



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΠΜΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ:

ΕΝΣΩΜΑΤΩΣΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ
INDUSTRY 4.0 ΣΤΟΝ ΚΛΑΔΟ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ
ΑΛΟΥΜΙΝΙΟΥ: ΜΕΛΕΤΗ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΜΥΡΩΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΚΑΝΕΛΛΙΔΗΣ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ, 2026



University of Piraeus

Department of Industrial Management and Technology

MSc in Industrial Management and Technology

Specialization:

INTEGRATION OF INDUSTRY 4.0 TECHNOLOGIES IN THE ALUMINIUM PRODUCTION SECTOR: A CASE STUDY

NIKOLAOS MYRONIS

SUPERVISOR: VASILEIOS KANELIDIS

PIRAEUS, 2026

ΔΗΛΩΣΗ

Η εργασία αυτή είναι πρωτότυπη και εκπονήθηκε αποκλειστικά και μόνο για την απόκτηση του συγκεκριμένου μεταπτυχιακού τίτλου.

Τα πνευματικά δικαιώματα χρησιμοποίησης του μη πρωτότυπου υλικού της ΜΔΕ ανήκουν στον μεταπτυχιακό φοιτητή και στο επιβλέπον μέλος ΔΕΠ εις ολόκληρο, δηλαδή εκάτερος μπορεί να κάνει χρήση αυτών χωρίς τη συναίνεση άλλου. Τα πνευματικά δικαιώματα χρησιμοποίησης του πρωτότυπου μέρους της ΜΔΕ ανήκουν στον μεταπτυχιακό φοιτητή και στον επιβλέποντα από κοινού, δηλαδή δεν μπορεί ο ένας από τους δύο να κάνει χρήση αυτού χωρίς τη συναίνεση του άλλου. Κατ' εξαίρεση, επιτρέπεται η δημοσίευση του πρωτότυπου μέρους της διπλωματικής εργασίας σε επιστημονικό περιοδικό ή πρακτικά συνεδρίου από τον ένα εκ των δύο, με την προϋπόθεση ότι αναφέρονται τα ονόματα και των δύο (ή των τριών σε περίπτωση συνεπιβλέποντα) ως συν-συγγραφέων. Στην περίπτωση αυτή προηγείται γραπτή ενημέρωση του μη συμμετέχοντα στη συγγραφή του επιστημονικού άρθρου. Δεν επιτρέπεται η κατά οποιοδήποτε τρόπο δημοσιοποίηση υλικού το οποίο έχει δηλωθεί εγγράφως ως απόρρητο.

Ο/Η Φοιτητής/Φοιτήτρια
(Ονοματεπώνυμο και υπογραφή)

Ο/Η Επιβλέπων/Επιβλέπουσα
(Ονοματεπώνυμο και υπογραφή)

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΜΥΡΩΝΗΣ

ΒΑΣΙΛΕΙΟΣ ΚΑΝΕΛΛΙΔΗΣ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η αξιοπιστία και η διαθεσιμότητα του βιομηχανικού εξοπλισμού αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για την ομαλή λειτουργία των σύγχρονων παραγωγικών εγκαταστάσεων. Στο πλαίσιο αυτό, η παρούσα εργασία εξετάζει την ανάλυση δεδομένων συντήρησης βιομηχανικών γραμμών επεξεργασίας αλουμινίου με στόχο την αξιολόγηση της λειτουργικής αξιοπιστίας του εξοπλισμού και τον εντοπισμό των κύριων παραγόντων που επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα των γραμμών παραγωγής.

Η μελέτη βασίστηκε στην ανάλυση πραγματικών δεδομένων βλαβών που συλλέχθηκαν από βιομηχανική εγκατάσταση για την περίοδο 2023–2025. Συγκεκριμένα εξετάστηκαν επτά κύριες γραμμές παραγωγής, οι οποίες λειτουργούν ως ανεξάρτητες μονάδες επεξεργασίας και παράγουν τελικό προϊόν. Τα δεδομένα περιλάμβαναν καταγραφές μηχανολογικών, ηλεκτρολογικών και λοιπών τεχνικών βλαβών, οι οποίες αναλύθηκαν σε μηνιαία και ετήσια βάση. Για την αξιολόγηση της λειτουργικής συμπεριφοράς των μηχανών χρησιμοποιήθηκαν βασικοί δείκτες αξιοπιστίας, όπως ο δείκτης MTBF (Mean Time Between Failures) και ο δείκτης MTTR (Mean Time To Repair), ενώ εφαρμόστηκε επίσης ανάλυση Pareto για τον εντοπισμό των σημαντικότερων αιτιών βλαβών.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης έδειξαν ότι η λειτουργική αξιοπιστία των γραμμών παραγωγής παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των επιμέρους μηχανών. Ορισμένες γραμμές εμφάνισαν υψηλότερα ποσοστά downtime και μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης βλαβών, γεγονός που επηρεάζει τη συνολική παραγωγική αποδοτικότητα της εγκατάστασης. Παράλληλα, η ανάλυση Pareto ανέδειξε ότι ένα περιορισμένο σύνολο αιτιών ευθύνεται για σημαντικό ποσοστό των διακοπών λειτουργίας, γεγονός που υποδηλώνει ότι η στοχευμένη αντιμετώπιση συγκεκριμένων τεχνικών προβλημάτων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική βελτίωση της αξιοπιστίας του εξοπλισμού.

Συμπερασματικά, η συστηματική καταγραφή και ανάλυση δεδομένων συντήρησης αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τη βελτίωση της διαχείρισης του βιομηχανικού εξοπλισμού. Η αξιοποίηση των δεικτών αξιοπιστίας και των τεχνικών ανάλυσης δεδομένων μπορεί να υποστηρίξει τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σχετικά με τη στρατηγική συντήρησης και να συμβάλει στη βελτίωση της διαθεσιμότητας και της αποδοτικότητας των παραγωγικών συστημάτων.

Λέξεις-κλειδιά: αξιοπιστία εξοπλισμού, βιομηχανική συντήρηση, MTBF, MTTR, ανάλυση Pareto

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο των σπουδών μου και αποτελεί το αποτέλεσμα μιας συστηματικής προσπάθειας μελέτης και ανάλυσης δεδομένων βιομηχανικής συντήρησης. Θα ήθελα αρχικά να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες προς τον επιβλέποντα καθηγητή μου για την καθοδήγηση, τις πολύτιμες παρατηρήσεις και τη συνεχή υποστήριξη που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Η επιστημονική του συμβολή και οι υποδείξεις του υπήρξαν καθοριστικές για την ολοκλήρωση της παρούσας μελέτης.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω όλους όσοι συνέβαλαν άμεσα ή έμμεσα στην υλοποίηση της έρευνας, παρέχοντας δεδομένα, τεχνικές πληροφορίες και χρήσιμες διευκρινίσεις σχετικά με τη λειτουργία και τη συντήρηση του βιομηχανικού εξοπλισμού που εξετάστηκε στην εργασία. Η συνεργασία και η προθυμία τους συνέβαλαν ουσιαστικά στη συλλογή και κατανόηση των στοιχείων που αποτέλεσαν τη βάση της ανάλυσης.

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

1. Εισαγωγή	1
2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 — Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	7
2.1 Industry 4.0 και ψηφιακός μετασχηματισμός της συντήρησης.....	7
2.2 Θεωρητικό πλαίσιο συντήρησης και εξέλιξη προς Condition-Based Maintenance	10
2.3 Reliability, Maintainability και οι δείκτες MTBF – MTTR ως αναπαραστάσεις λειτουργικής ωριμότητας.....	14
2.4 Διαθεσιμότητα, OEE και η λειτουργική διασύνδεση συντήρησης και παραγωγής.....	17
2.5 Επαναληπτικότητα αστοχιών, failure patterns και οργανωσιακή μάθηση στη συντήρηση.....	20
2.6 Μετάβαση από την προγραμματισμένη συντήρηση σε condition-based και data-driven πρακτικές σε process-intensive βιομηχανικά περιβάλλοντα	23
2.7 Χωρική διάσταση της φθοράς και διαφοροποίηση failure mechanisms ανά λειτουργική περιοχή εξοπλισμού	27
2.8 Αξιοπιστία rolling equipment και metal-forming διεργασιών: θερμομηχανική φόρτιση, φθορά και λειτουργική συμπεριφορά εξοπλισμού	30
2.9 Failure propagation και συστημική διάσταση του downtime σε continuous production lines.....	34
2.10 Σύνθεση θεωρητικού πλαισίου και σύνδεση με βιομηχανική πρακτική .	37
3. Μεθοδολογία Έρευνας (Research Methodology).....	41
3.1 Ερευνητική προσέγγιση και σχεδιασμός μελέτης (Research Approach and Study Design).....	41
3.2 Περιγραφή Βιομηχανικού Συστήματος και Μελέτης Περίπτωσης (Industrial System and Case Study Description)	44
3.3 Περιγραφή Δεδομένων και Δομής Dataset (Data Description and Dataset Structure).....	48
3.4 Μεθοδολογία Ανάλυσης Δεδομένων (Analytical Methodology).....	51

4. Ανάλυση Αποτελεσμάτων (Results and Empirical Analysis)	54
4.1 Συνολική Κατανομή Καθυστερήσεων μεταξύ Μηχανών (Downtime Distribution Across Machines).....	55
4.2 Χρονική Εξέλιξη των Καθυστερήσεων Λειτουργίας (Temporal Evolution of Downtime)	57
4.3 Ανάλυση Τύπων Βλαβών (Failure Type Analysis)	60
4.4 Ανάλυση Pareto για τη μηχανή Georg-1 (Pareto Analysis for Georg-1)	63
4.5 Ανάλυση Pareto για τη μηχανή Herrvoss-2 (Pareto Analysis for Herrvoss-2)	70
4.6 Συμπεράσματα ανάλυσης (Summary of Findings).....	77
5. Προτάσεις βελτίωσης και εφαρμογή predictive maintenance (Improvement Proposals and Predictive Maintenance Strategy).....	79
5.1 Ανάγκη για βελτίωση της στρατηγικής συντήρησης (Need for maintenance strategy improvement)	79
5.2 Προληπτική και προγνωστική συντήρηση (Preventive and Predictive Maintenance Approaches).....	81
6. Μεθοδολογία Έρευνας, Συμπεράσματα και Προτάσεις (Research Methodology, Conclusions and Recommendations)	84
6.1 Μεθοδολογία Έρευνας (Research Methodology)	84
6.2 Συμπεράσματα (Conclusions).....	85
6.3 Προτάσεις (Recommendations).....	86
Βιβλιογραφία	88

ΛΙΣΤΑ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 4.1 – Average annual downtime percentage per machine during the period 2023–2025.....	56
Σχήμα 4.2 – Annual Downtime Percentage per Machine (2023–2025).....	58
Σχήμα 4.3 – Distribution of mechanical and electrical failures per machine (average values for the period 2023–2025)	62
Σχήμα 4.4 – Pareto analysis of failures for Georg-1 (2023)	65
Σχήμα 4.5 – Pareto analysis of failures for Georg-1 (2024).....	66
Σχήμα 4.6 – Pareto analysis of failures for Georg-1 (2025).....	66
Σχήμα 4.7 – Monthly MTBF trend for Georg-1 (2023–2025).....	68
Σχήμα 4.8 – Monthly MTTR trend for Georg-1 (2023–2025).....	69
Σχήμα 4.9 – Pareto analysis of failures for Herrvoss-2 (2023).....	72
Σχήμα 4.10 – Pareto analysis of failures for Herrvoss-2 (2024)	72
Σχήμα 4.11 – Pareto analysis of failures for Herrvoss-2 (2025)	73
Σχήμα 4.12 – Monthly MTBF trend for Herrvoss-2 (2023–2025)	75
Σχήμα 4.13 – Monthly MTTR trend for Herrvoss-2 (2023–2025)	76

ΛΙΣΤΑ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ, ΣΥΜΒΟΛΩΝ & ΛΕΞΙΛΟΓΙΟ

Συντομογραφία / Όρος	Αγγλικός Όρος	Επεξήγηση
MTBF	Mean Time Between Failures	Μέσο χρονικό διάστημα μεταξύ διαδοχικών βλαβών ενός συστήματος ή μηχανής. Αποτελεί βασικό δείκτη αξιοπιστίας εξοπλισμού.
MTTR	Mean Time To Repair	Μέσος χρόνος που απαιτείται για την αποκατάσταση μιας βλάβης και την επαναφορά του εξοπλισμού σε λειτουργία.
Downtime	Downtime	Χρονικό διάστημα κατά το οποίο μια μηχανή ή γραμμή παραγωγής δεν λειτουργεί λόγω βλάβης ή εργασιών συντήρησης.
Reliability	Reliability	Η ικανότητα ενός συστήματος ή εξοπλισμού να λειτουργεί χωρίς αστοχίες για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα.
Maintenance	Maintenance	Το σύνολο των τεχνικών ενεργειών που πραγματοποιούνται για τη διατήρηση ή αποκατάσταση της λειτουργικότητας του εξοπλισμού.
Preventive Maintenance	Preventive Maintenance	Προγραμματισμένες εργασίες συντήρησης που πραγματοποιούνται σε τακτά χρονικά διαστήματα με σκοπό την αποφυγή βλαβών.
Predictive Maintenance	Predictive Maintenance	Στρατηγική συντήρησης που βασίζεται στην ανάλυση δεδομένων και στην παρακολούθηση της κατάστασης του εξοπλισμού για την πρόβλεψη πιθανών βλαβών.

Pareto Analysis	Pareto Analysis	Μέθοδος ανάλυσης που χρησιμοποιείται για τον εντοπισμό των σημαντικότερων αιτιών ενός προβλήματος, σύμφωνα με την αρχή 80/20.
Failure	Failure	Τεχνική αστοχία που οδηγεί σε διακοπή ή υποβάθμιση της λειτουργίας ενός συστήματος.
Production Line	Production Line	Γραμμή παραγωγής που αποτελείται από εξοπλισμό επεξεργασίας υλικών για την παραγωγή τελικού προϊόντος.
Condition Monitoring	Condition Monitoring	Διαδικασία συνεχούς παρακολούθησης της λειτουργικής κατάστασης εξοπλισμού μέσω αισθητήρων ή δεδομένων λειτουργίας.
Equipment Availability	Equipment Availability	Ποσοστό του χρόνου κατά τον οποίο ο εξοπλισμός είναι διαθέσιμος για παραγωγή.

