένες προγραμματισμένες στάσεις ή επιβεβαιώσεις παραγωγικής κατάστασης απαιτούν χειροκίνητη ενέργεια από τον χρήστη. Επομένως, η ακρίβεια των δεδομένων εξαρτάται τόσο από την τεχνική καταγραφή του συστήματος όσο και από τη σωστή χρήση του από τους χειριστές.

Αντίθετα, η Απόδοση αυξήθηκε από 92,27% σε 100,28%. Το αποτέλεσμα αυτό πρέπει να ερμηνευθεί με προσοχή. Η αύξηση δεν σημαίνει απαραίτητα ότι η γραμμή παρουσίασε πραγματική αύξηση της ταχύτητας λειτουργίας. Μπορεί να συνδέεται με τον τρόπο με τον οποίο το PLEX διαχωρίζει τον χρόνο λειτουργίας από τους χρόνους στάσης. Όταν οι απώλειες χρόνου καταγράφονται ως χρόνοι στάσης και αφαιρούνται από τον χρόνο λειτουργίας, η Απόδοση υπολογίζεται για το διάστημα κατά το οποίο η γραμμή βρίσκεται πράγματι σε παραγωγική λειτουργία. Έτσι, η τιμή 100,28% δείχνει ότι, κατά τον καταγεγραμμένο χρόνο λειτουργίας, η γραμμή λειτούργησε κοντά στον θεωρητικό ή ονομαστικό ρυθμό της, ενώ οι βασικές απώλειες εμφανίζονται κυρίως στη Διαθεσιμότητα.

Η Ποιότητα παρέμεινε σε πολύ υψηλά επίπεδα και στις δύο περιόδους, αυξανόμενη από 99,61% σε 99,92%. Η μικρή αυτή βελτίωση δείχνει ότι οι ποιοτικές απώλειες δεν αποτελούν τον κύριο παράγοντα μείωσης της συνολικής αποτελεσματικότητας. Αντίθετα, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η κύρια επίδραση προέρχεται από τη μείωση της Διαθεσιμότητας και τη χαμηλότερη παραγωγή αποδεκτών τεμαχίων ανά βάρδια.

Τέλος, η παραγωγή αποδεκτών τεμαχίων ανά βάρδια μειώθηκε από 42.831 σε 39.838 τεμάχια. Η μείωση αυτή είναι συμβατή με την υποχώρηση της Διαθεσιμότητας, καθώς ο μειωμένος διαθέσιμος χρόνος παραγωγής οδηγεί σε χαμηλότερη παραγωγική έξοδο, ακόμη και όταν η Απόδοση και η Ποιότητα παραμένουν σε υψηλά επίπεδα. Σημειώνεται ότι, ενώ τα παραγόμενα τεμάχια καταγράφονται από το σύστημα της μηχανής, η επιβεβαίωσή τους ανά βάρδια μπορεί να απαιτεί χειροκίνητη ενέργεια, γεγονός που ενδέχεται να δημιουργεί αποκλίσεις κατά την αρχική περίοδο χρήσης του PLEX.

Συνεπώς, τα αποτελέσματα του Πίνακα 7 δείχνουν ότι η περαιτέρω διερεύνηση πρέπει να επικεντρωθεί κυρίως στους χρόνους στάσης, στις τεχνικές βλάβες, στις αλλαγές προϊόντος και στις λοιπές απώλειες που περιορίζουν τον διαθέσιμο παραγωγικό χρόνο.

4.3 Ερμηνεία της διαφοροποίησης μεταξύ της περιόδου πριν και μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής

Η συγκριτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι, μετά την εφαρμογή του PLEX, η μέση Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού εμφανίζεται μειωμένη σε σχέση με την περίοδο της χειρόγραφης ή ημι-χειροκίνητης καταγραφής. Το εύρημα αυτό χρειάζεται προσεκτική ερμηνεία, καθώς δεν πρέπει να θεωρηθεί αυτόματα ως πραγματική υποβάθμιση της παραγωγικής ικανότητας της γραμμής. Αντίθετα, πρέπει να εξεταστεί σε σχέση με τη μεταβολή του τρόπου καταγραφής, την αυξημένη ορατότητα των απωλειών και την αρχική περίοδο προσαρμογής των χρηστών στο νέο σύστημα.

Κατά την περίοδο πριν από την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής, η καταγραφή των χρόνων στάσης και των αιτιών απωλειών βασιζόταν σε χειρόγραφες ή ημι-χειροκίνητες πρακτικές. Σε τέτοιες συνθήκες, σύντομες στάσεις, μικροδιακοπές, αναμονές

υλικών ή οργανωτικές καθυστερήσεις ενδέχεται να μην καταγράφονταν με την ίδια λεπτομέρεια ή να ομαδοποιούνταν σε γενικότερες κατηγορίες. Ως αποτέλεσμα, η Διαθεσιμότητα μπορούσε να εμφανίζεται υψηλότερη, όχι απαραίτητα επειδή η γραμμή λειτουργούσε χωρίς απώλειες, αλλά επειδή μέρος των απωλειών δεν αποτυπωνόταν πλήρως στα δεδομένα.

Με την εισαγωγή του PLEX, η παραγωγική λειτουργία καταγράφεται με πιο τυποποιημένο και συστηματικό τρόπο. Η χρήση χρονικών σημάνσεων, καταστάσεων μηχανής και κωδικών αιτιολόγησης επιτρέπει την καλύτερη αντιστοίχιση των χρόνων στάσης με συγκεκριμένες αιτίες και χρονικά διαστήματα. Η βιβλιογραφία αναφέρει ότι τα Συστήματα Εκτέλεσης Παραγωγής μπορούν να ενισχύσουν την παρακολούθηση της παραγωγής και την ανάπτυξη δεικτών απόδοσης, καθώς μετατρέπουν τα πρωτογενή δεδομένα σε πιο οργανωμένη και αξιοποιήσιμη πληροφορία (Bianchini et al., 2024). Παράλληλα, η αυτοματοποιημένη συλλογή δεδομένων μπορεί να βελτιώσει την πληρότητα και την ακρίβεια των δεδομένων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του OEE (Jericho et al., 2024; Wang & Pan, 2011).

Ωστόσο, η ψηφιακή καταγραφή δεν εξαλείφει πλήρως την ανάγκη ελέγχου και σωστής ερμηνείας των δεδομένων. Η αξιοπιστία των δεικτών εξακολουθεί να εξαρτάται από τη σωστή ταξινόμηση των απωλειών, την ορθή συμπλήρωση των απαιτούμενων πεδίων και την ενιαία χρήση του συστήματος από τους χειριστές. Έχει επισημανθεί στη βιβλιογραφία ότι ακόμη και σε συστήματα αυτόματης μέτρησης, η ελλιπής ή ασαφής ταξινόμηση των απωλειών μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια του OEE (Bianchini et al., 2024; Hedman et al., 2016).

Στην παρούσα περίπτωση, η περίοδος μετά την εφαρμογή του PLEX συμπίπτει με την αρχική φάση χρήσης του συστήματος. Κατά το διάστημα αυτό, οι χειριστές και η παραγωγική ομάδα βρίσκονταν ακόμη σε διαδικασία εξοικείωσης με τις νέες ψηφιακές διαδικασίες. Η σωστή επιλογή κωδικού προϊόντος, η έγκαιρη σάρωση υλικών, η αλλαγή της κατάστασης της μηχανής στο σύστημα και η επιλογή κατάλληλου κωδικού αιτιολόγησης στάσης αποτελούν ενέργειες που απαιτούν εκπαίδευση, συνέπεια και τυποποίηση. Η αποδοχή και η ορθή χρήση ενός Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής από τους τελικούς χρήστες αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την επιτυχή αξιοποίησή του στην πράξη (Innecco et al., 2022).

Υπό αυτό το πρίσμα, η χαμηλότερη τιμή της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού μετά την εφαρμογή του PLEX μπορεί να θεωρηθεί σημαντικό εύρημα. Δεν δείχνει απαραίτητα ότι η γραμμή λειτουργεί χειρότερα, αλλά ότι οι απώλειες χρόνου αποτυπώνονται πλέον με μεγαλύτερη λεπτομέρεια και συστηματικότητα. Η αξία του συστήματος δεν περιορίζεται στην παραγωγή ενός τελικού αριθμητικού δείκτη, αλλά συνδέεται με τη δυνατότητα εντοπισμού, ταξινόμησης και ιεράρχησης των πραγματικών πηγών απώλειας.

Συνεπώς, η μείωση της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού πρέπει να ερμηνευθεί σε συνδυασμό με τη μείωση της Διαθεσιμότητας, την καλύτερη αποτύπωση των χρόνων στάσης και την αρχική περίοδο προσαρμογής στο PLEX. Η επόμενη ενότητα συνοψίζει τα κύρια ευρήματα που προκύπτουν από τη σύγκριση των βασικών δεικτών και αναδεικνύει τα σημεία στα οποία πρέπει να επικεντρωθεί η περαιτέρω ανάλυση.

4.4 Κύρια ευρήματα από τη σύγκριση των δεικτών

Από τη σύγκριση των Κρίσιμων / Βασικών Δεικτών Απόδοσης μεταξύ των δύο περιόδων προκύπτουν τέσσερα βασικά ευρήματα, τα οποία βοηθούν στην κατανόηση της παραγωγικής συμπεριφοράς της γραμμής και στην ιεράρχηση των επόμενων ενεργειών βελτίωσης.

Πρώτον, η σημαντικότερη μεταβολή εντοπίζεται στη Διαθεσιμότητα. Η Διαθεσιμότητα μειώθηκε από 96,42% σε 82,48%, γεγονός που δείχνει ότι οι απώλειες διαθέσιμου παραγωγικού χρόνου αποτελούν τον κύριο παράγοντα που επηρεάζει τη Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού της μηχανής. Οι απρογραμματίστες στάσεις, οι τεχνικές βλάβες, οι καθυστερήσεις, οι αναμονές υλικών και οι αλλαγές προϊόντος πρέπει επομένως να διερευνηθούν αναλυτικότερα, ώστε να εντοπιστούν οι σημαντικότερες αιτίες μη διαθεσιμότητας.

Δεύτερον, η Απόδοση εμφανίζεται αυξημένη και φτάνει στο 100,28%. Το αποτέλεσμα αυτό δεν πρέπει να ερμηνευθεί ως ανεξάρτητη βελτίωση της ταχύτητας λειτουργίας της μηχανής. Αντίθετα, πρέπει να εξεταστεί σε συνδυασμό με τον τρόπο καταγραφής των χρόνων λειτουργίας και στάσης. Όταν οι απώλειες χρόνου καταγράφονται πιο συστηματικά ως χρόνοι στάσης, ο δείκτης της Απόδοσης υπολογίζεται για το χρονικό διάστημα κατά το οποίο η μηχανή

βρίσκεται πράγματι σε παραγωγική λειτουργία. Επομένως, το εύρημα δείχνει ότι, όταν η μηχανή λειτουργεί, προσεγγίζει τον θεωρητικό ή ονομαστικό ρυθμό της, ενώ οι κύριες απώλειες συγκεντρώνονται κυρίως στον διαθέσιμο παραγωγικό χρόνο.

Τρίτον, η Ποιότητα παραμένει σε πολύ υψηλά επίπεδα και στις δύο περιόδους. Η αύξηση από 99,61% σε 99,92% είναι μικρή και δείχνει ότι οι απορρίψεις και τα ελαττωματικά τεμάχια δεν αποτελούν τον βασικό περιοριστικό παράγοντα της γραμμής. Το εύρημα αυτό είναι σημαντικό, καθώς δείχνει ότι η μείωση της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού δεν προέρχεται κυρίως από ποιοτικές απώλειες, αλλά από παράγοντες που επηρεάζουν τη Διαθεσιμότητα.

Τέταρτον, η παραγωγή αποδεκτών τεμαχίων ανά βάρδια μειώνεται σε συμφωνία με τη μείωση της Διαθεσιμότητας. Η μέση παραγωγή αποδεκτών τεμαχίων μειώθηκε κατά 2.992 τεμάχια ανά βάρδια. Η μείωση αυτή είναι συμβατή με τον περιορισμό του διαθέσιμου παραγωγικού χρόνου, καθώς λιγότερος χρόνος πραγματικής παραγωγικής λειτουργίας οδηγεί σε χαμηλότερη παραγωγική έξοδο, ακόμη και όταν η Απόδοση και η Ποιότητα παραμένουν σε υψηλά επίπεδα.

Συνολικά, τα ευρήματα δείχνουν ότι η βασική περιοχή διερεύνησης και βελτίωσης αφορά τη μείωση των απωλειών χρόνου και την καλύτερη κατανόηση των αιτιών μη διαθεσιμότητας. Η ψηφιακή καταγραφή μέσω του PLEX παρέχει τη δυνατότητα πιο αναλυτικής αποτύπωσης των απωλειών, όμως η αξιοποίηση αυτής της πληροφορίας απαιτεί σωστή ταξινόμηση των στάσεων, πληρότητα καταχωρίσεων και σταθερή χρήση του συστήματος από τους χειριστές. Η επόμενη ενότητα εστιάζει αναλυτικότερα στους χρόνους στάσης και στις επιμέρους κατηγορίες απωλειών, ώστε να προσδιοριστούν οι κύριοι παράγοντες που επηρεάζουν τη λειτουργία της γραμμής.