1. Εισαγωγή

Η βιομηχανική παραγωγή αλουμινίου εντάσσεται σε ένα ιδιαίτερα απαιτητικό και τεχνολογικά σύνθετο πεδίο βαριάς βιομηχανίας, στο οποίο οι παραγωγικές διεργασίες είναι συνεχείς, ενεργειακά εντατικές και έντονα εξαρτώμενες από τη λειτουργική σταθερότητα του μηχανολογικού εξοπλισμού. Σε τέτοια περιβάλλοντα εντατικών διεργασιών (process-intensive environments), ακόμη και βραχύχρονες διακοπές λειτουργίας (downtime) δεν αποτελούν απλώς τεχνικά συμβάντα συντήρησης, αλλά εκδηλώνονται ως γεγονότα με πολλαπλασιαστικές επιπτώσεις στην παραγωγική ροή, στη θερμομηχανική ισορροπία των διεργασιών, στην ποιότητα του παραγόμενου προϊόντος και στο συνολικό λειτουργικό κόστος (Mobley, 2002; Wireman, 2010). Υπό αυτό το πρίσμα, η συντήρηση (maintenance) δεν λειτουργεί ως επικουρική υποστηρικτική δραστηριότητα, αλλά ως δομικός μηχανισμός αξιοπιστίας (reliability) — reliability backbone — του παραγωγικού συστήματος (Jardine et al., 2006).

Οι βιομηχανικές μονάδες βαριάς παραγωγής χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό τεχνολογικής πολυπλοκότητας, έντονη ενεργειακή κατανάλωση και συνεχή ροή υλικού, στην οποία η λειτουργική συνέχεια του εξοπλισμού αποτελεί θεμελιώδη προϋπόθεση για τη σταθερότητα του συστήματος. Ο εξοπλισμός δεν λειτουργεί σε απομονωμένες παραγωγικές μονάδες, αλλά εντάσσεται σε σειριακές και αλληλεξαρτώμενες διεργασίες, όπου μία αστοχία (failure) σε κρίσιμο υποσύστημα μπορεί να μετασχηματιστεί σε αλυσιδωτή διαταραχή σε πολλαπλά στάδια της γραμμής. Το φαινόμενο αυτό είναι ιδιαίτερα έντονο σε διεργασίες θερμικής κατεργασίας, έλασης και ψύξης, όπου η χρονική ασυνέχεια δεν επηρεάζει μόνο τον όγκο παραγωγής, αλλά και τη θερμομηχανική συμπεριφορά του υλικού, δημιουργώντας δευτερογενείς λειτουργικές και ποιοτικές επιβαρύνσεις (Moubray, 1997; Wireman, 2010).

Σε τέτοιες συνθήκες, η έννοια της αξιοπιστίας (reliability) δεν περιορίζεται στη μηχανική αντοχή μεμονωμένων εξαρτημάτων, αλλά αποκτά συστημικό χαρακτήρα και συνδέεται με την ικανότητα του παραγωγικού συστήματος να διατηρεί λειτουργική σταθερότητα υπό συνεχή φόρτιση και φθορά (Jardine et al., 2006). Η συντήρηση δεν δρα μόνο στο επίπεδο της τεχνικής αποκατάστασης· παρεμβαίνει στη διαχείριση της λειτουργικής

αβεβαιότητας, περιορίζοντας τη μεταβλητότητα και ενισχύοντας την προβλεψιμότητα της παραγωγικής διαδικασίας (Mobley, 2002).

Η λειτουργική σταθερότητα μιας βιομηχανικής μονάδας δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τον σχεδιασμό και τις ονομαστικές προδιαγραφές του εξοπλισμού, αλλά και από τον τρόπο με τον οποίο ο οργανισμός κατανοεί, καταγράφει και ερμηνεύει τη συμπεριφορά του εξοπλισμού στον χρόνο. Τα αρχεία καταγραφής αστοχιών (failure logs), οι χρόνοι αποκατάστασης (repair times), τα επαναλαμβανόμενα μοτίβα αστοχιών (failure modes) και οι χρονικές μεταβολές του χρόνου διακοπής λειτουργίας (downtime) συγκροτούν ένα σώμα συσσωρευμένης τεχνικής εμπειρίας, μέσα από το οποίο διαμορφώνονται η κουλτούρα συντήρησης, η επιχειρησιακή ετοιμότητα και η λειτουργική ωριμότητα του συστήματος (Tsang, 2002; Jardine et al., 2006).

Μέσα σε αυτό το λειτουργικό και τεχνολογικό περιβάλλον, το Industry 4.0 (Βιομηχανία 4.0) δεν νοείται μόνο ως σύνολο ψηφιακών τεχνολογιών, αλλά ως μετασχηματισμός του τρόπου με τον οποίο η βιομηχανία αλληλεπιδρά με τα δεδομένα λειτουργίας. Η σταδιακή ενσωμάτωση υποδομών βιομηχανικού διαδικτύου των πραγμάτων (industrial IoT), συστημάτων ιχνηλασιμότητας, ολοκλήρωσης συστημάτων εκτέλεσης παραγωγής και επιχειρησιακού σχεδιασμού (MES–ERP), πρακτικών παρακολούθησης κατάστασης (condition monitoring) και λήψης αποφάσεων βάσει δεδομένων (data-driven decision making) οδηγεί σε ένα διαφορετικό λειτουργικό υπόδειγμα συντήρησης (Lee et al., 2015; Carvalho et al., 2019). Η συντήρηση μετατοπίζεται από χρονικά προγραμματισμένα μοντέλα (time-based) προς ένα παράδειγμα συντήρησης βάσει κατάστασης / προγνωστικής συντήρησης (condition-based / predictive maintenance paradigm), στο οποίο τα λειτουργικά δεδομένα, οι χρονοσειρές αστοχιών και οι ενδείξεις φθοράς γίνονται κεντρικά εργαλεία τεχνικής ερμηνείας και λήψης αποφάσεων (Jardine et al., 2006; Lee et al., 2015).

Ο κλάδος παραγωγής και μεταποίησης αλουμινίου παρουσιάζει ιδιαίτερες μηχανολογικές και λειτουργικές απαιτήσεις, λόγω της διαδοχής θερμικών και μηχανικών διεργασιών — θέρμανσης, ομογενοποίησης, έλασης, μορφοποίησης και ψύξης — όπου η σταθερότητα των συνθηκών λειτουργίας επηρεάζει άμεσα τόσο τις μηχανικές ιδιότητες όσο και τη γεωμετρική ακρίβεια του προϊόντος. Οι μηχανές που υποστηρίζουν τις διεργασίες αυτές (γραμμές έλασης, κινητήρια και μεταδοτικά συστήματα, υδραυλικές

μονάδες, συστήματα ψύξης και καθοδήγησης υλικού) λειτουργούν υπό υψηλά θερμομηχανικά φορτία και συχνά σε συνεχή κύκλο λειτουργίας, αναπτύσσοντας σύνθετες μορφές φθοράς και συσσωρευτικής υποβάθμισης (Moubray, 1997; Mobley, 2002).

Υπό αυτό το πρίσμα, η κατανόηση των προτύπων αστοχίας (failure patterns) στον κλάδο του αλουμινίου δεν μπορεί να περιοριστεί σε συγκεντρωτικές στατιστικές αποτιμήσεις· απαιτεί λειτουργική ανάλυση ανά υποσύστημα και λειτουργική περιοχή, καθώς η τεχνική ευπάθεια δεν κατανέμεται ομοιόμορφα στο σύστημα, αλλά συγκεντρώνεται σε κρίσιμες περιοχές όπου συνδυάζονται έντονες μηχανικές, θερμικές ή δυναμικές καταπονήσεις (Jardine et al., 2006).

Σε ένα σύγχρονο βιομηχανικό σύστημα έλασης και επεξεργασίας αλουμινίου, ο εξοπλισμός μπορεί να ιδωθεί ως ιεραρχική δομή λειτουργικών υποσυστημάτων, στα οποία κάθε υποσύστημα επιτελεί διακριτό ρόλο στη διαμόρφωση της παραγωγικής ροής. Η αστοχία ενός επιμέρους υποσυστήματος δεν αποτελεί πάντα απομονωμένο τεχνικό γεγονός, αλλά μπορεί να προκαλέσει δευτερογενείς επιβαρύνσεις, μεταβολή κατανομής φορτίων, διαφοροποίηση θερμικών συνθηκών και επιταχυνόμενη φθορά γειτονικών τμημάτων. Επομένως, η ανάλυση των γεγονότων αστοχίας (failure events) μόνο σε επίπεδο συνολικής μηχανής είναι συχνά ανεπαρκής· απαιτείται διάκριση ανά λειτουργική περιοχή, ώστε να εντοπίζονται τα πραγματικά σημεία λειτουργικού κινδύνου και ο τρόπος με τον οποίο αυτά εξελίσσονται στον χρόνο (Tsang, 2002; Carvalho et al., 2019).

Σε αυτό το πλαίσιο εντάσσεται η παρούσα διπλωματική εργασία, η οποία εξετάζει την ενσωμάτωση αρχών και πρακτικών Industry 4.0 (Βιομηχανίας 4.0) στον κλάδο παραγωγής αλουμινίου, μέσα από μια εφαρμοσμένη μελέτη περίπτωσης βιομηχανικής μονάδας. Η ανάλυση βασίζεται σε τριετές σύνολο λειτουργικών δεδομένων συντήρησης, καταγεγραμμένο:

- σε επίπεδο μηχανής (equipment-level),
- σε επίπεδο λειτουργικής περιοχής / υποσυστήματος,
- με σαφή διάκριση προγραμματισμένων και μη προγραμματισμένων γεγονότων συντήρησης (planned and unplanned maintenance events).

Η ύπαρξη αυτής της δομημένης βάσης δεδομένων επιτρέπει την ανάπτυξη μιας πολυεπίπεδης ανάλυσης, όπου τα γεγονότα αστοχίας (failure events) αντιμετωπίζονται ως εξελικτικές ακολουθίες λειτουργικής συμπεριφοράς, οι οποίες συνθέτουν πρότυπα αξιοπιστίας (reliability patterns) και επηρεάζουν τη συνολική λειτουργία του συστήματος (Jardine et al., 2006; Carvalho et al., 2019).

Κεντρικός άξονας της εργασίας είναι η συστηματική αποτύπωση των προτύπων αστοχίας (failure patterns) και των φαινομένων διακοπής λειτουργίας (downtime) σε επίπεδο μηχανής και λειτουργικής περιοχής. Η ανάλυση εστιάζει στη χωρική και λειτουργική κατανομή των αστοχιών, στην επαναληπτικότητα συγκεκριμένων μορφών αστοχίας (failure modes) και στην ανάδειξη λειτουργικών “hotspots” με αυξημένη συγκέντρωση τεχνικού κινδύνου. Η μελέτη των αρχείων καταγραφής αστοχιών (failure logs) σε βάθος τριετίας επιτρέπει την κατανόηση όχι μόνο του ποια αστοχία συνέβη, αλλά και πώς εξελίσσεται η τεχνική συμπεριφορά του εξοπλισμού στον χρόνο, μέσω της αποτύπωσης συσσωρευτικών μικροαστοχιών και αλλαγών στη λειτουργική σταθερότητα (Tsang, 2002).

Παράλληλα, σημαντική θέση κατέχει η ανάλυση της χρονικής εξέλιξης των δεικτών αξιοπιστίας (reliability), συντηρησιμότητας (maintainability) και διαθεσιμότητας (availability). Οι δείκτες Μέσου Χρόνου Μεταξύ Αστοχιών (MTBF - Mean Time Between Failures) και Μέσου Χρόνου Αποκατάστασης (MTTR - Mean Time To Repair) εξετάζονται ως συνθετικοί δείκτες τεχνικής και οργανωσιακής ωριμότητας. Η αύξηση του MTBF ερμηνεύεται ως ένδειξη σταδιακής σταθεροποίησης της συμπεριφοράς κρίσιμων υποσυστημάτων και βελτίωσης των προληπτικών πρακτικών (preventive practices), ενώ η μείωση του MTTR συνδέεται με ενίσχυση της επιχειρησιακής ετοιμότητας, καλύτερη τεχνική τεκμηρίωση, αποτελεσματικότερη διαχείριση ανταλλακτικών και υψηλότερη συνοχή διαδικασιών (Nakajima, 1988; Wireman, 2010).

Οι δείκτες διαθεσιμότητας (availability) και συνολικής αποτελεσματικότητας εξοπλισμού (OEE - Overall Equipment Effectiveness) λειτουργούν ως γέφυρα μεταξύ τεχνικής και παραγωγικής διάστασης, μεταφράζοντας τις μεταβολές αξιοπιστίας σε λειτουργική απόδοση και παραγωγική σταθερότητα (Nakajima, 1988). Η συγκριτική τους ανάλυση σε βάθος τριετίας αποσκοπεί στην ανάδειξη της σχέσης μεταξύ ωρίμανσης των πρακτικών συντήρησης και μείωσης της λειτουργικής αβεβαιότητας.

Ιδιαίτερη βαρύτητα αποδίδεται στη διερεύνηση του ρόλου της προγραμματισμένης / προληπτικής συντήρησης (planned – preventive maintenance). Δεδομένου ότι σημαντικό ποσοστό των παρεμβάσεων είναι ήδη προγραμματισμένο, η εργασία δεν προσεγγίζει την προληπτική συντήρηση (preventive maintenance) ως θεωρητικό υπόδειγμα, αλλά ως ενεργή και εξελισσόμενη οργανωσιακή πρακτική. Εξετάζεται ο βαθμός στον οποίο η αυξημένη συστηματικότητα των προγραμματισμένων εργασιών:

- μειώνει την επαναληπτικότητα συγκεκριμένων μορφών αστοχίας (failure modes),
- εξομαλύνει τη διασπορά του χρόνου διακοπής λειτουργίας (downtime),
- ενισχύει την αξιοπιστία κρίσιμων λειτουργικών υποσυστημάτων (Wireman, 2010; Tsang, 2002).

Παράλληλα, αναλύεται ο τρόπος με τον οποίο η σταδιακή ενσωμάτωση στοιχείων λογικής βάσει κατάστασης (condition-based logic) — ακόμη και χωρίς πλήρη αυτοματοποίηση προγνωστικής αναλυτικής (predictive analytics) — συμβάλλει στη βαθύτερη κατανόηση της λειτουργικής «υγείας» του εξοπλισμού και υποστηρίζει πιο τεκμηριωμένες τεχνικές αποφάσεις (Jardine et al., 2006; Carvalho et al., 2019). Η εργασία, συνεπώς, δεν αποσκοπεί στην παρουσίαση πλήρως ανεπτυγμένου προγνωστικού περιβάλλοντος (predictive environment), αλλά στην ανάδειξη της διαδικασίας μετάβασης και ωρίμανσης προς πρακτικές συντήρησης βασισμένες σε πληροφόρηση από δεδομένα (data-informed maintenance practices).

Σε συνολικό επίπεδο, η παρούσα μελέτη αντιμετωπίζει τη συντήρηση όχι μόνο ως σύνολο τεχνικών ενεργειών, αλλά ως λειτουργικό μηχανισμό μάθησης του βιομηχανικού συστήματος. Τα δεδομένα συντήρησης προσεγγίζονται ως φορείς οργανωσιακής γνώσης, οι οποίοι αποτυπώνουν την εξελικτική σχέση ανάμεσα στον εξοπλισμό, τον λειτουργικό κίνδυνο και τις πρακτικές συντήρησης στο πλαίσιο του Industry 4.0 (Βιομηχανίας 4.0) (Lee et al., 2015; Carvalho et al., 2019).

Η συμβολή της εργασίας διαμορφώνεται σε τρία επίπεδα:

- (α) εφαρμοστικό, μέσω της αξιοποίησης πραγματικών βιομηχανικών δεδομένων συντήρησης (industrial maintenance data) τριετίας·
- (β) μεθοδολογικό, μέσω της ανάπτυξης συνεκτικού πλαισίου ανάλυσης δυναμικής αστοχιών (failure dynamics) σε περιβάλλοντα εντατικών διεργασιών (process-intensive environments)·
- (γ) λειτουργικό, μέσω της ανάδειξης της συντήρησης ως στρατηγικού παράγοντα λειτουργικής σταθερότητας και μείωσης της αβεβαιότητας.

2. ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 — Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

2.1 Industry 4.0 και ψηφιακός μετασχηματισμός της συντήρησης

Η έννοια του Industry 4.0 (Βιομηχανία 4.0) εισήχθη αρχικά για να περιγράψει τη σύγκλιση ψηφιακών τεχνολογιών, αισθητήρων, δικτυωμένων συστημάτων ελέγχου και προηγμένων αλγορίθμων σε ένα ενοποιημένο βιομηχανικό οικοσύστημα (Lee et al., 2015; Lasi et al., 2014). Στον πυρήνα του, το Industry 4.0 συνδέεται με την ανάδυση κυβερνο-φυσικών συστημάτων (cyber-physical systems), πλατφορμών βιομηχανικού διαδικτύου των πραγμάτων (industrial IoT), υποδομών υπολογιστικού νέφους και κατακευματισμένης επεξεργασίας (cloud / edge infrastructures) και αναλυτικής μεγάλων δεδομένων (big data analytics) σε παραγωγικά περιβάλλοντα (Lee et al., 2015; Carvalho et al., 2019). Σε αυτό το πλαίσιο, οι γραμμές παραγωγής, ο εξοπλισμός και τα πληροφοριακά συστήματα δεν λειτουργούν πλέον ως διακριτές οντότητες, αλλά ως στοιχεία ενός ενιαίου, συνεχώς αλληλεπιδρώντος ψηφιακού-φυσικού συστήματος (cyber-physical industrial system).

Σύγχρονες ανασκοπήσεις της βιβλιογραφίας αναδεικνύουν ότι ένας από τους βασικούς «φορείς» αυτού του μετασχηματισμού είναι η συντήρηση (maintenance). Η προγνωστική συντήρηση (predictive maintenance) παρουσιάζεται ως «θεμέλιος λίθος» του Industry 4.0, καθώς αξιοποιεί παρακολούθηση κατάστασης (condition monitoring), ανάλυση δεδομένων (data analytics) και μηχανική μάθηση (machine learning) για την εκτίμηση της υπολειπόμενης ωφέλιμης ζωής (Remaining Useful Life – RUL) του εξοπλισμού και την έγκαιρη πρόβλεψη αστοχιών (Jardine et al., 2006; Lee et al., 2015). Η συντήρηση παύει έτσι να είναι μια δευτερεύουσα, υποστηρικτική λειτουργία και μετατρέπεται σε κεντρικό μηχανισμό διαχείρισης λειτουργικού κινδύνου, βελτιστοποίησης αξιοπιστίας και υποστήριξης αποφάσεων σε πραγματικό ή σχεδόν πραγματικό χρόνο (Carvalho et al., 2019).

Ένας από τους πιο κρίσιμους μετασχηματισμούς που επιφέρει το Industry 4.0 στη συντήρηση είναι η μετάβαση από την εμπειρική, άρρητη γνώση προς δομημένη, δεδομενοκεντρική γνώση. Σε κλασικά βιομηχανικά περιβάλλοντα, η τεχνική εμπειρία της συντήρησης συσσωρεύεται κυρίως στο επίπεδο του ανθρώπινου παράγοντα: τεχνικοί και μηχανικοί γνωρίζουν «από εμπειρία» πώς συμπεριφέρεται μια γραμμή, ποια μηχανή είναι «ευαίσθητη», ποιες βλάβες επαναλαμβάνονται. Όμως η γνώση αυτή συχνά δεν

αποτυπώνεται συστηματικά σε δεδομένα. Η έλευση του Industry 4.0, με την εκτεταμένη χρήση αισθητήρων, ψηφιακών καταγραφών συντήρησης και ολοκληρωμένων πληροφοριακών συστημάτων διαχείρισης συντήρησης (Computerized Maintenance Management Systems – CMMS), συστημάτων εκτέλεσης παραγωγής (Manufacturing Execution Systems – MES) και συστημάτων επιχειρησιακού σχεδιασμού πόρων (Enterprise Resource Planning – ERP), επιτρέπει αυτή η άρρητη εμπειρία να εξωτερικευθεί σε μορφή αρχείων καταγραφής (logs), χρονοσειρών (time series) και δομημένων δεδομένων (Lee et al., 2015; Carvalho et al., 2019). Βιβλιογραφικές μελέτες στη λογική της λήψης αποφάσεων βάσει δεδομένων (data-driven decision making) για συντήρηση επισημαίνουν ακριβώς αυτό: η προηγμένη αισθητηριακή υποδομή του Industry 4.0 δίνει τη δυνατότητα ανάπτυξης αλγορίθμων που αναλύουν δεδομένα, προβλέπουν καταστάσεις και υποστηρίζουν βέλτιστες αποφάσεις συντήρησης (Jardine et al., 2006).

Επιπλέον, η «ψηφιακή μεταμόρφωση της συντήρησης (digital transformation of maintenance) αντιμετωπίζεται πλέον ως στρατηγικός μοχλός για τις βιομηχανικές επιχειρήσεις. Πηγές που επικεντρώνονται αποκλειστικά στον ψηφιακό μετασχηματισμό της συντήρησης αναφέρουν μετρήσιμα αποτελέσματα, όπως μείωση χρόνου διακοπής λειτουργίας (downtime) έως και 30%, θετικές αποδόσεις επένδυσης (Return on Investment – ROI) της τάξης 15–25% από τον πρώτο χρόνο, βελτίωση ιχνηλασιμότητας (traceability) και συστηματική κεφαλαιοποίηση της τεχνικής γνώσης μέσω ψηφιακών οδηγιών και διαδικασιών (Carvalho et al., 2019). Οι ίδιες πηγές υπογραμμίζουν ότι ο ψηφιακός μετασχηματισμός δεν αφορά μόνο την εγκατάσταση αισθητήρων ή λογισμικού (software), αλλά τον ανασχεδιασμό των διαδικασιών συντήρησης, τη μετάβαση από έντυπες διαδικασίες (paper-based procedures) σε πλήρως ψηφιοποιημένες οδηγίες εργασίας, την αξιοποίηση κινητών συσκευών στο πεδίο και την ενσωμάτωση εργαλείων όπως η επαυξημένη πραγματικότητα (Augmented Reality) για την υποστήριξη τεχνικών.

Η διεθνής βιβλιογραφία για τη «μεταμόρφωση της συντήρησης μέσω Industry 4.0» δείχνει ότι η αλλαγή είναι ταυτόχρονα τεχνολογική και οργανωσιακή. Συστηματική ανασκόπηση για τη μεταβολή των στρατηγικών συντήρησης (maintenance strategies) στην εποχή του Industry 4.0 καταγράφει ότι οι επιχειρήσεις αξιοποιούν τα υπάρχοντα πληροφοριακά συστήματα (IT systems) και δεδομένα τους για να μετακινηθούν από βασικές, προγραμματισμένες στρατηγικές (scheduled strategies) σε πιο προηγμένες, δεδομενοκεντρικές στρατηγικές συντήρησης (data-driven maintenance strategies), ενώ

παράλληλα αντιμετωπίζουν θέματα διαχείρισης αλλαγής (change management), διαλειτουργικότητας συστημάτων (system interoperability) και έλλειψης δεξιοτήτων (Carvalho et al., 2019; Lee et al., 2015). Σε μελέτες για τον ψηφιακό μετασχηματισμό σε βιομηχανίες διεργασιών (process industries) (χημικά, λιπάσματα, διύλιση κ.ά.) αναφέρεται ότι στις πρώιμες φάσεις της ψηφιοποίησης έως και 80% της προσπάθειας καταναλώνεται σε διαχείριση και καθαρισμό δεδομένων (data housekeeping) και ενοποίηση διάσπαρτων πηγών δεδομένων, προκειμένου να δημιουργηθεί σταθερή βάση για ανάλυση και προηγμένες εφαρμογές.

Η παρατήρηση αυτή είναι απολύτως συμβατή με το πλαίσιο της παρούσας εργασίας: τα τριετή δεδομένα συντήρησης που διαθέτεις, ταξινομημένα ανά μηχανή και λειτουργική περιοχή, αποτελούν ακριβώς το είδος της δομημένης βάσης δεδομένων συντήρησης (maintenance database) που θεωρείται προϋπόθεση για πιο ώριμες εφαρμογές Industry 4.0 (Βιομηχανίας 4.0).

Χαρακτηριστικό παράδειγμα πρακτικής υλοποίησης αποτελεί μελέτη περίπτωσης (case study) σε βιομηχανία τροφίμων, όπου η ταχεία υιοθέτηση τεχνολογιών Industry 4.0 (σύστημα συλλογής δεδομένων, αναλυτική δεδομένων (analytics), ψηφιακές διαδικασίες) οδήγησε σε σαφή βελτίωση κρίσιμων δεικτών απόδοσης (Key Performance Indicators – KPIs), όπως παραγωγικότητα, downtime και ευελιξία παραγωγής (Carvalho et al., 2019). Η μελέτη παρουσιάζει τη μετάβαση από ένα περιβάλλον με περιορισμένη ψηφιοποίηση σε ένα πλήρως ψηφιοποιημένο περιβάλλον (fully digitalized environment), στο οποίο οι αποφάσεις δεν βασίζονται πλέον αποκλειστικά σε εμπειρική γνώση, αλλά σε μετρήσιμα στοιχεία από το πεδίο.

Αντίστοιχες μελέτες σε παραδοσιακές βιομηχανίες αναδεικνύουν ότι οι ψηφιακές τεχνολογίες (digital technologies) επιταχύνουν την καινοτομία και βελτιώνουν τις διαδικασίες, αλλά ταυτόχρονα συνοδεύονται από προκλήσεις, όπως αντίσταση στην αλλαγή, ζητήματα ενσωμάτωσης με παλαιά πληροφοριακά συστήματα (legacy systems) και ανάγκη για αναβάθμιση δεξιοτήτων (Lee et al., 2015).

Συνολικά, η βιβλιογραφία συγκλίνει στην άποψη ότι το Industry 4.0 (Βιομηχανία 4.0) εισάγει μια νέα «κουλτούρα συντήρησης», όπου η λήψη αποφάσεων βασίζεται σε δεδομένα και όχι μόνο σε διαίσθηση, και όπου τα γεγονότα αστοχίας (failure events) αντιμετωπίζονται ως πηγές πληροφορίας για τη βελτίωση των διαδικασιών και όχι απλώς ως περιστατικά προς επίλυση (Jardine et al., 2006; Carvalho et al., 2019). Ανασκοπήσεις

για το data-driven decision making στη συντήρηση τονίζουν ότι η πρόκληση πλέον δεν είναι μόνο η συλλογή δεδομένων, αλλά η ανάπτυξη μεθόδων και αλγορίθμων που συνδέουν τα analytics με συγκεκριμένες ενέργειες συντήρησης (maintenance actions), σε συνάρτηση με έννοιες όπως το Δυνητική Αστοχία – Λειτουργική Αστοχία (Potential Failure – Functional Failure, P–F interval) και η χρονική «απόσταση» μεταξύ πρώτων ενδείξεων βλάβης και πλήρους απώλειας λειτουργίας (Moubray, 1997).