4.5 Ανάλυση χρόνων στάσης και βασικών απωλειών

Η μείωση της Διαθεσιμότητας που παρουσιάστηκε στις προηγούμενες ενότητες καθιστά απαραίτητη την αναλυτικότερη διερεύνηση των χρόνων στάσης. Δεδομένου ότι η Διαθεσιμότητα αποτελεί τη συνιστώσα της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού με τη μεγαλύτερη μεταβολή μεταξύ των δύο περιόδων, η ανάλυση των στάσεων είναι κρίσιμη για την κατανόηση των παραγόντων που επηρεάζουν τη λειτουργία της γραμμής.

Στην περίοδο πριν από την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής, οι χρόνοι στάσης καταγράφονταν μέσω χειρόγραφων ή ημι-χειροκίνητων πρακτικών. Η προσέγγιση αυτή παρείχε μια συνολική εικόνα των βασικών απωλειών, αλλά ενδέχεται να περιόριζε τη λεπτομέρεια με την οποία αποτυπώνονταν μικρότερες στάσεις, επαναλαμβανόμενες καθυστερήσεις ή σύντομα συμβάντα. Αντίθετα, μετά την εφαρμογή του PLEX, οι χρόνοι στάσης αποτυπώνονται με πιο συστηματικό τρόπο, μέσω χρονικών καταγραφών, καταστάσεων μηχανής και κωδικών αιτιολόγησης.

Η διαφοροποίηση αυτή είναι σημαντική, καθώς η αύξηση ή η καλύτερη αποτύπωση των χρόνων στάσης μετά την εφαρμογή του PLEX δεν σημαίνει απαραίτητα ότι η μηχανή παρουσίασε περισσότερα τεχνικά προβλήματα. Μπορεί επίσης να δείχνει ότι το νέο σύστημα κατέγραψε με μεγαλύτερη ακρίβεια απώλειες που στην προηγούμενη περίοδο δεν αποτυπώνονταν με την ίδια πληρότητα. Η βιβλιογραφία αναφέρει ότι η αυτοματοποιημένη ή ψηφιακή συλλογή δεδομένων μπορεί να βελτιώσει την ακρίβεια των στοιχείων που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του OEE, αλλά η τελική αξιοπιστία εξαρτάται από τη σωστή ταξινόμηση και ερμηνεία των απωλειών (Hedman et al., 2016; Wang & Pan, 2011).

Στον Πίνακα 8 παρουσιάζονται οι βασικές κατηγορίες χρόνων στάσης που εξετάστηκαν στην παρούσα εργασία. Η παρουσίαση των κατηγοριών αυτών βοηθά στον εντοπισμό των σημαντικότερων πηγών απώλειας διαθέσιμου παραγωγικού χρόνου.

Από την ανάλυση των χρόνων στάσης θα πρέπει να εξεταστεί ποια κατηγορία εμφανίζει τη μεγαλύτερη επίδραση στη Διαθεσιμότητα. Εάν η αύξηση των στάσεων συγκεντρώνεται κυρίως σε τεχνικές βλάβες, τότε η βασική περιοχή βελτίωσης συνδέεται με τη συντήρηση, τη σταθερότητα του εξοπλισμού και την πρόληψη επαναλαμβανόμενων αστοχιών. Εάν η αύξηση

εντοπίζεται κυρίως σε αλλαγές προϊόντος, ρυθμίσεις ή αναμονές υλικών, τότε η ερμηνεία στρέφεται περισσότερο σε οργανωτικούς και διαδικαστικούς παράγοντες.

Πίνακας 8. Σύγκριση βασικών κατηγοριών χρόνων στάσης πριν και μετά την εφαρμογή του PLEX

Κατηγορία στάσης	Περίοδος πριν από την εφαρμογή του PLEX	Περίοδος μετά την εφαρμογή του PLEX	Μεταβολή	Παρατήρηση
Τεχνικές βλάβες	12,69 λεπτά/βάρδια	Μη διαθέσιμο σε διακριτή κατηγορία	Δεν υπολογίστηκε	Πριν από το PLEX υπολογίστηκε από τον χρόνο μηχανικού και ηλεκτρολόγου.
Ρυθμίσεις / μικρορυθμίσεις	Δεν καταγράφηκε διακριτά	Μη διαθέσιμο σε διακριτή κατηγορία	Δεν υπολογίστηκε	Δεν υπήρχε κοινός και συγκρίσιμος ορισμός στα δύο αρχεία.
Αλλαγές προϊόντος	0,88 λεπτά/βάρδια	Μη διαθέσιμο σε διακριτή κατηγορία	Δεν υπολογίστηκε	Μετά το PLEX εμφανίζεται ο κωδικός προϊόντος, όχι όμως ξεχωριστός χρόνος αλλαγής προϊόντος.
Αναμονή υλικών	0,09 λεπτά/βάρδια	Μη διαθέσιμο σε διακριτή κατηγορία	Δεν υπολογίστηκε	Πριν από το PLEX υπήρχε πεδίο για χρόνο Α' υλών, ενώ στο διαθέσιμο αρχείο PLEX δεν υπάρχει αντίστοιχη ξεχωριστή αιτία.

Κατηγορία στάσης	Περίοδος πριν από την εφαρμογή του PLEX	Περίοδος μετά την εφαρμογή του PLEX	Μεταβολή	Παρατήρηση
Καθαρισμός / προετοιμασία	15,19 λεπτά/βάρδια	Μη διαθέσιμο σε διακριτή κατηγορία	Δεν υπολογίστηκε	Μετά το PLEX υπάρχει συνολικός προγραμματισμένος χρόνος διακοπής, χωρίς ανάλυση ειδικά σε καθαρισμό / προετοιμασία.
Λοιπές απρογραμμάτιστες στάσεις	3,24 λεπτά/βάρδια	Μη διαθέσιμο σε διακριτή κατηγορία	Δεν υπολογίστηκε	Πριν από το PLEX υπήρχε πεδίο «Άλλες καθυστερήσεις», χωρίς άμεσο αντίστοιχο στο διαθέσιμο αρχείο μετά το PLEX.
Συνολικός χρόνος στάσεων	16,90 λεπτά/βάρδια	89,25 λεπτά/βάρδια	+72,35 λεπτά/βάρδια	Η σύγκριση πραγματοποιείται μόνο σε επίπεδο συνολικού απρογραμμάτιστου χρόνου στάσης.

Από τον Πίνακα 8 προκύπτει ότι η άμεση σύγκριση των επιμέρους κατηγοριών στάσης μεταξύ των δύο περιόδων δεν είναι πλήρως εφικτή, καθώς τα διαθέσιμα αρχεία δεν ακολουθούν την ίδια δομή κατηγοριοποίησης. Στην περίοδο πριν από την εφαρμογή του PLEX υπήρχαν ξεχωριστά πεδία για συγκεκριμένες αιτίες καθυστέρησης, όπως χρόνος μηχανικού, χρόνος ηλεκτρολόγου, χρόνος αλλαγής προϊόντος, χρόνος Α' υλών και άλλες καθυστερήσεις.

Αντίθετα, στην περίοδο μετά την εφαρμογή του PLEX, το διαθέσιμο αρχείο παρείχε κυρίως συνολικό χρόνο στάσης, χωρίς πλήρη ανάλυση στις ίδιες επιμέρους κατηγορίες.

Για τον λόγο αυτό, η ποσοτική σύγκριση των στάσεων πραγματοποιήθηκε κυρίως σε επίπεδο συνολικού χρόνου στάσης ανά βάρδια. Η αύξηση του συνολικού χρόνου στάσεων μετά την εφαρμογή του PLEX δεν ερμηνεύεται απαραίτητα ως πραγματική επιδείνωση της λειτουργίας της μηχανής, αλλά συνδέεται και με την ακριβέστερη αποτύπωση των απωλειών από το ψηφιακό σύστημα, σε σύγκριση με την προηγούμενη περίοδο χειροκίνητης ή λιγότερο αναλυτικής καταγραφής.

Σημείωση. Οι τιμές εκφράζονται ως μέσος χρόνος ανά βάρδια. Για την περίοδο μετά την εφαρμογή του PLEX, το διαθέσιμο αρχείο εξαγωγής περιλάμβανε συνολικό χρόνο στάσης, χωρίς πλήρη ανάλυση των επιμέρους αιτιών στάσης στις ίδιες κατηγορίες που υπήρχαν στην προηγούμενη περίοδο. Για τον λόγο αυτό, η ποσοτική σύγκριση πραγματοποιήθηκε μόνο στον συνολικό χρόνο στάσεων, ενώ οι επιμέρους κατηγορίες παρουσιάζονται ως μη πλήρως συγκρίσιμες

Ιδιαίτερη σημασία έχει και η κατηγοριοποίηση των στάσεων στο PLEX. Η επιλογή σωστού κωδικού αιτιολόγησης από τον χειριστή επηρεάζει άμεσα την αξιοπιστία της ανάλυσης, καθώς μία στάση που καταχωρίζεται σε γενική ή λανθασμένη κατηγορία δυσκολεύει τον εντοπισμό της πραγματικής αιτίας. Το στοιχείο αυτό είναι κρίσιμο, διότι η αξία της ψηφιακής καταγραφής δεν βρίσκεται μόνο στη συλλογή περισσότερων δεδομένων, αλλά κυρίως στη δυνατότητα σωστής ταξινόμησης και αξιοποίησής τους.

Συνεπώς, η ανάλυση των χρόνων στάσης δείχνει ότι η μείωση της Διαθεσιμότητας πρέπει να εξεταστεί όχι μόνο ως αριθμητική μεταβολή, αλλά και ως αποτέλεσμα της πιο αναλυτικής αποτύπωσης των απωλειών μετά την εφαρμογή του PLEX. Η περαιτέρω αξιοποίηση των δεδομένων του συστήματος μπορεί να βοηθήσει στην ιεράρχηση των κυριότερων αιτιών στάσης και στον σχεδιασμό στοχευμένων ενεργειών βελτίωσης.

4.6 Ανάλυση Ποιότητας, απορρίψεων και παραγωγής ανά βάρδια

Μετά την ανάλυση των χρόνων στάσης, εξετάζονται οι δείκτες που σχετίζονται με την Ποιότητα, τις απορρίψεις και την παραγωγή αποδεκτών τεμαχίων ανά βάρδια. Η ανάλυση αυτή είναι απαραίτητη, καθώς η Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού δεν επηρεάζεται μόνο από τη Διαθεσιμότητα, αλλά και από την Απόδοση και την Ποιότητα.

Όπως παρουσιάστηκε στον Πίνακα 7, η Ποιότητα παρέμεινε σε ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα και στις δύο περιόδους. Συγκεκριμένα, αυξήθηκε από 99,61% πριν από την εφαρμογή του PLEX σε 99,92% μετά την εφαρμογή του συστήματος. Η μεταβολή αυτή είναι μικρή, μόλις 0,31 ποσοστιαίες μονάδες, και δείχνει ότι οι ποιοτικές απώλειες δεν αποτελούν τον κύριο παράγοντα που επηρεάζει αρνητικά τη συνολική απόδοση της γραμμής.

Το εύρημα αυτό είναι σημαντικό, διότι δείχνει ότι η μείωση της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού δεν προέρχεται κυρίως από αύξηση των απορρίψεων ή των ελαττωματικών τεμαχίων. Αντίθετα, η γραμμή φαίνεται να διατηρεί υψηλό επίπεδο ποιότητας, ενώ οι βασικές απώλειες εντοπίζονται περισσότερο στον διαθέσιμο παραγωγικό χρόνο και στη μείωση της παραγωγής ανά βάρδια.

Η παραγωγή αποδεκτών τεμαχίων ανά βάρδια μειώθηκε από 42.831 τεμάχια στην περίοδο πριν από την εφαρμογή του PLEX σε 39.838 τεμάχια μετά την εφαρμογή του συστήματος. Η μείωση αυτή αντιστοιχεί σε 2.992 λιγότερα αποδεκτά τεμάχια ανά βάρδια. Το αποτέλεσμα είναι συμβατό με τη μείωση της Διαθεσιμότητας, καθώς λιγότερος διαθέσιμος χρόνος παραγωγής οδηγεί σε μικρότερη παραγωγική έξοδο, ακόμη και όταν η Ποιότητα παραμένει υψηλή.

Για την ερμηνεία του αποτελέσματος πρέπει να ληφθεί υπόψη ότι η παραγωγή αποδεκτών τεμαχίων επηρεάζεται από περισσότερους από έναν παράγοντες. Δεν εξαρτάται μόνο από την ποιότητα του τελικού προϊόντος, αλλά και από τον χρόνο κατά τον οποίο η μηχανή είναι διαθέσιμη, από τον ρυθμό λειτουργίας της, από τις αλλαγές προϊόντος, από τις αναμονές υλικών και από την ορθότητα των παραγωγικών καταχωρίσεων στο σύστημα.

Στην περίοδο μετά την εφαρμογή του PLEX, η ψηφιακή καταγραφή δίνει τη δυνατότητα καλύτερης παρακολούθησης των ποσοτικών και ποιοτικών δεδομένων. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε και στις προηγούμενες ενότητες, η επιβεβαίωση της παραγωγής και η σωστή

αντιστοίχιση των παραχθέντων τεμαχίων στη σωστή βάρδια εξακολουθούν να επηρεάζονται από τη χρήση του συστήματος από τους χειριστές. Καθυστερημένες δηλώσεις παραγωγής ή ελλειπείς σαρώσεις υλικών μπορούν να μεταφέρουν μέρος της παραγωγής από μία βάρδια στην επόμενη και να επηρεάσουν προσωρινά την εικόνα της παραγωγής ανά βάρδια.

Στον Πίνακα 9 παρουσιάζεται η σύγκριση των βασικών δεικτών που σχετίζονται με την Ποιότητα και την παραγωγή αποδεκτών τεμαχίων.

Πίνακας 9. Σύγκριση δεικτών Ποιότητας, απορρίψεων και παραγωγής ανά βάρδια

Δείκτης ποιότητας	Περίοδος πριν από την εφαρμογή του PLEX	Περίοδος μετά την εφαρμογή του PLEX	Μεταβολή	Παρατήρηση
Ποιότητα	99,61%	99,92%	+0,31 ποσοστιαίες μονάδες	Η Ποιότητα παρέμεινε σε πολύ υψηλό επίπεδο και στις δύο περιόδους.
Αποδεκτά τεμάχια ανά βάρδια	42.831 τεμ.	39.838 τεμ.	-2.992 τεμ.	Η μείωση συνδέεται κυρίως με τη χαμηλότερη Διαθεσιμότητα και όχι με υποβάθμιση της ποιότητας.
Ποσοστό απορρίψεων	0,39%	0,08%	-0,31 ποσοστιαίες μονάδες	Το ποσοστό απορρίψεων μειώθηκε μετά την εφαρμογή του PLEX.

Δείκτης ποιότητας	Περίοδος πριν από την εφαρμογή του PLEX	Περίοδος μετά την εφαρμογή του PLEX	Μεταβολή	Παρατήρηση
Απόδοση πρώτης διέλευσης	Δεν υπολογίστηκε διακριτά	Δεν υπολογίστηκε διακριτά	Δεν υπολογίστηκε	Δεν υπήρχε πλήρως συγκρίσιμο πεδίο επανακατεργασιών / πρώτης διέλευσης στα δύο διαθέσιμα αρχεία.

Σημείωση. Η Ποιότητα υπολογίστηκε ως λόγος των αποδεκτών τεμαχίων προς τα συνολικά παραχθέντα τεμάχια. Η Απόδοση πρώτης διέλευσης δεν υπολογίστηκε ως ανεξάρτητος δείκτης, καθώς τα διαθέσιμα αρχεία δεν περιλάμβαναν πλήρως συγκρίσιμα δεδομένα επανακατεργασιών και πρώτης διέλευσης για τις δύο περιόδους.

Από τον Πίνακα 9 φαίνεται ότι ο δείκτης Ποιότητας παρέμεινε ιδιαίτερα υψηλός και στις δύο περιόδους. Η μικρή αύξηση της Ποιότητας μετά την εφαρμογή του PLEX δείχνει ότι η μείωση της συνολικής παραγωγικής απόδοσης δεν οφείλεται σε υποβάθμιση της ποιότητας των παραγόμενων τεμαχίων. Αντίθετα, η μείωση των αποδεκτών τεμαχίων ανά βάρδια φαίνεται να συνδέεται κυρίως με τη μείωση της Διαθεσιμότητας και την αύξηση των καταγεγραμμένων χρόνων στάσης.

Παράλληλα, το ποσοστό απορρίψεων εμφανίζεται μειωμένο στην περίοδο μετά την εφαρμογή του PLEX. Ωστόσο, η Απόδοση πρώτης διέλευσης δεν υπολογίστηκε ως ανεξάρτητος δείκτης, καθώς τα διαθέσιμα δεδομένα δεν περιλάμβαναν πλήρως συγκρίσιμη πληροφορία για επανακατεργασίες ή για διάκριση πρώτης διέλευσης στις δύο περιόδους.

Η Απόδοση πρώτης διέλευσης δεν παρουσιάζεται ποσοτικά, καθώς τα διαθέσιμα δεδομένα δεν επέτρεπαν πλήρως συγκρίσιμο υπολογισμό του δείκτη μεταξύ των δύο περιόδων. Αντίθετα, το ποσοστό απορρίψεων υπολογίστηκε και παρουσιάζεται συγκριτικά, καθώς υπήρχαν

διαθέσιμα και αντιστοιχίσιμα στοιχεία για τα απορριπτόμενα και τα συνολικά παραχθέντα τεμάχια.

Από τα παραπάνω προκύπτει ότι η Ποιότητα δεν αποτελεί την κύρια αιτία της μείωσης της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού. Αντίθετα, η μείωση της παραγωγής αποδεκτών τεμαχίων ανά βάρδια συνδέεται κυρίως με τη χαμηλότερη Διαθεσιμότητα και με τη μείωση του διαθέσιμου χρόνου παραγωγής. Επομένως, οι ενέργειες βελτίωσης πρέπει να επικεντρωθούν κυρίως στη μείωση των χρόνων στάσης, στη σωστή ταξινόμηση των αιτιών απώλειας και στη σταθεροποίηση της χρήσης του PLEX από τους χειριστές.

4.7 Στατιστική σύγκριση των δύο περιόδων

Για την περαιτέρω διερεύνηση των διαφορών μεταξύ της περιόδου πριν και μετά την εφαρμογή του PLEX πραγματοποιήθηκε επαγωγική στατιστική ανάλυση των βασικών δεικτών παραγωγικής απόδοσης. Η ανάλυση βασίστηκε σε 108 εργασιακές βάρδιες για την περίοδο πριν από το PLEX και σε 103 διακριτές εργασιακές βάρδιες για την περίοδο μετά την εφαρμογή του συστήματος.

Ο έλεγχος κανονικότητας Shapiro–Wilk έδειξε στατιστικά σημαντική απόκλιση από την κανονική κατανομή για τους περισσότερους δείκτες και στις δύο περιόδους ($p < 0,05$). Εξαίρεση αποτέλεσε η Απόδοση στην περίοδο πριν από το PLEX, για την οποία δεν διαπιστώθηκε στατιστικά σημαντική απόκλιση από την κανονικότητα ($p = 0,390$). Για τον λόγο αυτό, η κύρια σύγκριση πραγματοποιήθηκε με τον έλεγχο t του Welch για ανεξάρτητα δείγματα, ενώ συμπληρωματικά εφαρμόστηκε ο μη παραμετρικός έλεγχος Mann–Whitney U. Τα συμπεράσματα του μη παραμετρικού ελέγχου ήταν συνεπή με εκείνα του ελέγχου Welch.

Πίνακας 10. Αποτελέσματα στατιστικής σύγκρισης των βασικών δεικτών πριν και μετά την εφαρμογή του PLEX

Δείκτης	Πριν PLEX, μέση±SD	Μετά PLEX, μέση±SD	Διαφο ρά	95% ΔΕ διαφοράς	p (Welch)	Hedg es' g
ΟΕΕ	88,63±6,09%	82,37±10,90%	-6,26 π.μ.	-8,67 έως -3,84	<0,0 01	-0,71
Διαθεσιμότη τα	96,42±5,41%	82,48±11,51%	-13,94 π.μ.	-16,41 έως -11,47	<0,0 01	-1,56
Απόδοση	92,27±3,67%	100,28±6,20%	+8,00 π.μ.	+6,61 έως +9,39	<0,0 01	+1,58
Ποιότητα	99,61±0,23%	99,92±0,13%	+0,31 π.μ.	+0,26 έως +0,36	<0,0 01	+1,61
Αποδεκτά τεμάχια/βάρδι α	42.830,59±8.3 28,18	39.838,38±9.2 52,69	-2.991 ,21	-5.385 ,47 έως -598,96	0,01 5	-0,34

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι διαφορές μεταξύ των δύο περιόδων είναι στατιστικά σημαντικές για όλους τους εξεταζόμενους δείκτες. Η μεγαλύτερη αρνητική μεταβολή εντοπίζεται στη Διαθεσιμότητα, η οποία μειώθηκε κατά 13,94 ποσοστιαίες μονάδες ($p<0,001$), με ιδιαίτερα μεγάλο τυποποιημένο μέγεθος επίδρασης (Hedges' $g=-1,56$). Η μείωση αυτή συνοδεύεται από στατιστικά σημαντική μείωση του ΟΕΕ κατά 6,26 ποσοστιαίες μονάδες ($p<0,001$, $g=-0,71$).

Αντίθετα, η Απόδοση παρουσίασε αύξηση κατά 8,00 ποσοστιαίες μονάδες ($p<0,001$), ενώ η Ποιότητα αυξήθηκε κατά 0,31 ποσοστιαίες μονάδες ($p<0,001$). Παρότι η μεταβολή της Ποιότητας είναι στατιστικά σημαντική, το απόλυτο μέγεθός της είναι μικρό και ο δείκτης παρέμεινε σε ιδιαίτερα υψηλά επίπεδα και στις δύο περιόδους. Το μεγάλο τυποποιημένο μέγεθος επίδρασης που προκύπτει για την Ποιότητα συνδέεται και με τη μικρή διασπορά των

τιμών του συγκεκριμένου δείκτη και επομένως δεν πρέπει να ερμηνεύεται ως αντίστοιχα μεγάλη λειτουργική μεταβολή.

Τέλος, η μέση παραγωγή αποδεκτών τεμαχίων μειώθηκε κατά περίπου 2.992 τεμάχια ανά βάρδια, με τη διαφορά να είναι επίσης στατιστικά σημαντική ($p=0,015$), αλλά με μικρότερο μέγεθος επίδρασης ($g=-0,34$). Συνολικά, η επαγωγική στατιστική ανάλυση ενισχύει το εύρημα ότι η σημαντικότερη διαφοροποίηση μεταξύ των δύο περιόδων αφορά τη Διαθεσιμότητα και, κατ' επέκταση, το ΟΕΕ. Ωστόσο, λόγω του μη πειραματικού σχεδιασμού της μελέτης και της διαφοροποίησης του τρόπου συλλογής των δεδομένων πριν και μετά το PLEX, η στατιστική σημαντικότητα των διαφορών δεν πρέπει να ερμηνεύεται από μόνη της ως αιτιώδης επίδραση της εφαρμογής του συστήματος.

4.8 Συνολική αποτίμηση των αποτελεσμάτων

Η συνολική ανάλυση των αποτελεσμάτων δείχνει ότι η μετάβαση από τη χειροκίνητη ή ημι-χειροκίνητη καταγραφή στο Σύστημα Εκτέλεσης Παραγωγής PLEX δεν πρέπει να αξιολογηθεί μόνο με βάση την τελική αριθμητική μεταβολή της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού. Παρότι ο δείκτης εμφανίζεται μειωμένος μετά την εφαρμογή του συστήματος, η μεταβολή αυτή πρέπει να εξεταστεί σε συνδυασμό με τον διαφορετικό τρόπο καταγραφής, την καλύτερη αποτύπωση των χρόνων στάσης και την αρχική φάση προσαρμογής των χρηστών στο νέο περιβάλλον καταχώρισης.

Το βασικότερο εύρημα της ανάλυσης είναι ότι η κύρια μεταβολή εντοπίζεται στη Διαθεσιμότητα. Η επαγωγική στατιστική ανάλυση επιβεβαίωσε ότι η μείωση αυτή είναι στατιστικά σημαντική ($p<0,001$) και συνοδεύεται από μεγάλο μέγεθος επίδρασης (Hedges' $g=-1,56$). Αντίστοιχα, η μείωση του ΟΕΕ ήταν επίσης στατιστικά σημαντική ($p<0,001$), με μέγεθος επίδρασης $g=-0,71$. Η μείωση της Διαθεσιμότητας επηρεάζει άμεσα τη Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού και δείχνει ότι οι σημαντικότερες απώλειες σχετίζονται με τον διαθέσιμο παραγωγικό χρόνο. Επομένως, η περαιτέρω διερεύνηση πρέπει να επικεντρωθεί στις αιτίες στάσης, στις τεχνικές βλάβες, στις αλλαγές προϊόντος, στις αναμονές υλικών και στις λοιπές καθυστερήσεις που περιορίζουν τη λειτουργία της γραμμής.

Η Απόδοση και η Ποιότητα παρουσίασαν στατιστικά σημαντικές αυξήσεις μετά την εφαρμογή του PLEX ($p < 0,001$ και για τους δύο δείκτες), χωρίς όμως οι μεταβολές αυτές να πρέπει να ερμηνεύονται αποκλειστικά ως αντίστοιχη λειτουργική βελτίωση της παραγωγικής διαδικασίας. Ειδικότερα, η μέση Απόδοση αυξήθηκε από 92,27% σε 100,28%, ωστόσο η παρουσία ακραίων τιμών άνω του 100% κατά την αρχική περίοδο εφαρμογής του συστήματος συνδέθηκε με χρονικές ασυνέπειες στην ολοκλήρωση των παραγωγικών δηλώσεων. Η Ποιότητα αυξήθηκε από 99,61% σε 99,92%, παραμένοντας σε ιδιαίτερα υψηλό επίπεδο και στις δύο περιόδους. Παρά τη στατιστική σημαντικότητα της διαφοράς, η απόλυτη μεταβολή της Ποιότητας ήταν μόλις 0,31 ποσοστιαίες μονάδες και, συνεπώς, δεν αποτελεί τον κύριο παράγοντα διαφοροποίησης της παραγωγικής αποτελεσματικότητας.