Για τον κλάδο της βαριάς βιομηχανίας και ειδικότερα για την παραγωγή αλουμινίου, αυτό σημαίνει ότι η συντήρηση δεν μπορεί πλέον να αντιμετωπίζεται ως «αναγκαίο κακό» ή ως κόστος που πρέπει απλώς να ελαχιστοποιηθεί. Αντίθετα, αναδεικνύεται σε στρατηγική λειτουργία, η οποία διαμορφώνει τη διαθεσιμότητα (availability), την αξιοπιστία (reliability), την ενεργειακή συμπεριφορά και την ποιότητα του τελικού προϊόντος. Η ύπαρξη δομημένων δεδομένων συντήρησης ανά μηχανή και λειτουργική περιοχή, όπως στην υπό εξέταση βιομηχανική μονάδα, τοποθετεί την επιχείρηση σε σημείο εκκίνησης συμβατό με τις διεθνείς τάσεις του Industry 4.0: δεν πρόκειται πλέον απλώς για εφαρμογή επιμέρους εργαλείων, αλλά για δυνατότητα ανάπτυξης μιας συνεκτικής, δεδομενοκεντρικής στρατηγικής συντήρησης (data-driven maintenance strategy), η οποία αποτελεί και το αντικείμενο διερεύνησης της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

2.2 Θεωρητικό πλαίσιο συντήρησης και εξέλιξη προς Condition-Based Maintenance

Η θεωρία της συντήρησης (maintenance) έχει ιστορικά οργανωθεί γύρω από την έννοια της αξιοπιστίας (reliability) και της διαχείρισης κινδύνου αστοχίας (failure risk management), με βάση τη θεμελιώδη παρατήρηση ότι ο βιομηχανικός εξοπλισμός υφίσταται φθορά η οποία εξελίσσεται στον χρόνο και σε ορισμένες περιπτώσεις οδηγεί σε λειτουργική αποτυχία (Moubray, 1997; Jardine et al., 2006). Στο κλασικό πλαίσιο της θεωρίας αξιοπιστίας (reliability theory), η φθορά αναπαρίσταται ως στοχαστική διεργασία (stochastic process), η οποία μπορεί να περιγραφεί μέσω καμπυλών βλαβών (failure curves), κατανομών πιθανότητας (probability distributions) και μοντέλων διάρκειας ζωής εξαρτημάτων (lifetime models). Στην πράξη, η θεωρητική αυτή

προσέγγιση αποτυπώνει την ανάγκη των βιομηχανικών συστημάτων να εξισορροπούν το κόστος συντήρησης (maintenance cost) με το κόστος αστοχίας (failure cost), αναζητώντας στρατηγικές που ελαχιστοποιούν το συνολικό λειτουργικό και παραγωγικό ρίσκο (Mobley, 2002; Wireman, 2010).

Η κλασική βιβλιογραφία της συντήρησης διακρίνει τέσσερις βασικούς τύπους στρατηγικών συντήρησης (maintenance strategies): τη αντιδραστική συντήρηση (reactive maintenance / run-to-failure), την προληπτική συντήρηση (preventive maintenance – time-based ή usage-based), τη συντήρηση βάσει κατάστασης (condition-based maintenance) και την προγνωστική ή προγνωστικο-κατευθυνόμενη συντήρηση (predictive / prognostics-oriented maintenance) (Jardine et al., 2006; Mobley, 2002). Η reactive συντήρηση αποτελεί την πιο στοιχειώδη μορφή διαχείρισης εξοπλισμού, κατά την οποία η τεχνική επέμβαση ενεργοποιείται μόνο μετά την εκδήλωση αστοχίας (failure). Παρότι η πρακτική αυτή συνεπάγεται μηδενικό προληπτικό κόστος, παράγει σημαντικό λειτουργικό ρίσκο, καθώς οι αστοχίες εμφανίζονται απροειδοποίητα και συχνά υπό δυσμενείς συνθήκες, προκαλώντας παρατεταμένες διακοπές λειτουργίας (downtime), απώλεια παραγωγής και σε ορισμένες περιπτώσεις δευτερογενείς ζημιές (Wireman, 2010).

Η μετάβαση προς την προληπτική συντήρηση (preventive maintenance) αποτέλεσε την πρώτη οργανωμένη προσπάθεια περιορισμού της αβεβαιότητας. Στο μοντέλο αυτό, οι παρεμβάσεις προγραμματίζονται βάσει χρόνου λειτουργίας (time-based maintenance), κύκλων χρήσης (usage-based maintenance) ή συγκεκριμένων χρονικών διαστημάτων, ανεξάρτητα από την πραγματική κατάσταση του εξοπλισμού. Παρότι η προσέγγιση αυτή μειώνει την πιθανότητα απρόβλεπτων αστοχιών, στηρίζεται σε μια κρίσιμη υπόθεση: ότι η φθορά εξελίσσεται με σχετικά ομοιόμορφο και προβλέψιμο τρόπο. Η εμπειρία της βαριάς βιομηχανίας έχει δείξει πως αυτή η υπόθεση δεν επιβεβαιώνεται πάντοτε, καθώς οι συνθήκες φόρτισης (loading conditions), οι θερμικές μεταβολές (thermal variations), οι διακυμάνσεις διεργασίας (process fluctuations) και η ανομοιομορφία χρήσης οδηγούν σε σημαντική απόκλιση της πραγματικής καταπόνησης από τον ονομαστικό κύκλο ζωής (Moubray, 1997).

Σε αυτό το σημείο αναδύεται η Συντήρηση Βάσει Κατάστασης (Condition-Based Maintenance – CBM) ως κρίσιμο στάδιο ωρίμανσης. Η CBM στηρίζεται στη θεμελιώδη παραδοχή ότι η απόφαση συντήρησης πρέπει να λαμβάνεται όχι με βάση το ημερολόγιο ή τη θεωρητική διάρκεια ζωής, αλλά με βάση την πραγματική λειτουργική κατάσταση

του εξοπλισμού. Η φθορά δεν θεωρείται πλέον στατική χρονική συνάρτηση, αλλά δυναμική διεργασία η οποία μπορεί να παρατηρηθεί, να μετρηθεί και να εκτιμηθεί μέσω κατάλληλων ενδείξεων κατάστασης (condition indicators) (Jardine et al., 2006).

Σύμφωνα με το επικρατές θεωρητικό μοντέλο της CBM (Condition-Based Maintenance), η διαδικασία συγκροτείται σε τρία διακριτά, αλλά αλληλένδετα επίπεδα. Το πρώτο επίπεδο αφορά τη συλλογή και παρακολούθηση δεδομένων κατάστασης (condition monitoring), όπου φυσικά ή λειτουργικά μεγέθη —όπως δονήσεις (vibrations), θερμοκρασία (temperature), θόρυβος (acoustic signals), πίεση (pressure), λιπαντικές ιδιότητες (lubrication properties) ή λειτουργικοί χρόνοι (operating time)— καταγράφονται συστηματικά κατά την κανονική λειτουργία του εξοπλισμού (Jardine et al., 2006). Το δεύτερο επίπεδο περιλαμβάνει την επεξεργασία και ανάλυση δεδομένων (data processing and analysis), απομόνωση χαρακτηριστικών και ερμηνεία των σημάτων μέσω τεχνικών ανάλυσης σήματος (signal processing), στατιστικών μοντέλων (statistical models) ή αλγορίθμων μηχανικής μάθησης (machine learning algorithms), με στόχο τη διάκριση κανονικής και ανώμαλης συμπεριφοράς. Το τρίτο επίπεδο αφορά τη λήψη τεχνικής απόφασης (decision-making process), όπου τα αποτελέσματα της ανάλυσης μεταφράζονται σε συγκεκριμένες ενέργειες συντήρησης (maintenance actions), όπως προληπτική επέμβαση, εντατικότερη παρακολούθηση ή αναπρογραμματισμός εργασιών.

Η αξία της CBM (Condition-Based Maintenance) επομένως δεν εξαντλείται στην τεχνολογία συλλογής δεδομένων· βρίσκεται κυρίως στην ικανότητα της επιχείρησης να μετατρέπει τα δεδομένα αυτά σε λειτουργικά νοηματοδοτημένη τεχνική πληροφόρηση. Για τον λόγο αυτό, η βιβλιογραφία δεν αντιμετωπίζει την CBM ως απομονωμένη τεχνική, αλλά ως μέρος μιας ευρύτερης στρατηγικής συντήρησης (maintenance strategy), η οποία συνδέεται με τη δομή του οργανισμού, το επίπεδο τεχνικής τεκμηρίωσης, την ποιότητα των καταγραφών και την ωριμότητα των διαδικασιών λήψης αποφάσεων (Mobley, 2002; Jardine et al., 2006).

Η εξέλιξη προς CBM (Condition-Based Maintenance) θεωρείται ιδιαίτερα κρίσιμη στα περιβάλλοντα εντατικών διεργασιών (process-intensive environments) —όπως η μεταλλουργία, η έλαση και η βαριά μεταποίηση— όπου η λειτουργική συμπεριφορά του εξοπλισμού επηρεάζεται από πολύπλοκους θερμομηχανικούς (thermo-mechanical) και δυναμικούς παράγοντες (dynamic factors), με αποτέλεσμα η φθορά να είναι μεταβλητή, τοπικά διαφοροποιημένη και συχνά μη γραμμική (Moubray, 1997). Σε τέτοιες περιπτώσεις, τα κλασικά χρονικά προγραμματισμένα προγράμματα συντήρησης

(time-based maintenance programs) είτε οδηγούν σε υπερσυντήρηση (over-maintenance) είτε αφήνουν ακάλυπτες κρίσιμες ζώνες λειτουργικού κινδύνου. Η CBM επιτρέπει την προσέγγιση της φθοράς ως εξελικτικής διαδικασίας, αναδεικνύοντας ενδιάμεσα στάδια υποβάθμισης που προηγούνται της πλήρους αστοχίας και τα οποία μπορούν να ανιχνευθούν μέσα από συστηματική ανάλυση δεδομένων (Jardine et al., 2006).

Παράλληλα, η βιβλιογραφία τεκμηριώνει ότι η CBM (Condition-Based Maintenance) δεν λειτουργεί απομονωμένα, αλλά αποτελεί προθάλαμο της προγνωστικής συντήρησης (predictive maintenance). Η συστηματική συλλογή και οργάνωση δεδομένων λειτουργίας (operational data), η δομημένη καταγραφή αστοχιών (failures), καθώς και η ανάλυση αρχείων αστοχιών (failure logs) και ιστορικών διακοπών λειτουργίας (downtime histories) δημιουργούν το υπόβαθρο πάνω στο οποίο αναπτύσσονται πιο προηγμένα μοντέλα πρόγνωσης φθοράς και εκτίμησης υπολειπόμενης ωφέλιμης ζωής (Remaining Useful Life – RUL) (Jardine et al., 2006; Lee et al., 2015). Με αυτή την έννοια, ακόμη και όταν η τεχνολογική υποδομή δεν έχει φτάσει στο επίπεδο πλήρους online predictive analytics, η υιοθέτηση CBM λογικής (CBM logic) —και ιδιαίτερα η διαχρονική ανάλυση ιστορικών δεδομένων συντήρησης— θεωρείται από τη διεθνή βιβλιογραφία ουσιαστικό βήμα ωρίμανσης.

Η συγκεκριμένη μελέτη κινείται ακριβώς μέσα σε αυτό το θεωρητικό πλαίσιο. Η ύπαρξη τριετών λειτουργικών δεδομένων συντήρησης (maintenance operational data), οργανωμένων ανά μηχανή και ανά λειτουργική περιοχή, επιτρέπει την εμπειρική διερεύνηση της φθοράς όχι ως ασύνδετη ακολουθία βλαβών, αλλά ως δυναμική διαδικασία που εξελίσσεται στον χρόνο και αντανακλά τον βαθμό ωριμότητας της στρατηγικής συντήρησης (maintenance strategy). Η προσέγγιση αυτή είναι πλήρως εναρμονισμένη με τις σύγχρονες θεωρητικές προσεγγίσεις της Condition-Based Maintenance (CBM) και θέτει τα θεμέλια για τη μεθοδολογική ανάπτυξη που ακολουθεί στα επόμενα κεφάλαια.

2.3 Reliability, Maintainability και οι δείκτες MTBF – MTTR ως αναπαραστάσεις λειτουργικής ωριμότητας

Στο θεωρητικό πλαίσιο της αξιοπιστίας (reliability theory), τα βιομηχανικά συστήματα προσεγγίζονται ως τεχνικές οντότητες οι οποίες υπόκεινται σε διαδικασίες φθοράς (degradation processes) και στοχαστικές μεταβολές λειτουργικής κατάστασης (stochastic operational state variations) (Jardine et al., 2006; Mobley, 2002). Η αξιοπιστία (reliability) ορίζεται ως η πιθανότητα ένα σύστημα να εκτελέσει την απαιτούμενη λειτουργία του για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, υπό καθορισμένες συνθήκες, χωρίς να εκδηλωθεί αστοχία (failure) (Ebeling, 1997). Παράλληλα, η συντηρησιμότητα (maintainability) αναφέρεται στην ικανότητα του συστήματος να επανέρχεται σε πλήρη λειτουργία μετά την εκδήλωση βλάβης (failure event), εντός ενός εύλογου χρονικού πλαισίου και με ελεγχόμενο τεχνικό και οργανωσιακό κόστος (Mobley, 2002).

Στην πράξη, η αξιοπιστία και η συντηρησιμότητα εκφράζονται μέσω δύο κεντρικών δεικτών αξιοπιστίας (reliability indicators): του Mean Time Between Failures (MTBF) και του Mean Time To Repair (MTTR). Ο MTBF (Mean Time Between Failures) αποτυπώνει το μέσο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί μεταξύ δύο διαδοχικών αστοχιών (failures) και συνδέεται με τη συχνότητα εμφάνισης βλαβών, ενώ ο MTTR (Mean Time To Repair) εκφράζει τον μέσο χρόνο που απαιτείται για την αποκατάσταση μιας αστοχίας και συναρτάται με την αποδοτικότητα των τεχνικών παρεμβάσεων συντήρησης (maintenance interventions) (Jardine et al., 2006). Ωστόσο, η ουσιαστική σημασία των δεικτών αυτών δεν περιορίζεται στην απλή περιγραφική τους διάσταση· αντίθετα, αποκτούν ερμηνευτικό βάθος όταν εξετάζονται διαχρονικά, συγκριτικά και σε συνάρτηση με τη δομή του εξοπλισμού και τις οργανωσιακές πρακτικές συντήρησης (maintenance organizational practices).