Η μείωση της παραγωγής αποδεκτών τεμαχίων ανά βάρδια είναι συμβατή με τη μείωση της Διαθεσιμότητας. Με άλλα λόγια, η γραμμή δεν φαίνεται να αντιμετωπίζει κυρίως πρόβλημα ποιότητας ή ονομαστικής ταχύτητας, αλλά απώλειες διαθέσιμου παραγωγικού χρόνου. Το στοιχείο αυτό είναι σημαντικό, καθώς κατευθύνει τις προτάσεις βελτίωσης προς τη μείωση των χρόνων στάσης, τη σωστή ταξινόμηση των αιτιών απώλειας και τη σταθεροποίηση της χρήσης του PLEX. Η μείωση των αποδεκτών τεμαχίων ανά βάρδια ήταν επίσης στατιστικά σημαντική ($p = 0,015$), αν και το μέγεθος επίδρασης ήταν σχετικά μικρό (Hedges' $g = -0,34$).

Τα παραπάνω στατιστικά ευρήματα τεκμηριώνουν την ύπαρξη διαφορών μεταξύ των δύο εξεταζόμενων περιόδων, χωρίς ωστόσο να αποδεικνύουν αιτιώδη σχέση μεταξύ της εφαρμογής του PLEX και των μεταβολών των παραγωγικών δεικτών, δεδομένου του παρατηρησιακού σχεδιασμού της μελέτης και της διαφορετικής μεθόδου συλλογής δεδομένων.

Συνολικά, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αξία του PLEX δεν βρίσκεται μόνο στην άμεση βελτίωση των αριθμητικών δεικτών, αλλά κυρίως στη δυνατότητα πιο αναλυτικής και συστηματικής αποτύπωσης της παραγωγικής λειτουργίας. Η καλύτερη ορατότητα των απωλειών μπορεί αρχικά να οδηγήσει σε χαμηλότερη εμφανιζόμενη συνολική αποτελεσματικότητα, καθώς καταγράφονται πλέον συμβάντα που στο παρελθόν ενδέχεται να μην αποτυπώνονταν με την ίδια λεπτομέρεια. Ωστόσο, αυτή η αυξημένη διαφάνεια αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για στοχευμένες ενέργειες βελτίωσης.

Τα ευρήματα του παρόντος κεφαλαίου αποτελούν τη βάση για τη συζήτηση που ακολουθεί. Στο επόμενο κεφάλαιο εξετάζεται η ερμηνεία των αποτελεσμάτων σε σχέση με τη βιβλιογραφία, αναλύονται οι βασικές αιτίες που επηρεάζουν τους δείκτες και διατυπώνονται προτάσεις για τη βελτίωση της αξιοποίησης του PLEX και της παραγωγικής απόδοσης της γραμμής.

Κεφάλαιο 5. Συζήτηση αποτελεσμάτων, προτάσεις βελτίωσης και συμπεράσματα

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο πραγματοποιείται η συζήτηση των βασικών ευρημάτων που προέκυψαν από την ανάλυση των δεδομένων. Στόχος είναι η ερμηνεία των αποτελεσμάτων, η σύνδεσή τους με τη βιβλιογραφία και η διατύπωση προτάσεων βελτίωσης για την καλύτερη αξιοποίηση του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής PLEX.

Η συζήτηση δεν περιορίζεται στην απλή σύγκριση των αριθμητικών τιμών πριν και μετά την εφαρμογή του συστήματος. Αντίθετα, εξετάζει τη σημασία της μετάβασης από τη χειρόγραφη ή ημι-χειροκίνητη καταγραφή στην ψηφιακή διαχείριση δεδομένων. Η μετάβαση αυτή επηρεάζει όχι μόνο τον τρόπο παρακολούθησης της παραγωγής, αλλά και τον τρόπο με τον οποίο καταγράφονται, ταξινομούνται και ερμηνεύονται οι παραγωγικές απώλειες.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη συμβολή του PLEX στην ενίσχυση της ορατότητας, της ιχνηλασιμότητας και της αξιοπιστίας των δεδομένων παραγωγής. Η βιβλιογραφία αναφέρει ότι τα Συστήματα Εκτέλεσης Παραγωγής μπορούν να υποστηρίξουν την παρακολούθηση της παραγωγικής λειτουργίας, την ανάπτυξη δεικτών απόδοσης και τη λήψη πιο τεκμηριωμένων αποφάσεων, εφόσον τα δεδομένα που συλλέγονται είναι πλήρη, συνεπή και κατάλληλα οργανωμένα (Bianchini et al., 2024; Boudjenoun et al., 2025).

Παράλληλα, λαμβάνεται υπόψη ότι η εφαρμογή ενός τέτοιου συστήματος δεν αποτελεί μόνο τεχνική αλλαγή, αλλά και οργανωτική μετάβαση. Η σωστή χρήση του συστήματος από τους χειριστές, η τυποποίηση των καταχωρίσεων και η αποδοχή των νέων διαδικασιών επηρεάζουν άμεσα την ποιότητα των δεδομένων και, κατά συνέπεια, την αξιοπιστία των δεικτών που προκύπτουν από αυτά (Innecco et al., 2022).

Με βάση τα παραπάνω, το κεφάλαιο οργανώνεται σε τρία βασικά επίπεδα. Αρχικά συζητούνται τα κύρια ευρήματα της συγκριτικής ανάλυσης. Στη συνέχεια εξετάζεται η επίδραση του PLEX στην ποιότητα και αξιοπιστία των δεδομένων. Τέλος, διατυπώνονται

προτάσεις βελτίωσης για τη μείωση των απωλειών χρόνου, τη σταθεροποίηση της χρήσης του συστήματος και την καλύτερη αξιοποίηση των παραγωγικών δεδομένων.

5.2 Συζήτηση βασικών ευρημάτων

Η ανάλυση των αποτελεσμάτων έδειξε ότι η μέση Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού μειώθηκε από 88,63% στην περίοδο πριν από την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής σε 82,37% μετά την εφαρμογή του PLEX. Η διαφορά των 6,26 ποσοστιαίων μονάδων ήταν στατιστικά σημαντική ($p < 0,001$), με μέγεθος επίδρασης Hedges' $g = -0,71$. Ωστόσο, η αριθμητική αυτή μείωση δεν πρέπει να ερμηνευθεί μονοδιάστατα ως πραγματική επιδείνωση της παραγωγικής λειτουργίας. Αντίθετα, πρέπει να εξεταστεί σε συνδυασμό με τη μετάβαση από τη χειρόγραφη ή ημι-χειροκίνητη καταγραφή σε ένα ψηφιακό σύστημα συλλογής και ανάλυσης δεδομένων, καθώς και με την αρχική φάση προσαρμογής των χρηστών στο PLEX.

Το σημαντικότερο εύρημα αφορά τη Διαθεσιμότητα, η οποία μειώθηκε από 96,42% σε 82,48%. Η διαφορά των 13,94 ποσοστιαίων μονάδων ήταν στατιστικά σημαντική ($p < 0,001$) και συνοδεύτηκε από μεγάλο μέγεθος επίδρασης (Hedges' $g = -1,56$). Η μεταβολή αυτή επηρέασε καθοριστικά τη συνολική τιμή του OEE, καθώς η Διαθεσιμότητα συνδέεται άμεσα με τον χρόνο κατά τον οποίο η μηχανή είναι διαθέσιμη για παραγωγική λειτουργία. Τα αποτελέσματα, επομένως, αναδεικνύουν τον διαθέσιμο παραγωγικό χρόνο ως τη σημαντικότερη περιοχή διαφοροποίησης μεταξύ των δύο περιόδων.

Η χαμηλότερη Διαθεσιμότητα πρέπει, ωστόσο, να εξεταστεί και σε σχέση με τη διαφοροποίηση του τρόπου καταγραφής. Στην περίοδο πριν από την εφαρμογή του PLEX, σύντομες στάσεις, μικροδιακοπές, αναμονές υλικών ή οργανωτικές καθυστερήσεις ενδέχεται να μην καταγράφονταν με την ίδια πληρότητα και λεπτομέρεια. Με την ψηφιακή καταγραφή, οι απώλειες αυτές μπορούν να αποτυπώνονται πιο συστηματικά και να αντιστοιχίζονται σε συγκεκριμένες χρονικές περιόδους και αιτίες. Η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η αυτοματοποιημένη συλλογή δεδομένων μπορεί να ενισχύσει την ακρίβεια και την πληρότητα

των πληροφοριών που χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του ΟΕΕ, χωρίς όμως να καταργεί την ανάγκη ελέγχου της ποιότητας των δεδομένων (Hedman et al., 2016; Wang & Pan, 2011).

Αντίθετα, η μέση Απόδοση αυξήθηκε από 92,27% σε 100,28%, με τη διαφορά των 8,00 ποσοστιαίων μονάδων να είναι στατιστικά σημαντική ($p < 0,001$). Η αύξηση αυτή δεν πρέπει να ερμηνευθεί αυτομάτως ως πραγματική αύξηση της ταχύτητας ή της τεχνικής δυναμικότητας της μηχανής. Κατά την αρχική περίοδο χρήσης του PLEX εντοπίστηκαν ακραίες τιμές Απόδοσης άνω του 100%, οι οποίες συνδέθηκαν με χρονικές ασυνέπειες στην ολοκλήρωση των παραγωγικών δηλώσεων και τη μεταφορά καταχωρίσεων μεταξύ διαδοχικών βαρδιών. Επομένως, η αύξηση του συγκεκριμένου δείκτη πρέπει να αξιολογείται με προσοχή και σε συνδυασμό με την ποιότητα και τη χρονική συνέπεια των καταχωρίσεων.

Η Ποιότητα παρέμεινε ιδιαίτερα υψηλή και στις δύο περιόδους, αυξανόμενη από 99,61% σε 99,92%. Η διαφορά των 0,31 ποσοστιαίων μονάδων ήταν στατιστικά σημαντική ($p < 0,001$), ωστόσο το απόλυτο μέγεθος της μεταβολής ήταν περιορισμένο. Κατά συνέπεια, η στατιστική σημαντικότητα δεν πρέπει να συγχέεται με αντίστοιχα μεγάλη πρακτική ή λειτουργική μεταβολή. Το εύρημα επιβεβαιώνει ότι οι ποιοτικές απώλειες δεν αποτελούν τον κύριο παράγοντα που εξηγεί τη μείωση της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού.

Παράλληλα, η μέση παραγωγή αποδεκτών τεμαχίων μειώθηκε από περίπου 42.831 σε 39.838 τεμάχια ανά βάρδια, δηλαδή κατά περίπου 2.992 τεμάχια. Η διαφορά αυτή ήταν επίσης στατιστικά σημαντική ($p = 0,015$), αν και το μέγεθος επίδρασης ήταν σχετικά μικρό (Hedges' $g = -0,34$). Η μείωση της παραγωγικής εξόδου είναι συμβατή με τη χαμηλότερη Διαθεσιμότητα, καθώς ο περιορισμός του διαθέσιμου παραγωγικού χρόνου μπορεί να οδηγήσει σε μικρότερη παραγωγή ανά βάρδια ακόμη και όταν η Ποιότητα παραμένει υψηλή.

Συνολικά, τόσο η περιγραφική όσο και η επαγωγική στατιστική ανάλυση αναδεικνύουν τη Διαθεσιμότητα ως τον σημαντικότερο παράγοντα διαφοροποίησης μεταξύ των δύο περιόδων. Τα στατιστικά ευρήματα τεκμηριώνουν ότι οι παρατηρούμενες διαφορές δεν οφείλονται απλώς σε τυχαία διακύμανση των συγκεκριμένων δειγμάτων. Δεν αποδεικνύουν, ωστόσο, ότι η εφαρμογή του PLEX προκάλεσε τις μεταβολές αυτές, καθώς η μελέτη βασίζεται σε παρατηρησιακά δεδομένα δύο διαφορετικών χρονικών περιόδων και σε διαφορετικές μεθόδους συλλογής δεδομένων.

Η βασική περιοχή βελτίωσης αφορά, επομένως, τη μείωση των απωλειών διαθέσιμου παραγωγικού χρόνου και την περαιτέρω σταθεροποίηση της χρήσης του PLEX ως εργαλείου αξιόπιστης καταγραφής. Η μετάβαση στην ψηφιακή καταγραφή δεν πρέπει να αξιολογείται μόνο με βάση το αν ένας τελικός δείκτης αυξήθηκε ή μειώθηκε. Η ουσιαστική της αξία βρίσκεται και στη δυνατότητα αναλυτικότερης αναγνώρισης των αιτιών απώλειας, ώστε οι επόμενες ενέργειες βελτίωσης να βασίζονται σε πληρέστερα και περισσότερο τεκμηριωμένα δεδομένα.

5.3 Επίδραση του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής στην αξιοπιστία και την ακεραιότητα των δεδομένων

Ένα βασικό συμπέρασμα της παρούσας εργασίας είναι ότι η εφαρμογή ενός Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής δεν πρέπει να αξιολογείται μόνο με βάση την άμεση αριθμητική βελτίωση των δεικτών. Η αξία του PLEX συνδέεται κυρίως με την ενίσχυση της ορατότητας, της τυποποίησης και της ιχνηλασιμότητας των δεδομένων παραγωγής. Με άλλα λόγια, το σύστημα δεν παρέχει μόνο έναν τελικό αριθμό απόδοσης, αλλά βοηθά στην καλύτερη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο προκύπτουν οι απώλειες.

Κατά την περίοδο πριν από την εφαρμογή του συστήματος, η καταγραφή βασιζόταν σε χειρόγραφες ή ημι-χειροκίνητες πρακτικές. Σε τέτοιες συνθήκες, σύντομες στάσεις, μικροδιακοπές, αναμονές υλικών ή οργανωτικές καθυστερήσεις ενδέχεται να μην καταγράφονταν με πλήρη λεπτομέρεια ή να ομαδοποιούνταν σε γενικότερες κατηγορίες. Ως αποτέλεσμα, η εικόνα της παραγωγικής απόδοσης μπορούσε να εμφανίζεται πιο ευνοϊκή από την πραγματική, επειδή μέρος των απωλειών δεν αποτυπωνόταν με την ίδια ακρίβεια.

Η βιβλιογραφία αναφέρει ότι οι χειροκίνητες καταγραφές παραγωγικών δεδομένων μπορεί να παρουσιάζουν ζητήματα πληρότητας, συνέπειας και ακρίβειας, ιδιαίτερα όταν τα δεδομένα χρησιμοποιούνται για την αξιολόγηση και βελτίωση παραγωγικών διεργασιών (Jericho et al., 2024; Thurnheer, Fiedler, Plümke, & Netland, 2024). Αντίστοιχα, η αυτοματοποιημένη συλλογή δεδομένων μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα των δεδομένων που χρησιμοποιούνται

για τον υπολογισμό του OEE, καθώς περιορίζει τις μη αναγνωρισμένες απώλειες και επιτρέπει πιο συστηματική καταγραφή των παραγωγικών αποκλίσεων (Wang & Pan, 2011).

Με την εφαρμογή του PLEX, οι χρόνοι, τα συμβάντα και οι αιτίες στάσης μπορούν να αποτυπώνονται με πιο συστηματικό και τυποποιημένο τρόπο. Η χρήση χρονικών σημάνσεων, καταστάσεων μηχανής και κωδικών αιτιολόγησης ενισχύει τη δυνατότητα ανάλυσης των παραγωγικών διεργασιών και υποστηρίζει τη λήψη πιο τεκμηριωμένων αποφάσεων. Τα Συστήματα Εκτέλεσης Παραγωγής μπορούν να συμβάλουν στη μετατροπή των πρωτογενών δεδομένων σε χρήσιμη πληροφορία για τη διοίκηση της παραγωγής, μέσω της ανάπτυξης και παρακολούθησης κατάλληλων δεικτών απόδοσης (Bianchini et al., 2024).

Ωστόσο, η ψηφιακή καταγραφή δεν εξαλείφει αυτόματα όλα τα προβλήματα δεδομένων. Η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων εξακολουθεί να εξαρτάται από την ορθή χρήση του συστήματος, την εκπαίδευση των χειριστών, τη σαφήνεια των ορισμών και τη συνέπεια στην καταχώριση των αιτιών στάσης. Ακόμη και σε περιβάλλοντα αυτόματης μέτρησης, η λανθασμένη ή ελλιπής ταξινόμηση των απωλειών μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού (Hedman et al., 2016).

Στην παρούσα μελέτη, το ζήτημα αυτό εμφανίστηκε κυρίως κατά την αρχική περίοδο χρήσης του PLEX. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η καθυστερημένη ολοκλήρωση των παραγωγικών δηλώσεων μπορούσε να οδηγήσει σε χρονική μετατόπιση της καταγεγραμμένης παραγωγής από μία βάρδια στην επόμενη. Το φαινόμενο αυτό μπορούσε να δημιουργήσει υποεκτίμηση της παραγωγής στην πρώτη βάρδια και αντίστοιχη υπερεκτίμηση στην επόμενη, οδηγώντας σε ακραίες τιμές Απόδοσης ή Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού.

Για τον λόγο αυτό, οι τιμές που προέκυψαν μετά την εφαρμογή του PLEX δεν αντιμετωπίστηκαν μόνο ως αριθμητικά αποτελέσματα, αλλά αξιολογήθηκαν σε σχέση με τον τρόπο καταγραφής και τη λειτουργική πραγματικότητα της παραγωγής. Η ύπαρξη ακραίων τιμών, όπως Απόδοση άνω του 100%, δεν ερμηνεύτηκε ως πραγματική υπέρβαση της δυναμικότητας της μηχανής, αλλά ως ένδειξη ασυνέπειας στη χρονική αντιστοίχιση παραγωγής και βάρδιας.

Μετά τον εντοπισμό των συγκεκριμένων αποκλίσεων πραγματοποιήθηκε λειτουργική διερεύνηση της διαδικασίας καταχώρισης. Διαπιστώθηκε ότι σε ορισμένες περιπτώσεις η

παραγωγική δήλωση δεν ολοκληρωνόταν εγκαίρως εντός της αντίστοιχης βάρδιας, με αποτέλεσμα μέρος της παραγωγής να καταχωρίζεται χρονικά στην επόμενη βάρδια. Για την αντιμετώπιση του ζητήματος, η ομάδα που είχε αναλάβει την εκπαίδευση των χειριστών στη χρήση του PLEX προχώρησε σε επαναληπτική εκπαίδευση και επεξήγηση της ορθής διαδικασίας καταχώρισης.

Παράλληλα, καθιερώθηκε η πρακτική ολοκλήρωσης της παραγωγικής δήλωσης τουλάχιστον δεκαπέντε λεπτά πριν από τη λήξη της βάρδιας. Με τον τρόπο αυτό παρέχεται επαρκές χρονικό περιθώριο για την αναγνώριση και επίλυση πιθανών τεχνικών ή διαδικαστικών προβλημάτων πριν από την αλλαγή της βάρδιας, περιορίζοντας τον κίνδυνο χρονικής μεταφοράς της παραγωγής στην επόμενη περίοδο καταγραφής.

Μετά την εφαρμογή των παραπάνω διορθωτικών ενεργειών, το συγκεκριμένο φαινόμενο δεν παρατηρήθηκε εκ νέου στην παραγωγική λειτουργία. Το γεγονός αυτό ενισχύει την εκτίμηση ότι οι ακραίες τιμές Απόδοσης και Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού που εντοπίστηκαν στο εξεταζόμενο δείγμα συνδέονται κυρίως με την αρχική φάση προσαρμογής των χρηστών στο PLEX και όχι με μόνιμο περιορισμό ή συστηματικό σφάλμα του συστήματος. Δεδομένου ότι τα δεδομένα της παρούσας μελέτης προέρχονται από αυτή την αρχική περίοδο εφαρμογής, οι συγκεκριμένες αποκλίσεις διατηρήθηκαν στο τελικό δείγμα και ερμηνεύτηκαν λαμβάνοντας υπόψη το λειτουργικό τους υπόβαθρο.

Η αποδοχή και η σωστή χρήση του συστήματος από τους τελικούς χρήστες αποτελούν κρίσιμη παράμετρο για την αξιοπιστία των δεδομένων. Η βιβλιογραφία δείχνει ότι η χρήση ενός Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής στην πράξη επηρεάζεται από παράγοντες όπως οι συνθήκες υποστήριξης, η ευκολία χρήσης και η στάση των χρηστών απέναντι στο σύστημα (Innecco et al., 2022). Επομένως, η επιτυχής αξιοποίηση του PLEX δεν εξαρτάται μόνο από την τεχνική εγκατάσταση του συστήματος, αλλά και από τη σταθερή εφαρμογή των διαδικασιών από τους χειριστές και τους υπεύθυνους παραγωγής.

Συνεπώς, η χαμηλότερη τιμή της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού μετά την εφαρμογή του PLEX δεν αποτελεί απαραίτητα ένδειξη πραγματικής επιδείνωσης της γραμμής. Αντίθετα, μπορεί να αντανακλά την ακριβέστερη και πιο λεπτομερή αποτύπωση απωλειών που στην προηγούμενη περίοδο δεν καταγράφονταν με την ίδια πληρότητα. Η διάσταση αυτή είναι

ιδιαίτερα σημαντική για τη σωστή ερμηνεία των αποτελεσμάτων, καθώς μετατοπίζει την ανάλυση από το ερώτημα «αν ο δείκτης βελτιώθηκε ή μειώθηκε» στο ερώτημα «ποια δεδομένα καταγράφονται πλέον με μεγαλύτερη ακρίβεια και πώς μπορούν να αξιοποιηθούν για βελτίωση».

5.4 Προτάσεις βελτίωσης

Με βάση τα ευρήματα της ανάλυσης, οι προτάσεις βελτίωσης εστιάζουν κυρίως στη μείωση των απωλειών χρόνου, στην καλύτερη αξιοποίηση των δεδομένων του PLEX και στη σταθεροποίηση των ψηφιακών διαδικασιών καταγραφής. Δεδομένου ότι η σημαντικότερη μεταβολή εντοπίστηκε στη Διαθεσιμότητα, οι προτεινόμενες παρεμβάσεις στοχεύουν κυρίως στη μείωση των χρόνων στάσης, στη σαφέστερη κατηγοριοποίηση των αιτιών και στην ενίσχυση της συνεργασίας μεταξύ Παραγωγής, Συντήρησης και Ποιότητας.

Οι προτάσεις που ακολουθούν δεν αντιμετωπίζουν το PLEX μόνο ως εργαλείο καταγραφής, αλλά ως βάση για πιο συστηματική διοίκηση της παραγωγής. Η αξία του συστήματος αυξάνεται όταν τα δεδομένα που παράγει χρησιμοποιούνται σταθερά για ανάλυση, λήψη αποφάσεων και σχεδιασμό διορθωτικών ενεργειών.

5.4.1 Συστηματική ανάλυση χρόνων στάσης και ιεράρχηση απωλειών

Η μείωση της Διαθεσιμότητας αναδεικνύει την ανάγκη για συστηματική ανάλυση των χρόνων στάσης και των αιτιών που τους προκαλούν. Προτείνεται η περιοδική εξαγωγή αναφορών από το PLEX και η ομαδοποίηση των στάσεων σε βασικές κατηγορίες, όπως τεχνικές βλάβες, ρυθμίσεις, αλλαγές προϊόντος, αναμονές υλικών, καθαρισμός και οργανωτικές καθυστερήσεις.

Η ανάλυση αυτή μπορεί να υποστηριχθεί από λογική ιεράρχησης των απωλειών, ώστε να εντοπίζονται οι αιτίες που συνεισφέρουν περισσότερο στον συνολικό χρόνο στάσης. Με αυτόν τον τρόπο, οι ενέργειες βελτίωσης μπορούν να εστιάσουν πρώτα στα σημαντικότερα προβλήματα και όχι σε δευτερεύουσες αποκλίσεις. Η χρήση του OEE ως εργαλείου βελτίωσης

συνδέεται ακριβώς με τον εντοπισμό των βασικών απωλειών που περιορίζουν την παραγωγική λειτουργία (Muchiri & Pintelon, 2008; Ng Corrales et al., 2020).

5.4.2 Τυποποίηση των κωδικών αιτιολόγησης στάσεων

Η αξιοπιστία της ψηφιακής καταγραφής εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σωστή και συνεπή χρήση των κωδικών αιτιολόγησης στάσεων. Εάν διαφορετικοί χειριστές χρησιμοποιούν διαφορετικούς κωδικούς για παρόμοια περιστατικά, η ανάλυση των απωλειών μπορεί να οδηγήσει σε λανθασμένα ή ασαφή συμπεράσματα.

Για τον λόγο αυτό, προτείνεται η δημιουργία σύντομης οδηγίας χρήσης των κωδικών αιτιολόγησης. Η οδηγία αυτή θα πρέπει να περιλαμβάνει σαφείς ορισμούς, πρακτικά παραδείγματα και ενδεικτικές περιπτώσεις χρήσης κάθε κωδικού. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να περιοριστεί η διαφορετική ερμηνεία των ίδιων περιστατικών μεταξύ βαρδίων και χρηστών.

Η ανάγκη αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς ακόμη και σε περιβάλλοντα αυτόματης μέτρησης, η ελλιπής ή ασαφής ταξινόμηση των απωλειών μπορεί να επηρεάσει την ακρίβεια των δεικτών παραγωγικής απόδοσης (Hedman et al., 2016).

5.4.3 Εκπαίδευση και υποστήριξη των χειριστών στη χρήση του PLEX

Η μετάβαση σε ψηφιακό σύστημα καταγραφής απαιτεί εξοικείωση από τους χειριστές και σταθεροποίηση των νέων διαδικασιών. Κατά την αρχική περίοδο εφαρμογής, είναι πιθανό να εμφανιστούν καθυστερήσεις ή ασυνέπειες που σχετίζονται με την επιλογή κωδικού προϊόντος, τη σάρωση υλικών, την αλλαγή της κατάστασης της μηχανής στο σύστημα ή την καταχώριση της κατάλληλης αιτίας στάσης.

Για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων, προτείνεται η εφαρμογή σύντομων επαναληπτικών εκπαιδεύσεων στη γραμμή, με έμφαση στα συχνότερα σφάλματα καταχώρισης και στα κρίσιμα βήματα χρήσης του PLEX. Επιπλέον, μπορούν να τοποθετηθούν σύντομες οδηγίες εργασίας κοντά στις οθόνες του συστήματος, ώστε οι χειριστές να έχουν άμεση υποστήριξη κατά τη διάρκεια της βάρδιας (Bachhav, Patil, Jadhav, & Kene, 2026).