Η αύξηση του MTBF (Mean Time Between Failures) σε βάθος χρόνου συνδέεται, στη διεθνή βιβλιογραφία, με τη σταδιακή σταθεροποίηση της λειτουργικής συμπεριφοράς του εξοπλισμού και με τη μείωση της επαναληπτικότητας συγκεκριμένων failure modes (τρόπων αστοχίας) (Jardine et al., 2006; Moubray, 1997). Η εξέλιξη αυτή ερμηνεύεται συνήθως ως αποτέλεσμα βελτιωμένης κατανόησης των υποκείμενων μηχανισμών αστοχίας (failure mechanisms), συστηματικότερης εφαρμογής προληπτικών παρεμβάσεων (preventive interventions) και πιο ώριμης τεχνικής τεκμηρίωσης (technical documentation), η οποία επιτρέπει στις ομάδες συντήρησης να αναγνωρίζουν έγκαιρα

πρόδρομες ενδείξεις υποβάθμισης (early degradation indicators). Αντίστοιχα, η μείωση του MTTR (Mean Time To Repair) αντανακλά την αναβάθμιση του επιπέδου τεχνικής οργάνωσης (technical organization): καλύτερη διάγνωση βλαβών (fault diagnosis), τυποποιημένες διαδικασίες επέμβασης (standardized maintenance procedures), βελτιωμένη διαθεσιμότητα ανταλλακτικών (spare parts availability) και υψηλότερο βαθμό συντονισμού μεταξύ συντήρησης και παραγωγής (maintenance–production coordination) (Mobley, 2002; Wireman, 2010).

Η βιβλιογραφία αναγνωρίζει ότι οι δείκτες αυτοί, όταν αναλύονται σε λειτουργικό (operational) και χρονικό βάθος (longitudinal analysis), λειτουργούν ως αναπαραστάσεις λειτουργικής ωριμότητας (operational maturity). Σε περιβάλλοντα όπου η στρατηγική συντήρησης (maintenance strategy) εξελίσσεται από αντιδραστική συντήρηση (reactive maintenance) προς περισσότερο προληπτική (preventive maintenance) και δεδομενοκεντρική συντήρηση (data-driven maintenance), παρατηρείται χαρακτηριστική μεταβολή στο προφίλ των MTBF και MTTR, με μείωση της έντασης των αστοχιών και εξομάλυνση της διάρκειας των παρεμβάσεων (Jardine et al., 2006; Lee et al., 2014). Η εξέλιξη αυτή συνδέεται όχι μόνο με τεχνικές βελτιώσεις, αλλά και με οργανωσιακούς παράγοντες (organizational factors), όπως η ενίσχυση της τεχνικής εκπαίδευσης (technical training), η καλύτερη ροή πληροφορίας (information flow) μεταξύ τμημάτων και η αυξανόμενη τυποποίηση διαδικασιών (process standardization).

Επιπλέον, η ερμηνεία των MTBF (Mean Time Between Failures) και MTTR (Mean Time To Repair) αποκτά ιδιαίτερη σημασία όταν η ανάλυση πραγματοποιείται ανά μηχανή (equipment-level) και ανά λειτουργική περιοχή (functional subsystem level), αντί να περιορίζεται σε συγκεντρωτικούς μέσους όρους (aggregate averages). Σε σύνθετες γραμμές βαριάς βιομηχανίας (heavy industrial production lines), τα υποσυστήματα υπόκεινται σε διαφορετικού τύπου καταπονήσεις (operational stresses), γεγονός που οδηγεί σε διαφοροποιημένα failure patterns (πρότυπα αστοχίας) (Jardine et al., 2006). Για παράδειγμα, ένα τμήμα που βρίσκεται σε άμεση επαφή με το υλικό μπορεί να εμφανίζει συχνότερες αλλά μικρής διάρκειας αστοχίες, ενώ ένα σύστημα μετάδοσης κίνησης (power transmission system) μπορεί να εμφανίζει σπάνιες αλλά υψηλής διάρκειας βλάβες. Η διάκριση αυτή δεν είναι μόνο στατιστική· αποτελεί κρίσιμο στοιχείο τεχνικής διάγνωσης (technical diagnosis) και προτεραιοποίησης παρεμβάσεων συντήρησης (maintenance prioritization).

Στη σύγχρονη βιβλιογραφία, οι δείκτες MTBF και MTTR συνδέονται επίσης με την έννοια της οργανωσιακής μάθησης στη συντήρηση (organizational learning in maintenance). Κάθε failure event (συμβάν αστοχίας) λειτουργεί ως «φορέας πληροφορίας», ο οποίος, όταν καταγράφεται και αναλύεται συστηματικά μέσω αρχείων αστοχιών (failure logs) και ιστορικών δεδομένων συντήρησης (maintenance histories), τροφοδοτεί διαδικασίες ανατροφοδότησης (feedback loops) και συνεχούς βελτίωσης (continuous improvement) (Mobley, 2002; Wireman, 2010). Η σταδιακή μείωση της επαναληπτικότητας συγκεκριμένων failure modes και η παράλληλη βελτίωση των χρόνων αποκατάστασης υποδηλώνουν ότι η επιχείρηση δεν διαχειρίζεται τις αστοχίες αποσπασματικά, αλλά τις ενσωματώνει σε μια συσσωρευτική τεχνική μνήμη (cumulative technical knowledge base), η οποία με την πάροδο του χρόνου μετασχηματίζει τη λειτουργική της κουλτούρα.

Η συγκεκριμένη μελέτη υιοθετεί ακριβώς αυτή την εννοιολογική προσέγγιση. Οι δείκτες MTBF (Mean Time Between Failures) και MTTR (Mean Time To Repair) δεν αντιμετωπίζονται ως απλές ποσοτικές μεταβλητές, αλλά ως δείκτες εξέλιξης της λειτουργικής ωριμότητας της συντήρησης (maintenance maturity), οι οποίοι αναλύονται σε τριετή χρονικό ορίζοντα (three-year time horizon), ανά μηχανή (equipment level) και ανά λειτουργική περιοχή (functional subsystem). Η ανάλυση αυτή επιτρέπει την ανασύσταση της χρονικής δυναμικής των failure patterns (temporal dynamics of failure patterns) και τη συσχέτιση των τεχνικών παρεμβάσεων με τη σταδιακή σταθεροποίηση ή, αντίστοιχα, την επίμονη ευπάθεια συγκεκριμένων υποσυστημάτων. Με αυτό τον τρόπο, η μελέτη δεν περιορίζεται στη μέτρηση της αξιοπιστίας (reliability), αλλά εξετάζει τη μεταβολή της τεχνικής συμπεριφοράς του εξοπλισμού (technical behaviour of equipment) στον χρόνο, στο πλαίσιο μιας εξελισσόμενης στρατηγικής συντήρησης (evolving maintenance strategy).

2.4 Διαθεσιμότητα, OEE και η λειτουργική διασύνδεση συντήρησης και παραγωγής

Στο πλαίσιο της βιομηχανικής αξιοπιστίας (industrial reliability), η διαθεσιμότητα (availability) αποτελεί έναν από τους πλέον κρίσιμους δείκτες λειτουργικής επίδοσης (operational performance indicators), καθώς αποτυπώνει το ποσοστό του συνολικού χρόνου κατά το οποίο ο εξοπλισμός βρίσκεται σε κατάσταση πλήρους λειτουργικής ετοιμότητας (operational readiness) και μπορεί να εκτελέσει την παραγωγική του λειτουργία (Mobley, 2002; Wireman, 2010). Η διαθεσιμότητα δεν εξαρτάται αποκλειστικά από τη συχνότητα και τη διάρκεια των αστοχιών (failures), αλλά αποτελεί συνάρτηση της συνολικής στρατηγικής συντήρησης (maintenance strategy), της ποιότητας των προληπτικών παρεμβάσεων (preventive maintenance interventions), της τεχνικής οργάνωσης των ομάδων πεδίου (field maintenance teams) και της αποτελεσματικότητας των διαδικασιών αποκατάστασης (repair processes) (Jardine et al., 2006).

Η έννοια της διαθεσιμότητας (availability) αποκτά ιδιαίτερο βάθος όταν εξετάζεται όχι ως αφηρημένος δείκτης χρόνου λειτουργίας, αλλά ως δείκτης λειτουργικής σταθερότητας (operational stability). Σε περιβάλλοντα συνεχούς ή ημι-συνεχούς παραγωγής (continuous or semi-continuous production environments), ακόμη και μικρής διάρκειας αστοχίες (failures) μπορούν να προκαλέσουν δυσανάλογη διαταραχή στη ροή του υλικού (material flow), να επηρεάσουν το θερμομηχανικό καθεστώς της διεργασίας (thermo-mechanical regime of the process) και να οδηγήσουν σε δευτερογενείς απώλειες παραγωγής (production losses) ή απώλειες ποιότητας (quality losses) (Wireman, 2010). Επομένως, η αύξηση της διαθεσιμότητας δεν αποτυπώνει μόνο τη μείωση του χαμένου χρόνου, αλλά και τη μετάβαση του παραγωγικού συστήματος σε μια κατάσταση μεγαλύτερης λειτουργικής συνοχής (operational coherence), όπου οι διακοπές είναι σπανιότερες, πιο ελεγχόμενες και λιγότερο διαταρακτικές.

Ο δείκτης Overall Equipment Effectiveness (OEE) συνιστά τη συστηματικότερη προσπάθεια ενοποίησης της οπτικής της συντήρησης (maintenance perspective) και της οπτικής της παραγωγής (production perspective) σε ένα ενιαίο μετρικό πλαίσιο (performance measurement framework) (Nakajima, 1988). Ο OEE (Overall Equipment Effectiveness) υπολογίζεται ως συνάρτηση τριών διαστάσεων: της διαθεσιμότητας (availability), της απόδοσης (performance) και της ποιότητας (quality) του παραγόμενου

προϊόντος. Με αυτόν τον τρόπο, ο δείκτης αποτυπώνει όχι μόνο το ποσοστό του χρόνου κατά τον οποίο ο εξοπλισμός λειτουργεί, αλλά και τον βαθμό στον οποίο λειτουργεί με την προβλεπόμενη ταχύτητα παραγωγής (production speed) και παράγει προϊόν εντός αποδεκτών ποιοτικών προδιαγραφών (quality specifications).

Η διεθνής βιβλιογραφία υπογραμμίζει ότι η συντήρηση (maintenance) ασκεί πολυδιάστατη επίδραση στον OEE (Overall Equipment Effectiveness) (Jardine et al., 2006; Mobley, 2002). Η βελτίωση της διαθεσιμότητας (availability) μέσω μείωσης του μη προγραμματισμένου χρόνου διακοπής λειτουργίας (unplanned downtime) αποτελεί τον πιο άμεσο μηχανισμό επίδρασης· ωστόσο, η σταθεροποίηση των λειτουργικών συνθηκών (operating conditions) και η μείωση των απότομων μεταβατικών καταστάσεων λειτουργίας (operational transients) συμβάλλουν επίσης στη βελτίωση της απόδοσης (performance), καθώς περιορίζουν τις απώλειες ταχύτητας (speed losses) και τις διακυμάνσεις παραγωγικής ικανότητας (capacity fluctuations). Παράλληλα, η σταθερότητα διεργασίας (process stability) που προκύπτει από πιο ώριμες πρακτικές συντήρησης επηρεάζει θετικά και την ποιότητα (product quality), μειώνοντας scrap, rework και αποκλίσεις από τις μηχανικές και γεωμετρικές προδιαγραφές (mechanical and geometrical specifications) του προϊόντος (Nakajima, 1988).

Η αξιοποίηση του OEE (Overall Equipment Effectiveness) ως εργαλείου ανάλυσης δεν περιορίζεται στη μέτρηση της τρέχουσας κατάστασης του εξοπλισμού. Στη βιβλιογραφία περιγράφονται περιπτώσεις όπου η συστηματική παρακολούθηση (monitoring) και ανάλυση (analysis) του OEE σε συνδυασμό με δεδομένα συντήρησης (maintenance data) επέτρεψαν την αναγνώριση υποκείμενων failure patterns (προτύπων αστοχίας), την ανάδειξη κρίσιμων σημείων της γραμμής (critical bottlenecks) και την ιεράρχηση επενδύσεων σε τεχνικές παρεμβάσεις (technical interventions) (Jardine et al., 2006). Σε περιβάλλοντα όπου εφαρμόζονται πρακτικές προγνωστικής συντήρησης (predictive maintenance) ή συντήρησης βάσει κατάστασης (condition-based maintenance), η αύξηση του OEE λειτουργεί ως έμμεσος δείκτης μείωσης λειτουργικής αβεβαιότητας (operational uncertainty) και ως ποσοτική ένδειξη της ωριμότητας της στρατηγικής συντήρησης (maintenance strategy maturity).

Ιδιαίτερα στη βαριά βιομηχανία (heavy industry) και στον κλάδο των μετάλλων (metal processing industry), η συσχέτιση διαθεσιμότητας (availability) και OEE (Overall Equipment Effectiveness) με τους δείκτες MTBF (Mean Time Between Failures) και MTTR (Mean Time To Repair) αποκτά ενισχυμένη σημασία (Mobley, 2002; Wireman,

2010). Η διαχρονική αύξηση του MTBF και η παράλληλη μείωση του MTTR τείνουν να οδηγούν σε βελτίωση της διαθεσιμότητας (availability), η οποία με τη σειρά της επηρεάζει θετικά τον OEE, δημιουργώντας μια αλυσίδα αλληλεξάρτησης (interdependency chain) μεταξύ τεχνικών και παραγωγικών δεικτών. Μεθοδολογικά, η συνδυαστική ανάλυση (combined analysis) αυτών των δεικτών, ανά μηχανή (equipment level) και ανά λειτουργική περιοχή (functional subsystem), επιτρέπει να αναδειχθούν διακριτές ζώνες λειτουργικής ευπάθειας (operational vulnerability zones), αλλά και να τεκμηριωθεί η σταδιακή σταθεροποίηση της παραγωγικής λειτουργίας (production stabilization) σε βάθος χρόνου.