Ιδιαίτερη σημασία έχει επίσης η ενίσχυση της αποδοχής του συστήματος από το προσωπικό. Το PLEX πρέπει να παρουσιάζεται ως εργαλείο υποστήριξης της παραγωγής και τεκμηρίωσης των προβλημάτων, όχι ως μηχανισμός ατομικού ελέγχου. Η αποδοχή και η σωστή χρήση ενός Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής από τους τελικούς χρήστες επηρεάζουν άμεσα την αποτελεσματική αξιοποίησή του στην πράξη (Bachhav et al., 2026; Innecco et al., 2022).

5.4.4 Καθιέρωση περιοδικής ανασκόπησης δεικτών

Προτείνεται η καθιέρωση σύντομων και σταθερών συναντήσεων ανασκόπησης των βασικών δεικτών απόδοσης, σε ημερήσια ή εβδομαδιαία βάση. Στις συναντήσεις αυτές μπορούν να εξετάζονται η Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού, η Διαθεσιμότητα, οι χρόνοι στάσης, οι τεχνικές βλάβες, οι αλλαγές προϊόντος και η παραγωγή ανά βάρδια.

Η συστηματική ανασκόπηση των δεικτών επιτρέπει την έγκαιρη αναγνώριση αποκλίσεων και τη σύνδεσή τους με συγκεκριμένες διορθωτικές ενέργειες. Με αυτόν τον τρόπο, οι δείκτες δεν λειτουργούν μόνο ως εργαλεία αναφοράς, αλλά ως πρακτικός μηχανισμός καθημερινής διοίκησης και συνεχούς βελτίωσης.

Η αξιοποίηση των δεδομένων του PLEX σε τακτική βάση μπορεί να ενισχύσει τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων, καθώς τα πρωτογενή δεδομένα μετατρέπονται σε χρήσιμη πληροφορία για την παρακολούθηση και βελτίωση της παραγωγής (Bianchini et al., 2024).

5.4.5 Ενίσχυση συνεργασίας μεταξύ Παραγωγής, Συντήρησης και Ποιότητας

Η βελτίωση της Διαθεσιμότητας δεν μπορεί να επιτευχθεί μόνο από ένα τμήμα. Οι χρόνοι στάσης, οι τεχνικές βλάβες, οι αλλαγές προϊόντος, οι αναμονές υλικών και οι ποιοτικές αποκλίσεις συνδέονται με διαφορετικές λειτουργίες της επιχείρησης και απαιτούν συνεργασία μεταξύ Παραγωγής, Συντήρησης και Ποιότητας.

Προτείνεται η χρήση των δεδομένων του PLEX ως κοινής βάσης συζήτησης μεταξύ των τμημάτων. Η Παραγωγή μπορεί να συμβάλει στην έγκαιρη και σωστή καταγραφή των συμβάντων, η Συντήρηση στην ανάλυση των τεχνικών αιτιών και η Ποιότητα στην αξιολόγηση των επιπτώσεων στα προϊόντα. Με αυτόν τον τρόπο, οι διορθωτικές ενέργειες μπορούν να σχεδιάζονται πιο συντονισμένα και με βάση κοινά δεδομένα.

Η συνεργασία αυτή είναι απαραίτητη, διότι η αξία ενός Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής δεν περιορίζεται στην απλή συλλογή δεδομένων. Η πραγματική του χρησιμότητα προκύπτει όταν τα δεδομένα αξιοποιούνται από τα εμπλεκόμενα τμήματα για την κατανόηση των προβλημάτων και την εφαρμογή στοχευμένων ενεργειών βελτίωσης.

5.4.6 Διασφάλιση έγκαιρης ολοκλήρωσης των παραγωγικών δηλώσεων

Η εμπειρία από την αρχική περίοδο εφαρμογής του PLEX ανέδειξε τη σημασία της έγκαιρης ολοκλήρωσης των παραγωγικών δηλώσεων για την αξιοπιστία των δεικτών απόδοσης. Οι χρονικές ασυνέπειες που εντοπίστηκαν αντιμετωπίστηκαν με επαναληπτική εκπαίδευση των χειριστών και με καθιέρωση σαφούς χρονικού ορίου για την ολοκλήρωση της παραγωγικής καταχώρισης πριν από τη λήξη κάθε βάρδιας. Ειδικότερα, η παραγωγική δήλωση προβλέπεται να ολοκληρώνεται τουλάχιστον δεκαπέντε λεπτά πριν από την αλλαγή βάρδιας, ώστε να υπάρχει διαθέσιμος χρόνος για την αντιμετώπιση τυχόν τεχνικών ή διαδικαστικών προβλημάτων που εμποδίζουν την έγκαιρη καταχώριση.

Η εφαρμογή της πρακτικής αυτής συνέβαλε στη σταθεροποίηση της διαδικασίας και τα αντίστοιχα περιστατικά χρονικής μεταφοράς της παραγωγής δεν παρατηρήθηκαν εκ νέου. Για τη διατήρηση της βελτίωσης προτείνεται η συγκεκριμένη πρακτική να αποτελεί σταθερό μέρος της λειτουργικής διαδικασίας, σε συνδυασμό με περιοδική υπενθύμιση και εκπαίδευση των χρηστών και έλεγχο της συνέπειας των παραγωγικών καταχωρίσεων. Η σημασία της εκπαίδευσης των χρηστών, της τυποποίησης των διαδικασιών και του συστηματικού ελέγχου της ποιότητας των δεδομένων επισημαίνεται και στη σχετική βιβλιογραφία (Hedman et al., 2016; Innecco et al., 2022; Wang & Pan, 2011).

5.5 Περιορισμοί και προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Για την ορθή ερμηνεία των αποτελεσμάτων είναι απαραίτητο να ληφθούν υπόψη ορισμένοι περιορισμοί της παρούσας μελέτης. Οι περιορισμοί αυτοί δεν αναιρούν την αξία της ανάλυσης, αλλά προσδιορίζουν το πλαίσιο μέσα στο οποίο πρέπει να ερμηνευθούν τα ευρήματα.

Ο πρώτος περιορισμός αφορά το εύρος της μελέτης. Η ανάλυση επικεντρώνεται σε μία συγκεκριμένη αυτοματοποιημένη μηχανή συναρμολόγησης και σε δύο συγκεκριμένες χρονικές περιόδους. Το τελικό δείγμα περιλάμβανε 108 εργασιακές βάρδιες πριν από την εφαρμογή του PLEX και 103 διακριτές εργασιακές βάρδιες μετά την εφαρμογή του συστήματος. Συνεπώς, τα αποτελέσματα δεν μπορούν να γενικευθούν άκριτα σε όλες τις γραμμές παραγωγής ή σε διαφορετικά παραγωγικά περιβάλλοντα. Ωστόσο, η μεθοδολογία που εφαρμόστηκε μπορεί να αποτελέσει βάση για αντίστοιχες αναλύσεις σε άλλες μηχανές ή γραμμές παραγωγής, εφόσον προσαρμοστεί στα ιδιαίτερα λειτουργικά χαρακτηριστικά κάθε περίπτωσης.

Ο δεύτερος περιορισμός σχετίζεται με τη διαφορετική μέθοδο συλλογής δεδομένων στις δύο εξεταζόμενες περιόδους. Η περίοδος πριν από την εφαρμογή του PLEX βασίζεται σε χειρόγραφες ή ημι-χειροκίνητες καταγραφές, ενώ η περίοδος μετά την εφαρμογή του συστήματος βασίζεται σε ψηφιακή καταγραφή. Επομένως, μέρος των διαφορών που παρατηρήθηκαν στους δείκτες μπορεί να σχετίζεται με τη διαφορετική πληρότητα, ακρίβεια και χρονική ανάλυση της καταγραφής και όχι αποκλειστικά με πραγματική μεταβολή της παραγωγικής λειτουργίας.

Ο τρίτος περιορισμός αφορά την αρχική φάση χρήσης του PLEX. Κατά την εξεταζόμενη περίοδο οι χειριστές και η παραγωγική ομάδα βρίσκονταν ακόμη σε διαδικασία εξοικείωσης με τις νέες ψηφιακές διαδικασίες. Στο πλαίσιο αυτό εντοπίστηκαν περιπτώσεις καθυστερημένης ολοκλήρωσης παραγωγικών δηλώσεων, οι οποίες μπορούσαν να προκαλέσουν χρονική μετατόπιση της καταγεγραμμένης παραγωγής μεταξύ διαδοχικών βαρδιών και να επηρεάσουν ορισμένες ακραίες τιμές Απόδοσης και Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού. Οι περιπτώσεις αυτές αντιμετωπίστηκαν με διορθωτικές ενέργειες, όπως επαναληπτική εκπαίδευση των χειριστών και καθιέρωση χρονικού ορίου για την ολοκλήρωση της παραγωγικής δήλωσης πριν από την αλλαγή βάρδιας.

Ένας επιπλέον περιορισμός αφορά τον παρατηρησιακό χαρακτήρα της μελέτης. Παρότι η επαγωγική στατιστική ανάλυση έδειξε στατιστικά σημαντικές διαφορές μεταξύ των δύο περιόδων για τους βασικούς δείκτες που εξετάστηκαν, τα αποτελέσματα αυτά δεν τεκμηριώνουν από μόνα τους αιτιώδη σχέση μεταξύ της εφαρμογής του PLEX και των παρατηρούμενων μεταβολών. Παράγοντες όπως η σύνθεση της παραγωγής, οι χρόνοι στάσης,

οι τεχνικές βλάβες, οι οργανωτικές συνθήκες και άλλες διαφοροποιήσεις μεταξύ των δύο χρονικών περιόδων είναι δυνατόν να έχουν επηρεάσει τα αποτελέσματα.

Επιπλέον, οι έλεγχοι κανονικότητας έδειξαν αποκλίσεις από την κανονική κατανομή για αρκετούς από τους εξεταζόμενους δείκτες. Για τον λόγο αυτό εφαρμόστηκε ο έλεγχος t του Welch και πραγματοποιήθηκε συμπληρωματικός έλεγχος Mann–Whitney U, με τα συμπεράσματα των δύο προσεγγίσεων να είναι συνεπή. Παρόλα αυτά, η στατιστική σημαντικότητα πρέπει να αξιολογείται σε συνδυασμό με το μέγεθος επίδρασης και την πρακτική σημασία κάθε μεταβολής και όχι ως αυτόνομο κριτήριο αξιολόγησης της παραγωγικής επίδοσης.

Για μελλοντική έρευνα προτείνεται η επέκταση της ανάλυσης σε μεγαλύτερο χρονικό διάστημα μετά την πλήρη σταθεροποίηση της χρήσης του PLEX. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων της αρχικής περιόδου εφαρμογής με δεδομένα μιας μεταγενέστερης, σταθεροποιημένης περιόδου θα επέτρεπε να διερευνηθεί εάν οι δείκτες μεταβάλλονται μετά την ολοκλήρωση της φάσης προσαρμογής των χρηστών. Επιπλέον, θα ήταν χρήσιμη η επέκταση της μελέτης σε περισσότερες μηχανές και γραμμές παραγωγής, ώστε να αξιολογηθεί κατά πόσο τα ευρήματα επαναλαμβάνονται σε διαφορετικές παραγωγικές συνθήκες.

Τέλος, μελλοντική διερεύνηση θα μπορούσε να εστιάσει αναλυτικότερα στις επιμέρους κατηγορίες στάσεων, στους κωδικούς προϊόντων, στις διαφορετικές βάρδιες και στις επαναλαμβανόμενες τεχνικές βλάβες. Η προσέγγιση αυτή θα μπορούσε να συμβάλει στην πληρέστερη κατανόηση των αιτιών απώλειας Διαθεσιμότητας και στην ανάπτυξη περισσότερο στοχευμένων ενεργειών βελτίωσης.

5.6 Συμπεράσματα και προτάσεις αξιοποίησης του PLEX

Η παρούσα διπλωματική εργασία είχε ως στόχο τον σχεδιασμό και την εφαρμογή ενός συστήματος Κρίσιμων / Βασικών Δεικτών Απόδοσης για την αξιολόγηση της παραγωγικής αποτελεσματικότητας σε αυτοματοποιημένη μηχανή συναρμολόγησης βιομηχανίας ξυριστικών προϊόντων. Η μελέτη περίπτωσης βασίστηκε στη σύγκριση δύο διακριτών

περιόδων, πριν και μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής PLEX, με κοινή μονάδα ανάλυσης την εργασιακή βάρδια.

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η μέση Συνολική Αποτελεσματικότητα Εξοπλισμού μειώθηκε από 88,63% σε 82,37%, δηλαδή κατά 6,26 ποσοστιαίες μονάδες. Η διαφορά ήταν στατιστικά σημαντική ($p < 0,001$), με μέγεθος επίδρασης Hedges' $g = -0,71$. Η σημαντικότερη διαφοροποίηση μεταξύ των δύο περιόδων εντοπίστηκε στη Διαθεσιμότητα, η οποία μειώθηκε από 96,42% σε 82,48%, παρουσιάζοντας διαφορά 13,94 ποσοστιαίων μονάδων ($p < 0,001$) και μεγάλο μέγεθος επίδρασης (Hedges' $g = -1,56$). Το εύρημα αυτό αναδεικνύει τις απώλειες διαθέσιμου παραγωγικού χρόνου ως βασική περιοχή στην οποία πρέπει να επικεντρωθούν οι ενέργειες βελτίωσης.

Αντίθετα, η μέση Απόδοση αυξήθηκε από 92,27% σε 100,28%, με τη διαφορά να είναι επίσης στατιστικά σημαντική ($p < 0,001$). Η αύξηση αυτή, ωστόσο, πρέπει να ερμηνεύεται με προσοχή, καθώς κατά την αρχική περίοδο εφαρμογής του PLEX εντοπίστηκαν ακραίες τιμές άνω του 100%, οι οποίες συνδέθηκαν με χρονικές ασυνέπειες στην ολοκλήρωση παραγωγικών δηλώσεων. Επομένως, οι συγκεκριμένες τιμές δεν θεωρήθηκαν ένδειξη πραγματικής υπέρβασης της τεχνικής δυναμικότητας της μηχανής.

Η Ποιότητα παρέμεινε ιδιαίτερα υψηλή και στις δύο περιόδους, αυξανόμενη από 99,61% σε 99,92%. Παρότι η διαφορά των 0,31 ποσοστιαίων μονάδων ήταν στατιστικά σημαντική ($p < 0,001$), το περιορισμένο απόλυτο μέγεθος της μεταβολής δείχνει ότι η Ποιότητα δεν αποτέλεσε τον κύριο παράγοντα διαφοροποίησης της συνολικής παραγωγικής αποτελεσματικότητας. Παράλληλα, η μέση παραγωγή αποδεκτών τεμαχίων μειώθηκε από περίπου 42.831 σε 39.838 τεμάχια ανά βάρδια. Η μείωση κατά περίπου 2.992 τεμάχια ήταν στατιστικά σημαντική ($p = 0,015$), αλλά συνοδεύτηκε από σχετικά μικρό μέγεθος επίδρασης (Hedges' $g = -0,34$).

Η επαγωγική στατιστική ανάλυση επιβεβαίωσε, επομένως, ότι μεταξύ των δύο εξεταζόμενων περιόδων υπάρχουν στατιστικά σημαντικές διαφοροποιήσεις στους βασικούς δείκτες παραγωγικής απόδοσης. Τα αποτελέσματα αυτά δεν πρέπει, ωστόσο, να ερμηνεύονται ως απόδειξη αιτιώδους σχέσης μεταξύ της εφαρμογής του PLEX και των παρατηρούμενων μεταβολών. Η μελέτη βασίζεται σε πραγματικά παρατηρησιακά δεδομένα δύο διαφορετικών

χρονικών περιόδων, ενώ παράλληλα διαφοροποιείται και η μέθοδος συλλογής των δεδομένων μεταξύ της περιόδου πριν και μετά την εφαρμογή του συστήματος.

Ένα από τα σημαντικότερα συμπεράσματα της μελέτης είναι ότι η αξία ενός Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής δεν περιορίζεται στην άμεση αύξηση ενός αριθμητικού δείκτη. Η εφαρμογή του PLEX ενισχύει τη δυνατότητα συστηματικότερης καταγραφής, χρονικής ιχνηλασιμότητας και αναλυτικότερης αποτύπωσης των παραγωγικών απωλειών. Κατά συνέπεια, μία χαμηλότερη εμφανιζόμενη τιμή του OEE μετά την εφαρμογή ενός ψηφιακού συστήματος δεν αποτελεί από μόνη της επαρκή ένδειξη πραγματικής επιδείνωσης της παραγωγικής λειτουργίας, καθώς μπορεί να συνδέεται και με την πληρέστερη καταγραφή απωλειών που προηγουμένως δεν αποτυπώνονταν με την ίδια λεπτομέρεια.

Παράλληλα, η μελέτη ανέδειξε ότι η ψηφιακή καταγραφή δεν εξασφαλίζει από μόνη της την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων. Η ποιότητα των δεικτών εξακολουθεί να εξαρτάται από την ορθή χρήση του συστήματος, την τυποποίηση των διαδικασιών και την εκπαίδευση των χρηστών. Στην αρχική περίοδο εφαρμογής του PLEX, οι χρονικές ασυνέπειες που εντοπίστηκαν στις παραγωγικές δηλώσεις αντιμετωπίστηκαν με επαναληπτική εκπαίδευση των χειριστών και με την καθιέρωση της ολοκλήρωσης της παραγωγικής δήλωσης τουλάχιστον δεκαπέντε λεπτά πριν από τη λήξη της βάρδιας. Μετά την εφαρμογή των ενεργειών αυτών, τα αντίστοιχα περιστατικά δεν παρατηρήθηκαν εκ νέου, γεγονός που αναδεικνύει τη σημασία της έγκαιρης αναγνώρισης και αντιμετώπισης προβλημάτων ποιότητας δεδομένων.

Σε πρακτικό επίπεδο, η περαιτέρω αξιοποίηση του PLEX πρέπει να επικεντρωθεί στη συστηματική ανάλυση των χρόνων στάσης, στην ιεράρχηση των σημαντικότερων αιτιών απώλειας Διαθεσιμότητας, στην τυποποίηση των κωδικών αιτιολόγησης, στην περιοδική ανασκόπηση των δεικτών και στη συνεχή εκπαίδευση των χρηστών. Παράλληλα, η συνεργασία μεταξύ Παραγωγής, Συντήρησης και Ποιότητας μπορεί να υποστηρίξει τη μετατροπή των πληροφοριών του συστήματος σε συγκεκριμένες διορθωτικές και προληπτικές ενέργειες.

Σε στρατηγικό επίπεδο, η συστηματική αξιοποίηση των δεδομένων του PLEX μπορεί να υποστηρίξει τη μετάβαση από μια κυρίως αντιδραστική προσέγγιση διαχείρισης της παραγωγής σε μια περισσότερο τεκμηριωμένη και προληπτική προσέγγιση. Η συνεχής παρακολούθηση των πραγματικών χρόνων στάσης, των τεχνικών βλαβών, των αλλαγών

προϊόντος και των λοιπών παραγωγικών απωλειών μπορεί να συμβάλει στον καλύτερο προγραμματισμό των παρεμβάσεων και στη σταδιακή βελτίωση της σταθερότητας της γραμμής.

Συνολικά, η παρούσα εργασία δείχνει ότι η ουσιαστική αξία του PLEX δεν βρίσκεται μόνο στην παραγωγή και παρακολούθηση των KPIs, αλλά κυρίως στη δημιουργία μιας πιο διαφανούς, συστηματικής και αξιοποιήσιμης βάσης δεδομένων για τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων. Η αποτελεσματική αξιοποίηση αυτής της πληροφορίας, σε συνδυασμό με τη σταθερή εφαρμογή των διαδικασιών και τη συνεχή βελτίωση της ποιότητας των δεδομένων, μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εργαλείο για τη μακροπρόθεσμη βελτίωση της παραγωγικής λειτουργίας.

Βιβλιογραφία

- Bachhav, P., Patil, S., Jadhav, M., & Kene, H. (2026). MES-Driven Digitalization in Automotive Stamping Industry: A Case Study of Tandem Press Line. *Science Essence Journal*, 42(1), σσ. 14-49.
- Bianchini, A., Savini, I., Andreoni, A., Morolli, M., & Solfrini, V. (2024). Manufacturing Execution System Application within Manufacturing Small–Medium Enterprises towards Key Performance Indicators Development and Their Implementation in the Production Line. *Sustainability*, 16(7), σ. 2974. doi:10.3390/su16072974
- Boudjenoun, C., Saib, M., Zemmouchi-Ghomari, L., & Rezgui, W. (2025). Leveraging intelligent manufacturing execution systems for digital transformation in the food and beverage industry. *Journal of Intelligent Manufacturing and Special Equipment*, 6(2), σσ. 155-180. doi:10.1108/JIMSE-05-2025-0006

- Costa, L., Almeida, A., & Reis, L. (2024). Methodology for Implementing a Manufacturing Execution System in the Machinery and Equipment Industry. *Procedia Computer Science*, 232, σσ. 2028-2037. doi:10.1016/j.procs.2024.02.025
- Dal, B., Tugwell, P., & Greatbanks, R. (2000). Overall equipment effectiveness as a measure of operational improvement – A practical analysis. *International Journal of Operations & Production Management*, 20(12), σσ. 1488-1502. doi:10.1108/01443570010355750
- Hedman, R., Subramaniyan, M., & Almström, P. (2016). Analysis of Critical Factors for Automatic Measurement of OEE. *Procedia CIRP*, 57, σσ. 128-133. doi:10.1016/j.procir.2016.11.023
- Innecco, R., Martins, H., & Gonçalves, C. (2022). Use of the Manufacturing Execution System in Practice: Understanding the end Users and the Acceptance of the System. *Revista Gestão da Produção Operações e Sistemas*, 17(2), σ. 57. doi:10.15675/gepros.v17i2.2863
- Jericho, D., Jagusch, K., Sender, J., & Flügge, W. (2024). Methods for evaluating and improving manual process data acquisition in one-of-a-kind productions. *Procedia CIRP*, 126, σσ. 272-276. doi:10.1016/j.procir.2024.08.338
- Kamble, S., Gunasekaran, A., Ghadge, A., & Raut, R. (2020). A performance measurement system for Industry 4.0 enabled smart manufacturing system in SMMEs – A review and empirical investigation. *International Journal of Production Economics*, 229, σ. 107853. doi:10.1016/j.ijpe.2020.107853
- Kletti, J. (2007). *Manufacturing Execution System - MES* (1 εκδ.). Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978-3-540-49744-8
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). A Cyber-Physical Systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, σσ. 18-23. doi:10.1016/j.mfglet.2014.12.001
- Mayer, L., Mehdiyev, N., & Fettke, P. (2021). Manufacturing execution systems driven process analytics: A case study from individual manufacturing. *Procedia CIRP*, 97, σσ. 284-289. doi:10.1016/j.procir.2020.05.239

- Mourtzis, D., Vlachou, E., & Milas, N. (2016). Industrial Big Data as a Result of IoT Adoption in Manufacturing. *Procedia CIRP*, 55, σσ. 290-295. doi:10.1016/j.procir.2016.07.038
- Muchiri, P., & Pintelon, L. (2008). Performance measurement using overall equipment effectiveness (OEE): Literature review and practical application discussion. *International Journal of Production Research*, 46(13), σσ. 3517-3535. doi:10.1080/00207540601142645
- Nakajima, S. (1988). *Introduction to TPM: Total Productive Maintenance*. Cambridge, MA: Productivity Press.
- Ng Corrales, L., Lambán, M., Hernandez Korner, M., & Royo, J. (2020). Overall Equipment Effectiveness: Systematic Literature Review and Overview of Different Approaches. *Applied Sciences*, 10(18), σ. 6469. doi:10.3390/app10186469
- Peixoto, T., Oliveira, B., Oliveira, Ó., & Ribeiro, F. (2025). Data Quality Assessment in Smart Manufacturing: A Review. *Systems*, 13(4), σ. 243. doi:10.3390/systems13040243
- Shojaeinasab, A., Charter, T., Jalayer, M., Khadivi, M., Ogunfowora, O., Raiyani, N., . . . Najjaran, H. (2022). Intelligent manufacturing execution systems: A systematic review. *Journal of Manufacturing Systems*, 62, σσ. 503-522. doi:10.1016/j.jmsy.2022.01.004
- Stavropoulos, P., Papacharalampopoulos, A., Sabatakakis, K., & Mourtzis, D. (2021). Quality Monitoring of Manufacturing Processes based on Full Data Utilization. *Procedia CIRP*, 104, σσ. 1656-1661. doi:10.1016/j.procir.2021.11.279
- Thurnheer, J., Fiedler, J., Plümke, L., & Netland, T. (2024). Manual Data Collection in Assembly Lines: A Case Study on the Human Factor in Data Accuracy. *IFAC-PapersOnLine*, 58(19), σσ. 85-90. doi:10.1016/j.ifacol.2024.09.098
- Wang, T.-Y., & Pan, H.-C. (2011). Improving the OEE and UPH data quality by Automated Data Collection for the semiconductor assembly industry. *Expert Systems with Applications*, 38(5), σσ. 5764-5773. doi:10.1016/j.eswa.2010.10.056

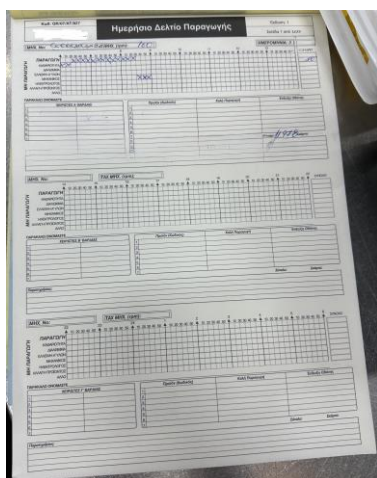
Παραρτήματα

Παράρτημα Α. Ενδεικτικό φύλλο χειροκίνητης καταγραφής πριν από την εφαρμογή του PLEX

Στο Παράρτημα Α παρουσιάζεται ενδεικτικό απόσπασμα της μορφής καταγραφής που χρησιμοποιούνταν πριν από την εφαρμογή του PLEX. Η καταγραφή βασιζόταν σε χειρόγραφες ή ημι-χειροκίνητες πρακτικές και περιλάμβανε στοιχεία όπως ημερομηνία, βάρδια, μηχανή, παραχθείσες ποσότητες, απορρίψεις και χρόνους καθυστέρησης. Το απόσπασμα χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την τεκμηρίωση της μεθόδου συλλογής δεδομένων και έχει ανωνυμοποιηθεί όπου απαιτείται.