Η παρούσα εργασία υιοθετεί αυτή τη συστημική οπτική (systemic perspective). Η διαθεσιμότητα (availability) και ο OEE (Overall Equipment Effectiveness) δεν χρησιμοποιούνται απλώς ως τεχνικά αποτελέσματα της συντήρησης (maintenance), αλλά ως γέφυρα ερμηνείας (interpretative bridge) μεταξύ των failure events (συμβάντων αστοχίας), της στρατηγικής συντήρησης (maintenance strategy) και της συνολικής λειτουργικής επίδοσης της παραγωγής (production operational performance). Μέσα από την ανάλυση της διαχρονικής τους εξέλιξης, σε συνδυασμό με τους δείκτες MTBF και MTTR, επιχειρείται η κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η τεχνική ωρίμανση της συντήρησης (maintenance maturity) αντανακλάται σε πιο σταθερό, αποδοτικό και συνεκτικό παραγωγικό σύστημα (production system).

2.5 Επαναληπτικότητα αστοχιών, failure patterns και οργανωσιακή μάθηση στη συντήρηση

Η επαναληπτικότητα των αστοχιών (failure recurrence) αποτελεί μία από τις πλέον κρίσιμες, αλλά συχνά υποτιμημένες, διαστάσεις της ανάλυσης συντήρησης (maintenance analysis). Σε αντίθεση με τους δείκτες που αποτυπώνουν συχνότητα ή διάρκεια βλαβών, η επαναληπτικότητα εστιάζει στη δομή της εμφάνισης των αστοχιών, εξετάζοντας κατά πόσο συγκεκριμένα failure modes (τρόποι αστοχίας) τείνουν να επανεμφανίζονται στον χρόνο, στις ίδιες ή σε παρόμοιες λειτουργικές περιοχές (functional areas), υπό παρεμφερείς συνθήκες λειτουργίας (operating conditions) (Jardine et al., 2006; Mobley, 2002). Με αυτή την έννοια, η επαναληπτικότητα δεν αναφέρεται μόνο στην ποσότητα των βλαβών, αλλά κυρίως στον βαθμό δομικού εγκλωβισμού του συστήματος σε συγκεκριμένα failure patterns (structural entrapment in failure patterns).

Στο θεωρητικό πλαίσιο της αξιοπιστίας (reliability theory), ένα failure event (συμβάν αστοχίας) θεωρείται επαναληπτικό όταν η υποκείμενη τεχνική αιτιότητα (technical causality) παραμένει ενεργή, ακόμη και μετά την επέμβαση αποκατάστασης (repair intervention) (Moubray, 1997). Σε αυτές τις περιπτώσεις, η συντήρηση (maintenance) τείνει να λειτουργεί κατά κύριο λόγο διορθωτικά (corrective maintenance), αποκαθιστώντας τα συμπτώματα χωρίς να επεμβαίνει ουσιαστικά στη ρίζα της αστοχίας (root cause of failure). Το αποτέλεσμα είναι η διαμόρφωση ενός φαύλου κύκλου αστοχιών (failure cycle), στον οποίο οι ίδιες βλάβες επανεμφανίζονται, με μικρές παραλλαγές, οδηγώντας σε συσσωρευμένο downtime (χρόνο διακοπής λειτουργίας) και αυξημένη τεχνική και οργανωσιακή καταπόνηση (technical and organizational stress) (Wireman, 2010).

Αντιθέτως, η μείωση της επαναληπτικότητας των αστοχιών (failure recurrence reduction) —όπως αναφέρεται συστηματικά στη διεθνή βιβλιογραφία συντήρησης— ερμηνεύεται ως ένδειξη οργανωσιακής μάθησης (organizational learning) (Mobley, 2002). Η συντήρηση, μέσα από την ανάλυση ιστορικών δεδομένων αστοχιών (failure histories), ανάλυση ριζικής αιτίας (root cause analysis), τεχνική τεκμηρίωση (technical documentation) και εμπειρική ανατροφοδότηση από το πεδίο (field feedback), κατορθώνει να μετασχηματίσει τις αντιδραστικές παρεμβάσεις (reactive interventions) σε στοχευμένες λύσεις δομικού χαρακτήρα (structural corrective solutions), οι οποίες εξουδετερώνουν τις βαθύτερες αιτίες της αστοχίας. Η διαδικασία αυτή δεν είναι

στιγμιαία· αντιθέτως, εξελίσσεται προοδευτικά και αποτυπώνεται σε διαχρονικές μεταβολές (longitudinal changes) της έντασης και της «γεωγραφίας» των failure events (συμβάντων αστοχίας).

Στη βιβλιογραφία των process-intensive βιομηχανιών (process-intensive industries), η επαναληπτικότητα των αστοχιών συχνά συσχετίζεται με συγκεκριμένες λειτουργικές ζώνες υψηλής καταπόνησης (high-stress operational zones) (Jardine et al., 2006). Συστήματα που βρίσκονται σε άμεση επαφή με το υλικό, υποσύνολα που επιβαρύνονται θερμομηχανικά (thermo-mechanically stressed subsystems), ή κρίσιμες μεταβατικές περιοχές της ροής παραγωγής (production flow transition zones), τείνουν να εμφανίζουν συγκέντρωση failure events, τα οποία αναπτύσσονται μέσα από επαναληπτικούς μηχανισμούς φθοράς (degradation mechanisms). Η ανάλυση αυτών των failure patterns (προτύπων αστοχίας) δεν έχει αποκλειστικά στατιστικό χαρακτήρα· συνιστά εργαλείο λειτουργικής χαρτογράφησης της ευπάθειας του εξοπλισμού (operational vulnerability mapping).

Η υπόθεση που διατυπώνεται σε μεγάλο μέρος της σύγχρονης βιβλιογραφίας είναι ότι η επαναληπτικότητα (failure recurrence) λειτουργεί ως «γέφυρα» μεταξύ ποσοτικών και ποιοτικών διαστάσεων της συντήρησης (quantitative and qualitative dimensions of maintenance) (Jardine et al., 2006; Mobley, 2002). Από τη μία πλευρά, μετριέται σε όρους συχνότητας επανεμφάνισης συγκεκριμένων failure modes· από την άλλη πλευρά, λειτουργεί ως δείκτης ωριμότητας της τεχνικής ανάλυσης (technical analysis maturity) και του βάθους κατανόησης των failure mechanisms (μηχανισμών αστοχίας) εκ μέρους του οργανισμού. Όσο η συντήρηση περιορίζεται σε επιφανειακές επεμβάσεις (superficial interventions), η επαναληπτικότητα παραμένει υψηλή· όσο ενισχύεται η τεχνική διερεύνηση (technical investigation), η συστηματική τεκμηρίωση (documentation) και η κλείδωση βελτιώσεων (implementation of improvements), η επαναληπτικότητα σταδιακά υποχωρεί.

Σε αυτό το πλαίσιο, τα failure logs (αρχεία αστοχιών) και τα downtime archives (αρχεία χρόνων διακοπής λειτουργίας) δεν αποτελούν απλά ιστορικά αρχεία περιστατικών, αλλά λειτουργούν ως χρονικά ίχνη μάθησης (temporal traces of learning) (Mobley, 2002). Η συστηματική ανάλυσή τους επιτρέπει την αναγνώριση εξελικτικών σταδίων failure progression (εξέλιξης αστοχίας), την ανίχνευση κοινών προτύπων ανά λειτουργική περιοχή (functional area) και την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο μικρο-αστοχίες (micro-failures) μετατρέπονται, υπό συγκεκριμένες συνθήκες λειτουργίας

(operating conditions), σε πλήρεις λειτουργικές βλάβες (functional failures). Μεθοδολογικά, αυτή η οπτική συμβαδίζει με τις σύγχρονες προσεγγίσεις του Industry 4.0 (Βιομηχανία 4.0), όπου τα δεδομένα συντήρησης (maintenance data) αντιμετωπίζονται όχι απλώς ως στατιστικές καταγραφές, αλλά ως δυναμικές χρονοσειρές λειτουργικής συμπεριφοράς (dynamic time series of operational behaviour) (Lee et al., 2014).

Ιδιαίτερη σημασία έχει το γεγονός ότι η επαναληπτικότητα (failure recurrence) δεν αξιολογείται μόνο σε επίπεδο μεμονωμένων μηχανών (individual machines), αλλά και σε χωρική ανάλυση ανά λειτουργική περιοχή (spatial analysis by functional subsystem). Σε πολύπλοκες γραμμές βαριάς βιομηχανίας (heavy industrial production lines), δύο υποσυστήματα μπορεί να εμφανίζουν παρόμοιο συνολικό αριθμό αστοχιών, αλλά εντελώς διαφορετικό βαθμό επαναληπτικότητας. Στο πρώτο, οι αστοχίες είναι ποικιλόμορφες και σπάνια επαναλαμβάνονται με το ίδιο pattern (πρότυπο)· στο δεύτερο, μικρός αριθμός failure modes εμφανίζεται επίμονα, υποδεικνύοντας βαθύτερα δομικά αίτια (structural causes) ή ανεπαρκή τεχνική αντιμετώπιση (technical mitigation). Η διάκριση αυτή είναι κρίσιμη για την ιεράρχηση τεχνικών παρεμβάσεων (maintenance prioritization) και επενδύσεων συντήρησης.

Η παρούσα εργασία υιοθετεί πλήρως αυτή τη θεωρητική προσέγγιση. Η επαναληπτικότητα των αστοχιών (failure recurrence) δεν εξετάζεται ως δευτερεύουσα παρατήρηση, αλλά ως βασικός αναλυτικός άξονας (analytical axis), ο οποίος ερμηνεύει την εξέλιξη της συντήρησης (maintenance evolution) μέσα στον χρόνο. Με βάση τα διαθέσιμα τριετή δεδομένα συντήρησης (three-year maintenance dataset), η ανάλυση πραγματοποιείται σε πολλαπλά επίπεδα: ανά μηχανή (equipment level), ανά λειτουργική περιοχή (functional subsystem) και σε διαχρονική συγκριτική θεώρηση (longitudinal comparative analysis). Στόχος δεν είναι απλώς η καταγραφή του αριθμού βλαβών, αλλά η ανασύσταση των failure patterns (προτύπων αστοχίας) και η διερεύνηση του κατά πόσο αυτά μεταβάλλονται, σταθεροποιούνται ή αποδυναμώνονται, ως αποτέλεσμα τεχνικών επεμβάσεων (technical interventions), οργανωσιακών αλλαγών (organizational changes) ή αναβάθμισης των πρακτικών συντήρησης (maintenance practices).

Με τον τρόπο αυτό, η επαναληπτικότητα (failure recurrence) αναδεικνύεται σε κρίσιμο σημείο συνάντησης μεταξύ τεχνικής ανάλυσης (technical analysis), επιχειρησιακής εμπειρίας (operational experience) και δεδομενοκεντρικής ερμηνείας της φθοράς (data-driven interpretation of degradation), αποτελώντας θεμελιώδη συνιστώσα του συνολικού θεωρητικού πλαισίου (theoretical framework) της παρούσας μελέτης.

2.6 Μετάβαση από την προγραμματισμένη συντήρηση σε condition-based και data-driven πρακτικές σε process-intensive βιομηχανικά περιβάλλοντα

Η προγραμματισμένη συντήρηση (preventive maintenance) αποτέλεσε για δεκαετίες το κυρίαρχο λειτουργικό πρότυπο σε μεγάλο εύρος βιομηχανικών κλάδων, προσφέροντας ένα επίπεδο προβλεψιμότητας και οργανωσιακής τάξης σε σύγκριση με την καθαρά αντιδραστική προσέγγιση (run-to-failure approach) (Moubray, 1997; Wireman, 2010). Η λογική της προγραμματισμένης συντήρησης στηρίζεται στην υπόθεση ότι η φθορά του εξοπλισμού μπορεί να προσεγγιστεί με βάση προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα ή κύκλους λειτουργίας, τα οποία θεωρούνται αντιπροσωπευτικά του «μέσου» ρυθμού υποβάθμισης των κρίσιμων υποσυστημάτων.

Ωστόσο, σε περιβάλλοντα εντατικών διεργασιών (process-intensive environments) —όπως οι μεταλλουργικές διεργασίες, οι γραμμές έλασης και τα βαριά μηχανολογικά συστήματα— η υπόθεση αυτή αποδεικνύεται συχνά ανεπαρκής (Jardine et al., 2006). Η πραγματική φθορά δεν εξελίσσεται με τρόπο ομοιόμορφο ούτε προβλέψιμο. Αντιθέτως, προκύπτει από τη σύνθετη αλληλεπίδραση θερμομηχανικών φορτίσεων (thermo-mechanical loads), δυναμικών κραδασμών (dynamic vibrations), μικρογεωμετρικών αποκλίσεων (micro-geometric deviations), μεταβολών στη ροή υλικού (material flow) και λειτουργικών ασυνεχειών που συσσωρεύονται σταδιακά στον χρόνο. Κάτω από αυτές τις συνθήκες, μηχανισμοί φθοράς (degradation mechanisms) μπορεί να επιταχύνονται ή να επιβραδύνονται, ανάλογα με τη συγκυριακή καταπόνηση, οδηγώντας σε σημαντική απόκλιση από τις υποθέσεις του προγραμματισμένου κύκλου συντήρησης (Moubray, 1997).

Η διεθνής εμπειρία έχει δείξει ότι η αυστηρή προσήλωση σε χρονικά προγραμματισμένα προγράμματα (time-based maintenance programs) οδηγεί συχνά σε δύο αντίθετες αλλά εξίσου προβληματικές καταστάσεις (Mobley, 2002; Wireman, 2010). Από τη μία πλευρά, προκύπτουν φαινόμενα υπερσυντήρησης (over-maintenance), όπου πραγματοποιούνται τεχνικές παρεμβάσεις σε εξοπλισμό που δεν έχει ακόμη φτάσει σε ουσιαστικό στάδιο φθοράς, δημιουργώντας περιττό χρόνο διακοπής λειτουργίας (downtime), κόστος ανταλλακτικών και αχρεία διακοπή της παραγωγικής ροής. Από την άλλη πλευρά, παρατηρούνται περιπτώσεις υποκάλυψης λειτουργικού κινδύνου (under-coverage of operational risk), όπου κρίσιμα υποσυστήματα φθείρονται ταχύτερα από τον εκτιμώμενο κύκλο, με αποτέλεσμα την εκδήλωση απροειδοποίητων αστοχιών μεταξύ δύο προγραμματισμένων παρεμβάσεων.

Σε αυτό το λειτουργικό πλαίσιο αναδύεται η μετάβαση προς την Συντήρηση Βάσει Κατάστασης (Condition-Based Maintenance – CBM) ως εξελικτική απάντηση στα όρια της προγραμματισμένης συντήρησης (Jardine et al., 2006). Η CBM εισάγει μία διαφορετική ερμηνευτική λογική: η συντήρηση δεν πραγματοποιείται επειδή «έφτασε η ώρα», αλλά επειδή υπάρχουν ενδείξεις μεταβολής της πραγματικής λειτουργικής κατάστασης του εξοπλισμού. Η φθορά δεν θεωρείται πλέον αφηρημένη χρονική παράμετρος, αλλά νοείται ως μετρήσιμο και δυναμικό φαινόμενο, το οποίο μπορεί να παρακολουθηθεί μέσα από φυσικές και λειτουργικές μεταβλητές.

Η μετάβαση αυτή προϋποθέτει, σε πρώτο επίπεδο, την ανάπτυξη μηχανισμών παρακολούθησης κατάστασης (condition monitoring). Μεγέθη όπως οι δονήσεις (vibrations), η θερμοκρασία (temperature), το φασματικό περιεχόμενο θορύβου (noise spectral content), η συμπεριφορά λιπαντικών (lubricant behaviour), η ευθυγράμμιση αξόνων (shaft alignment) ή οι αποκλίσεις σε ταχύτητες και φορτία λειτουργίας λειτουργούν ως φορείς πληροφορίας για την εξέλιξη της φθοράς (Jardine et al., 2006; Lee et al., 2014). Σε αντίθεση με την επιθεωρησιακή προσέγγιση, όπου τα ευρήματα είναι σποραδικά και ασυνεχή, το condition monitoring επιτρέπει τη συνεχή καταγραφή της συμπεριφοράς του εξοπλισμού, δημιουργώντας χρονοσειρές (time series) που αποτυπώνουν όχι μόνο την τελική αστοχία, αλλά και τα ενδιάμεσα στάδια υποβάθμισης.

Σε δεύτερο επίπεδο, η CBM (Condition-Based Maintenance) προϋποθέτει την ανάπτυξη διαδικασιών ανάλυσης και ερμηνείας των ενδείξεων. Η απλή ύπαρξη δεδομένων δεν αρκεί· απαιτείται η απομόνωση χαρακτηριστικών (feature extraction), η συσχέτιση μεταβολών με συγκεκριμένα failure mechanisms (μηχανισμούς αστοχίας) και

η διαμόρφωση ορίων απόκλισης (threshold limits) που λειτουργούν ως triggers τεχνικής απόφασης (decision triggers). Σε αυτό το σημείο η μετάβαση από παραδοσιακές πρακτικές συντήρησης (traditional maintenance practices) σε δεδομενοκεντρικές πρακτικές συντήρησης (data-driven maintenance practices) καθίσταται εμφανής: τα δεδομένα δεν χρησιμοποιούνται μόνο για τεκμηρίωση του παρελθόντος, αλλά για την πρόβλεψη της μελλοντικής εξέλιξης της φθοράς και την έγκαιρη ενεργοποίηση παρεμβάσεων (Carvalho et al., 2019).

Η βιβλιογραφία τονίζει ότι η CBM (Condition-Based Maintenance) και η δεδομενοκεντρική συντήρηση (data-driven maintenance) δεν συνιστούν απότομη τεχνολογική τομή, αλλά σταδιακή πορεία ωρίμανσης (Jardine et al., 2006; Carvalho et al., 2019). Στα πρώτα στάδια, ο οργανισμός περιορίζεται στη συστηματικότερη καταγραφή χρόνου διακοπής λειτουργίας (downtime) και συμβάντων αστοχίας (failure events), δημιουργώντας αξιόπιστες βάσεις ιστορικών δεδομένων. Σε επόμενο στάδιο, τα δεδομένα αυτά αρχίζουν να αναλύονται συγκριτικά ανά μηχανή, λειτουργική περιοχή και χρονική περίοδο, αναδεικνύοντας επαναλαμβανόμενα failure patterns (πρότυπα αστοχίας) και ζώνες αυξημένης λειτουργικής ευπάθειας. Μόνο σε προχωρημένες φάσεις ωριμότητας καθίσταται εφικτή η ανάπτυξη προγνωστικών μοντέλων (predictive / prognostics-oriented maintenance models), τα οποία εκτιμούν την υπολειπόμενη ωφέλιμη ζωή (Remaining Useful Life – RUL) των κρίσιμων υποσυστημάτων (Lee et al., 2014).

Υπό αυτό το πρίσμα, η CBM (Condition-Based Maintenance) λειτουργεί ως κομβικός ενδιάμεσος σταθμός ανάμεσα στην προγραμματισμένη και στην πλήρως προγνωστική συντήρηση. Δεν αποτελεί απλώς τεχνική αναβάθμιση, αλλά μετασχηματισμό της ίδιας της νοοτροπίας με την οποία η επιχείρηση αντιλαμβάνεται τη φθορά και την αξιοπιστία. Η συντήρηση παύει να είναι μια διαδικασία χρονικού προγραμματισμού και εξελίσσεται σε διαδικασία ερμηνείας λειτουργικών δεδομένων, όπου τα αρχεία αστοχιών (failure logs), οι χρονοσειρές διακοπών λειτουργίας (downtime time series) και οι δείκτες αξιοπιστίας (reliability indicators) λειτουργούν ως ενδείξεις μιας βαθύτερης δυναμικής λειτουργικής συμπεριφοράς (Mobley, 2002; Jardine et al., 2006).

Η παρούσα εργασία τοποθετείται ακριβώς σε αυτό το ενδιάμεσο στάδιο ωρίμανσης. Τα διαθέσιμα τριετή δεδομένα συντήρησης (three-year maintenance data) — δομημένα ανά μηχανή, ανά λειτουργική περιοχή και με διάκριση μεταξύ προγραμματισμένων και μη προγραμματισμένων συμβάντων συντήρησης (planned and unplanned maintenance events)— επιτρέπουν την ανάλυση της φθοράς όχι ως τυχαίας ακολουθίας βλαβών, αλλά ως εξελικτικής διεργασίας που διαμορφώνεται μέσα στον χρόνο. Η μελετητική προσέγγιση εναρμονίζεται με τη λογική της συντήρησης βάσει κατάστασης (condition-based maintenance) και της δεδομενοκεντρικής συντήρησης (data-driven maintenance): αξιοποιεί ιστορικά failure histories (ιστορικά αστοχιών) ως δυναμικές αναπαραστάσεις λειτουργικής συμπεριφοράς, διερευνά τη σταθερότητα ή τη μεταβολή των failure patterns (προτύπων αστοχίας) και αναζητά ενδείξεις λειτουργικής ωρίμανσης του συστήματος συντήρησης.

Με αυτό τον τρόπο, η μετάβαση από την προγραμματισμένη προς την condition-based συντήρηση (condition-based maintenance) δεν παρουσιάζεται ως τεχνολογικό «άλμα», αλλά ως διαδοχική, εμπειρικά ανιχνεύσιμη διαδικασία, η οποία αποτυπώνεται στη χρονική εξέλιξη των δεικτών αξιοπιστίας (reliability indicators), στη σταθεροποίηση της παραγωγικής ροής και στη σταδιακή μετατροπή των δεδομένων συντήρησης (maintenance data) σε οργανωσιακή, τεχνικά αξιοποιήσιμη γνώση.

2.7 Χωρική διάσταση της φθοράς και διαφοροποίηση failure mechanisms ανά λειτουργική περιοχή εξοπλισμού

Ένα από τα πλέον κρίσιμα στοιχεία που αναδεικνύονται στη σύγχρονη βιβλιογραφία συντήρησης (maintenance) σε βαριά βιομηχανία (heavy industry) είναι ότι η φθορά (degradation) δεν κατανέμεται ομοιόμορφα στον εξοπλισμό, αλλά συγκεντρώνεται σε συγκεκριμένες λειτουργικές περιοχές (functional areas), οι οποίες υπόκεινται σε αυξημένες μηχανικές, θερμικές ή λειτουργικές καταπονήσεις (mechanical, thermal or operational stresses) (Jardine et al., 2006; Mobley, 2002). Η ανάλυση της φθοράς σε συγκεντρωτικό επίπεδο μηχανής, χωρίς διάκριση υποσυστημάτων (subsystems), τείνει να αποκρύπτει κρίσιμες διαφοροποιήσεις στη δυναμική των μηχανισμών αστοχίας (failure mechanisms) και οδηγεί σε περιορισμένη κατανόηση της λειτουργικής συμπεριφοράς του συστήματος (operational behaviour of the system).

Σύμφωνα με την εννοιολογική οπτική που έχει εδραιωθεί τα τελευταία χρόνια, ο βιομηχανικός εξοπλισμός δεν πρέπει να προσεγγίζεται ως ενιαία τεχνική οντότητα, αλλά ως σύστημα ιεραρχικά δομημένων υποσυστημάτων (hierarchically structured subsystems), καθένα από τα οποία φέρει διαφορετικό ρόλο στη διεργασία και υφίσταται διαφορετικού τύπου καταπονήσεις (Moubray, 1997). Τα επιμέρους υποσυστήματα διαφέρουν όχι μόνο ως προς τον μηχανισμό λειτουργίας (operating mechanism) τους, αλλά και ως προς τον τρόπο με τον οποίο αλληλεπιδρούν με τη ροή υλικού (material flow), με το θερμομηχανικό καθεστώς της γραμμής (thermo-mechanical regime of the line) και με τις δυναμικές συνθήκες φόρτισης (dynamic loading conditions).

Αυτή η διαφοροποίηση οδηγεί στη διαμόρφωση εντοπισμένων ζωνών λειτουργικής ευπάθειας (zones of operational vulnerability), στις οποίες η φθορά εμφανίζεται συστηματικά εντονότερη και εξελίσσεται ταχύτερα σε σύγκριση με άλλα τμήματα του ίδιου μηχανήματος (Jardine et al., 2006). Σε διεργασίες έλασης και διαμόρφωσης μετάλλου (rolling and metal forming processes), για παράδειγμα, περιοχές που σχετίζονται με την καθοδήγηση του υλικού (material guiding), με την επαφή μετάλλου–κυλίνδρου (metal–roll contact) ή με μηχανισμούς ευθυγράμμισης (alignment mechanisms) εμφανίζουν συχνά αυξημένη συχνότητα μικρο-αστοχιών (micro-failures), οι οποίες λειτουργούν ως πρόδρομες ενδείξεις υποβάθμισης (early degradation indicators). Αντιθέτως, υποσυστήματα μετάδοσης ισχύος (power transmission subsystems) ή έδρανα υποστήριξης (support bearings) μπορεί να εμφανίζουν

σπανιότερες, αλλά υψηλής έντασης και μεγάλης διάρκειας βλάβες, με διαφορετική δυναμική επιπτώσεων στην παραγωγική ροή (production flow).

Η χωρική αναλυτική προσέγγιση (spatial analytical approach) καθιστά δυνατό να εξεταστεί η φθορά όχι ως στατιστική ιδιότητα της μηχανής, αλλά ως χαρτογραφημένο πεδίο λειτουργικού κινδύνου (mapped field of operational risk). Κάθε λειτουργική περιοχή συγκροτεί δικό της προφίλ αστοχίας (failure profile), με ιδιαίτερα failure modes (τρόπους αστοχίας), ιδιαίτερα μοτίβα επαναληπτικότητας και διαφορετικό ρυθμό εξέλιξης φθοράς. Έτσι, η ανάλυση ανά λειτουργική περιοχή επιτρέπει την αποσαφήνιση της σχέσης ανάμεσα στη φύση της διεργασίας και στον τρόπο εκδήλωσης των αστοχιών, αποκαλύπτοντας μηχανισμούς που παραμένουν αόρατοι σε συγκεντρωτικές μετρήσεις (Mobley, 2002).

Η βιβλιογραφία επισημαίνει ότι η διαφοροποίηση των μηχανισμών αστοχίας (failure mechanisms) σε επίπεδο υποσυστημάτων συνδέεται στενά με τον θερμομηχανικό (thermo-mechanical) και δυναμικό χαρακτήρα (dynamic character) της διεργασίας. Σε υποσυστήματα που υπόκεινται σε έντονη κυκλική φόρτιση (cyclic loading), η φθορά εξελίσσεται σωρευτικά μέσα από μικρο-ρωγμές (micro-cracks), απώλεια επιφανειακής στιβάδας (surface layer loss) ή σταδιακές μεταβολές γεωμετρίας (gradual geometric changes)· σε υποσυστήματα που λειτουργούν σε υψηλές θερμοκρασίες, η φθορά σχετίζεται συχνά με θερμικές διαστολές (thermal expansions), ανομοιομορφίες επαφής (contact irregularities) και μεταβαλλόμενες τριβολογικές συνθήκες (tribological conditions). Αντιθέτως, σε περιοχές μετάδοσης κίνησης και στήριξης (power transmission and support zones), οι αστοχίες συνδέονται περισσότερο με κόπωση υλικών (material fatigue), αστοχίες εδράνων (bearing failures) ή απώλεια ευθυγράμμισης (misalignment) (Moubray, 1997; Jardine et al., 2006). Αυτές οι διαφοροποιήσεις δεν είναι μόνο μηχανικά ενδιαφέρουσες· αποτελούν κρίσιμη είσοδο πληροφόρησης για τον σχεδιασμό της στρατηγικής συντήρησης (maintenance strategy).