Για λόγους προστασίας των επιχειρησιακών δεδομένων, παρουσιάζεται ενδεικτικό φύλλο καταγραφής από αντίστοιχη γραμμή παραγωγής, σε πλήρως ανωνυμοποιημένη μορφή. Η φόρμα χρησιμοποιείται αποκλειστικά για την παρουσίαση της διαδικασίας χειροκίνητης συλλογής δεδομένων πριν από την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής.

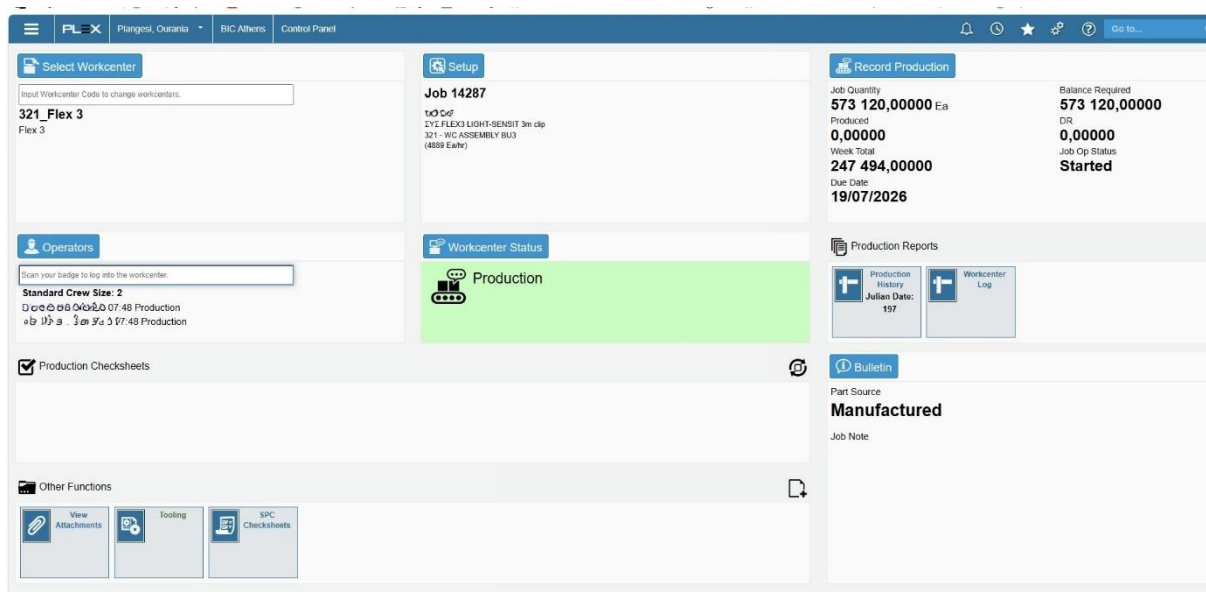
Σχήμα Α1. Ενδεικτικό φύλλο χειροκίνητης καταγραφής παραγωγικών δεδομένων πριν από την εφαρμογή του PLEX (σε ανωνυμοποιημένη μορφή).



Παράρτημα Β. Ενδεικτική οθόνη ή εξαγωγή δεδομένων από το PLEX

Στο Παράρτημα Β παρουσιάζεται ενδεικτική οθόνη ή εξαγωγή δεδομένων από το PLEX, μέσω της οποίας πραγματοποιήθηκε η άντληση των στοιχείων της περιόδου μετά την εφαρμογή του Συστήματος Εκτέλεσης Παραγωγής. Τα δεδομένα περιλαμβάνουν πληροφορίες για την ημερομηνία, τη βάρδια, τη μηχανή, τον χρόνο λειτουργίας, τον χρόνο στάσης, τις ποσότητες παραγωγής και τους σχετικούς δείκτες απόδοσης. Η παρουσίαση γίνεται σε ανωνυμοποιημένη μορφή, χωρίς στοιχεία εργαζομένων ή ευαίσθητες επιχειρησιακές πληροφορίες.

Σχήμα Β1. Ενδεικτική οθόνη / εξαγωγή δεδομένων από το PLEX



Παράρτημα Γ. Δείγμα δεδομένων πριν από την εφαρμογή του PLEX

Στο Παράρτημα Γ παρουσιάζεται ενδεικτικό δείγμα των δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν για την περίοδο πριν από την εφαρμογή του PLEX. Το πλήρες αρχείο περιλάμβανε 108 αξιοποιήσιμες εγγραφές βαρδιών για τη μηχανή Flex 3. Για λόγους προστασίας των επιχειρησιακών δεδομένων, παρουσιάζεται μόνο περιορισμένο και ενδεικτικό απόσπασμα.

Πίνακας Γ1. Ενδεικτικό δείγμα δεδομένων πριν από την εφαρμογή του PLEX

Date	Shift	Machine	OEE (shift) %	Performance (shift)	Quality (shift)	Availability (shift)	Downtime (shift) (min)	Good Parts (shift)	Defective Parts (shift)
10-Ιουν-25	1	Flex 3	93,36%	93,74%	99,59%	100,00%	0,00	36.300,00	147,73
10-Ιουν-25	2	Flex 3	93,81%	93,99%	99,80%	100,00%	0,00	42.325,00	85,53
10-Ιουν-25	3	Flex 3	91,98%	92,21%	99,75%	100,00%	0,00	41.500,00	103,67
11-Ιουν-25	1	Flex 3	95,68%	96,88%	99,82%	98,94%	5,00	43.170,00	77,75
11-Ιουν-25	2	Flex 3	91,98%	92,12%	99,85%	100,00%	0,00	41.500,00	63,93
11-Ιουν-25	3	Flex 3	89,98%	91,29%	99,62%	98,94%	5,00	40.600,00	153,69
12-Ιουν-25	1	Flex 3	96,85%	97,02%	99,83%	100,00%	0,00	43.700,00	75,59
12-Ιουν-25	2	Flex 3	81,36%	99,61%	99,71%	81,91%	85,00	36.708,00	106,26
12-Ιουν-25	3	Flex 3	91,98%	92,23%	99,73%	100,00%	0,00	41.500,00	113,95
13-Ιουν-25	1	Flex 3	96,19%	96,40%	99,78%	100,00%	0,00	43.400,00	95,03
13-Ιουν-25	2	Flex 3	91,56%	95,04%	99,51%	96,81%	15,00	41.310,00	204,23
13-Ιουν-25	3	Flex 3	90,87%	91,10%	99,75%	100,00%	0,00	41.000,00	104,54
14-Ιουν-25	Σ/Κ - 1	Flex 3	88,82%	92,35%	99,68%	96,48%	25,00	60.537,00	194,38
14-Ιουν-25	Σ/Κ - 2	Flex 3	85,86%	89,25%	99,71%	96,48%	25,00	58.520,00	172,79
15-Ιουν-25	Σ/Κ - 1	Flex 3	91,41%	91,55%	99,85%	100,00%	0,00	62.308,00	95,03
15-Ιουν-25	Σ/Κ - 2	Flex 3	84,39%	84,52%	99,85%	100,00%	0,00	55.900,00	86,39
16-Ιουν-25	1	Flex 3	86,26%	92,11%	99,58%	94,05%	25,00	34.782,00	146,87
16-Ιουν-25	2	Flex 3	88,65%	91,86%	99,68%	96,81%	15,00	40.000,00	126,57
16-Ιουν-25	3	Flex 3	95,97%	96,10%	99,86%	100,00%	0,00	43.300,00	60,48

Παράρτημα Δ. Δείγμα δεδομένων μετά την εφαρμογή του PLEX

Στο Παράρτημα Δ παρουσιάζεται ενδεικτικό δείγμα των δεδομένων που αντλήθηκαν από το PLEX για την περίοδο μετά την εφαρμογή του συστήματος. Η αρχική εξαγωγή περιλάμβανε 114 παραγωγικές εγγραφές. Επειδή ορισμένες βάρδιες εμφανίζονταν με περισσότερες από μία γραμμές, λόγω παραγωγής διαφορετικών κωδικών προϊόντων εντός της ίδιας βάρδιας, οι εγγραφές ομαδοποιήθηκαν με βάση την ημερομηνία, τη βάρδια και τη μηχανή. Μετά την ομαδοποίηση προέκυψαν 103 διακριτές παραγωγικές βάρδιες.

Πίνακας Δ1. Ενδεικτικό δείγμα δεδομένων μετά την εφαρμογή του PLEX

Date	Workcenter	Shift	Performance	Quality	Availability	OEE	Downtime	Good Parts Produced
16/02/2026	321_Flex 3	1st	96%	100%	95%	91%	0,35	36.739
16/02/2026	321_Flex 3	2nd	97%	100%	91%	88%	0,68	39.390
16/02/2026	321_Flex 3	3rd	100%	100%	90%	90%	0,78	40.136
17/02/2026	321_Flex 3	1st	97%	100%	91%	89%	0,67	40.251
17/02/2026	321_Flex 3	2nd	97%	100%	90%	87%	0,75	39.687
17/02/2026	321_Flex 3	3rd	99%	100%	89%	88%	0,85	40.004
18/02/2026	321_Flex 3	1st	102%	100%	83%	85%	0,35	10.255
19/02/2026	321_Flex 3	2nd	100%	100%	87%	86%	0,85	32.417
19/02/2026	321_Flex 3	3rd	98%	100%	94%	92%	0,47	42.085
20/02/2026	321_Flex 3	1st	100%	100%	64%	64%	2,85	28.906
20/02/2026	321_Flex 3	2nd	100%	100%	78%	78%	1,58	32.458
20/02/2026	321_Flex 3	3rd	97%	100%	88%	86%	0,82	35.350
20/02/2026	321_Flex 3	3rd	89%	100%	92%	82%	0,07	3.734
21/02/2026	321_Flex 3	SK 1	100%	100%	84%	83%	1,9	56.491
21/02/2026	321_Flex 3	SK 2	102%	100%	83%	84%	1,35	38.919
21/02/2026	321_Flex 3	SK 2	100%	100%	72%	72%	0,82	12.480

Παράρτημα Ε. Παράδειγμα υπολογισμού Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού

Στο Παράρτημα Ε παρουσιάζεται ενδεικτικό παράδειγμα υπολογισμού της Συνολικής Αποτελεσματικότητας Εξοπλισμού. Ο υπολογισμός βασίζεται στις τρεις βασικές συνιστώσες του δείκτη: Διαθεσιμότητα, Απόδοση και Ποιότητα.

$$OEE = \text{Διαθεσιμότητα} \times \text{Απόδοση} \times \text{Ποιότητα}$$

Πίνακας Ε1. Ενδεικτικό παράδειγμα υπολογισμού OEE

Δείκτης	Τιμή
Διαθεσιμότητα	96,42%
Απόδοση	92,27%
Ποιότητα	99,61%
OEE	88,62%

Παράρτημα ΣΤ. Αντιστοίχιση πεδίων πριν και μετά την εφαρμογή του PLEX

Πίνακας ΣΤ1. Αντιστοίχιση βασικών πεδίων δεδομένων πριν και μετά την εφαρμογή του PLEX

Πεδίο / πληροφορία	Πριν από το PLEX	Μετά την εφαρμογή του PLEX	Παρατήρηση
Ημερομηνία	Διαθέσιμη	Διαθέσιμη	Χρησιμοποιήθηκε για την ομαδοποίηση των εγγραφών.
Βάρδια	Διαθέσιμη	Διαθέσιμη	Αποτελεί βασική μονάδα σύγκρισης.
Μηχανή	Διαθέσιμη	Διαθέσιμη	Η ανάλυση εστιάζει στη μηχανή Flex 3.
Αποδεκτά τεμάχια	GP / αποδεκτή παραγωγή	Good Parts Produced	Χρησιμοποιήθηκε για την παραγωγή ανά βάρδια και την Ποιότητα.
Απορρίψεις	DP / scrap	Scrap Parts	Χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση ποιοτικών απωλειών.

Πεδίο / πληροφορία	Πριν από το PLEX	Μετά την εφαρμογή του PLEX	Παρατήρηση
Συνολικά τεμάχια	TP / συνολική παραγωγή	Total Parts Produced	Χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της Ποιότητας.
Χρόνος στάσης	Επιμέρους χειροκίνητες κατηγορίες	Συνολικός χρόνος στάσης	Δεν υπήρχε πλήρως κοινή ανάλυση αιτιών στάσης.
Διαθεσιμότητα	Υπολογισμένη	Υπολογισμένη / διαθέσιμη από PLEX	Χρησιμοποιήθηκε στη συγκριτική ανάλυση.
Απόδοση	Υπολογισμένη	Υπολογισμένη / διαθέσιμη από PLEX	Ελέγχθηκε ειδικά λόγω τιμών άνω του 100%.
Ποιότητα	Υπολογισμένη	Υπολογισμένη / διαθέσιμη από PLEX	Παρέμεινε σε υψηλό επίπεδο και στις δύο περιόδους.
ΟΕΕ	Υπολογισμένο	Υπολογισμένο / διαθέσιμο από PLEX	Κεντρικός δείκτης της ανάλυσης.