Η χωρική διάσταση της φθοράς (spatial dimension of degradation) σχετίζεται επίσης με τον τρόπο με τον οποίο τα συμβάντα αστοχίας (failure events) επηρεάζουν τη συνολική παραγωγική λειτουργία. Μικρές, επαναλαμβανόμενες αστοχίες σε συγκεκριμένες λειτουργικές περιοχές μπορεί να έχουν περιορισμένη διάρκεια αποκατάστασης, αλλά να επιβαρύνουν δυσανάλογα τη συνέχεια της διεργασίας, ιδιαίτερα όταν προκαλούν τοπικές αστάθειες (local instabilities), αποκλίσεις ροής (flow deviations) ή επαναλαμβανόμενες παύσεις συγχρονισμού (synchronization

interruptions). Αντιθέτως, σπάνιες αλλά κρίσιμες βλάβες σε κεντρικά υποσυστήματα μπορούν να οδηγήσουν σε παρατεταμένη διακοπή λειτουργίας (downtime), επηρεάζοντας πολλαπλά στάδια κατάντη εξοπλισμού (downstream equipment) (Wireman, 2010). Η κατανόηση αυτών των διαφορών είναι απαραίτητη για την ιεράρχηση τεχνικών παρεμβάσεων (prioritization of technical interventions), καθώς διαφορετικές λειτουργικές περιοχές δεν συνεισφέρουν ισοδύναμα στο λειτουργικό ρίσκο (operational risk).

Μεθοδολογικά, η ανάλυση της φθοράς ανά λειτουργική περιοχή εναρμονίζεται πλήρως με τις αρχές της συντήρησης βάσει κατάστασης (condition-based maintenance) και της δεδομενοκεντρικής συντήρησης (data-driven maintenance) (Jardine et al., 2006; Lee et al., 2014). Όταν τα αρχεία αστοχιών (failure logs) και τα αρχεία χρόνων διακοπής λειτουργίας (downtime records) οργανώνονται σε επίπεδο υποσυστήματος, καθίσταται δυνατό να αναγνωριστούν σταθερά failure patterns (πρότυπα αστοχίας), να ανιχνευθεί αν η ευπάθεια συγκεκριμένων περιοχών παραμένει σταθερή ή μεταβάλλεται στον χρόνο, και να εκτιμηθεί ο βαθμός στον οποίο οργανωσιακές ή τεχνικές παρεμβάσεις μετασχηματίζουν τη λειτουργική συμπεριφορά του εξοπλισμού.

Η παρούσα μελέτη υιοθετεί πλήρως αυτή τη χωρική εννοιολόγηση της φθοράς (spatial conceptualization of degradation). Η ύπαρξη τριετών ιστορικών δεδομένων (three-year historical data), ταξινομημένων όχι μόνο ανά μηχανή αλλά και ανά λειτουργική περιοχή, επιτρέπει την ανασύσταση της φθοράς ως πολυεπίπεδης και χωρικά διαφοροποιημένης διαδικασίας (multi-level and spatially differentiated process). Μέσα από αυτή την οπτική, η μηχανή δεν αντιμετωπίζεται ως ομοιογενής τεχνική μονάδα, αλλά ως σύνολο λειτουργικών μικρο-περιβαλλόντων (functional micro-environments), καθένα από τα οποία αναπτύσσει το δικό του failure behaviour (συμπεριφορά αστοχίας). Η ανάλυση αυτού του μικρο-επιπέδου (micro-level) επιτρέπει τη μετάβαση από γενικές εκτιμήσεις αξιοπιστίας (reliability) σε βαθύτερη, δομική κατανόηση των μηχανισμών φθοράς (degradation mechanisms), συμβάλλοντας στον αναστοχασμό της στρατηγικής συντήρησης (maintenance strategy) σε συστημικό επίπεδο (systemic level).

2.8 Αξιοπιστία rolling equipment και metal-forming διεργασιών: θερμομηχανική φόρτιση, φθορά και λειτουργική συμπεριφορά εξοπλισμού

Στη βιβλιογραφία της βαριάς βιομηχανίας (heavy industry) και ειδικότερα στον κλάδο του μετάλλου (metal industry), οι διεργασίες έλασης (rolling) και διαμόρφωσης μετάλλου (metal forming) αναγνωρίζονται ως ιδιαίτερα απαιτητικά τεχνολογικά περιβάλλοντα, στα οποία η αξιοπιστία του εξοπλισμού (equipment reliability) δεν καθορίζεται αποκλειστικά από την εγγενή αντοχή των εξαρτημάτων, αλλά από τη σύνθετη αλληλεπίδραση θερμομηχανικών (thermo-mechanical), τριβολογικών (tribological) και δυναμικών παραγόντων (dynamic factors) (Jardine et al., 2006; Moubray, 1997). Οι γραμμές έλασης (rolling lines) λειτουργούν σε καθεστώς συνεχούς μηχανικής καταπόνησης, όπου υψηλές δυνάμεις συμπίεσης (compressive forces), μεταβαλλόμενα φορτία επαφής (contact loads), ταχύτητες κύλισης (rolling speeds) και θερμοκρασιακές μεταβολές (temperature variations) συνδυάζονται σε ένα περιβάλλον συνεχούς ενεργειακής και μηχανικής ροής.

Σε αυτό το πλαίσιο, ο εξοπλισμός έλασης (rolling equipment) δεν μπορεί να ιδωθεί ως απλός μηχανικός μεταδότης δύναμης, αλλά ως δομή πολύπλοκων υποσυστημάτων επαφής και μετάδοσης φορτίου (contact and load transfer subsystems), όπου μικρές αποκλίσεις γεωμετρίας ή ευθυγράμμισης (alignment) δύνανται να μετασχηματιστούν, μέσω επαναλαμβανόμενων κύκλων φόρτισης (loading cycles), σε εξελικτικούς μηχανισμούς φθοράς (degradation mechanisms). Τα κυριότερα υποσυστήματα που αναφέρονται συστηματικά στη διεθνή βιβλιογραφία ως φορείς λειτουργικού κινδύνου (operational risk) είναι οι κύλινδροι έλασης (rolling rolls), τα έδρανα (bearings) και τα housing assemblies, τα συστήματα μετάδοσης ροπής (torque transmission systems) και τα υποσυστήματα καθοδήγησης και σταθεροποίησης της ταινίας ή του ελάσματος (strip guiding and stabilization subsystems) (Moble, 2002).

Η θερμομηχανική φόρτιση (thermo-mechanical loading) συνιστά τον κατεξοχήν παράγοντα διαφοροποίησης της φθοράς σε σχέση με άλλες κατηγορίες βιομηχανικού εξοπλισμού. Η διεργασία έλασης αναπτύσσεται υπό συνθήκες όπου η θερμοκρασία του υλικού (material temperature), οι θερμικές διαστολές (thermal expansions) των μεταλλικών μερών, η τριβή επαφής (contact friction) και οι μηχανικές πιέσεις (mechanical pressures) μεταβάλλονται συνεχώς, δημιουργώντας ένα περιβάλλον όπου η

φθορά δεν εξελίσσεται γραμμικά, αλλά σωρευτικά και ανομοιόμορφα (Moubray, 1997). Σε συνδυασμό με το γεγονός ότι οι κύλινδροι και τα σημεία επαφής υπόκεινται σε έντονη επιφανειακή καταπόνηση (surface stress), αναπτύσσονται μηχανισμοί μικρο-ψηφίδωσης (micro-pitting), αποκόλλησης επιφανειακού υλικού (surface spalling), τροχιακής ασυμμετρίας (orbital asymmetry) και τοπικής αλλοίωσης τραχύτητας (local roughness alteration), οι οποίοι λειτουργούν ως ενδιάμεσα στάδια failure progression (εξέλιξης αστοχίας) πριν από την εκδήλωση μιας πλήρους αστοχίας.

Σε επίπεδο δυναμικής αξιοπιστίας (dynamic reliability), οι rolling διεργασίες (rolling processes) χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό λειτουργικής αλληλεξάρτησης (operational interdependence) μεταξύ των υποσυστημάτων. Η απώλεια ευθυγράμμισης (misalignment) σε έναν κύλινδρο ή η μερική υποβάθμιση ενός εδράνου (bearing) μπορεί να μη οδηγήσει άμεσα σε βλάβη, ωστόσο μεταβάλλει την κατανομή φορτίου (load distribution) και τις συνθήκες επαφής (contact conditions) κατά τρόπο που επιταχύνει τη φθορά γειτονικών υποσυστημάτων. Έτσι, η φθορά εκδηλώνεται συχνά ως διαδοχική διαδικασία διάχυσης, όπου το αρχικό μικρο-γεγονός (micro-event) δεν καταγράφεται ως αστοχία, αλλά ως ανεπαίσθητη μετατόπιση της λειτουργικής συμπεριφοράς του συστήματος (operational behaviour of the system) (Jardine et al., 2006).

Ερευνητικές εργασίες στον χώρο του metal forming (διαμόρφωσης μετάλλου) έχουν δείξει ότι οι αποκλίσεις ευθυγράμμισης (alignment deviations), οι κλίσεις φορτίου (load gradients) και οι τοπικές διακυμάνσεις θερμοκρασίας (local temperature fluctuations) οδηγούν σε ασύμμετρη κατανομή τάσεων (asymmetric stress distribution), η οποία αυξάνει σημαντικά την πιθανότητα πρόωρης κόπωσης υλικών (material fatigue) και επιταχυνόμενης φθοράς εδράνων και κυλίνδρων (bearings and rolls). Η διεργασία αυτή δεν είναι στιγμιαία· αντιθέτως, αναπτύσσεται μέσα από επαναλαμβανόμενους κύκλους, στους οποίους η μικρο-υποβάθμιση (micro-degradation) συσσωρεύεται μέχρι να υπερβεί κρίσιμα κατώφλια αντοχής (strength thresholds). Η κατανόηση αυτής της εξελικτικής φύσης της φθοράς αποτελεί βασική προϋπόθεση για τον σχεδιασμό αποτελεσματικών στρατηγικών συντήρησης (maintenance strategies) σε rolling installations (εγκαταστάσεις έλασης) (Mobley, 2002; Moubray, 1997).

Παράλληλα, οι διεργασίες έλασης (rolling processes) συνδέονται με υψηλό βαθμό λειτουργικής ευαισθησίας στις μεταβατικές καταστάσεις (operational sensitivity to transient states). Επανεκκινήσεις (restarts), αλλαγές προϊόντος (product changes), διακυμάνσεις ταχύτητας (speed variations) ή αλλαγές πάχους (thickness changes)

προκαλούν μεταβολές στις θερμικές και μηχανικές ισορροπίες του συστήματος, αυξάνοντας την πιθανότητα εκδήλωσης μικρο-αστοχιών (micro-failures). Η βιβλιογραφία αναγνωρίζει ότι μεγάλο ποσοστό των βλαβών σε τέτοια συστήματα δεν προκύπτει κατά τη σταθερή λειτουργία, αλλά στις μεταβατικές φάσεις (transient phases), όταν η διεργασία εξέρχεται από το θερμομηχανικό καθεστώς ισορροπίας (thermo-mechanical equilibrium regime) της. Αυτό το εύρημα ενισχύει την ανάγκη διαχρονικής και συγκριτικής ερμηνείας των failure events (συμβάντων αστοχίας), πέραν της απλής στατιστικής αποτύπωσης (Jardine et al., 2006).

Η ιδιαίτερη συνεισφορά της συντήρησης βάσει κατάστασης (condition-based maintenance) και της δεδομενοκεντρικής συντήρησης (data-driven maintenance) στις rolling εφαρμογές (rolling applications) έγκειται στο ότι επιτρέπει τη συνεχή παρατήρηση της μικρο-κλίμακας της φθοράς (micro-scale of degradation). Δονησιολογικές μετρήσεις (vibration measurements), θερμοκρασιακά προφίλ (temperature profiles), φασματικές υπογραφές θορύβου (spectral noise signatures) και δεδομένα από λιπαντικά συστήματα (lubrication systems) λειτουργούν ως πρόδρομες ενδείξεις υποβάθμισης, πριν η φθορά μετατραπεί σε λειτουργική αστοχία. Σε πολλές βιομηχανικές αναφορές, η έγκαιρη ανίχνευση τέτοιων αποκλίσεων έχει συνδεθεί με σημαντική μείωση του μη προγραμματισμένου χρόνου διακοπής λειτουργίας (unplanned downtime) και με δυνατότητα στοχευμένης, μη παρεμβατικής συντήρησης (non-intrusive maintenance) (Lee et al., 2014; Carvalho et al., 2019).

Σε μεθοδολογικό επίπεδο (methodological level), η ανάλυση της φθοράς σε rolling και metal-forming εξοπλισμό (rolling and metal-forming equipment) απαιτεί τη συσχέτιση failure patterns (προτύπων αστοχίας) με συγκεκριμένα μηχανικά φαινόμενα. Η ταυτοποίηση επαναλαμβανόμενων αστοχιών σε μία λειτουργική περιοχή δεν ερμηνεύεται μόνο ως στατιστικό μοτίβο, αλλά ως ένδειξη συγκεκριμένου failure mechanism (μηχανισμού αστοχίας) (π.χ., αστοχία ευθυγράμμισης, επιταχυνόμενη κόπωση εδράνων, θερμική ασυμμετρία επαφής). Η μετατόπιση αυτών των patterns (προτύπων) στον χρόνο, ή αντίστοιχα η σταθεροποίησή τους, λειτουργεί ως δείκτης ωρίμανσης της στρατηγικής συντήρησης (maintenance strategy maturity) και της εσωτερικής κατανόησης της διεργασίας (Moble, 2002).

Η παρούσα μελέτη τοποθετεί τη διερεύνηση της αξιοπιστίας rolling εξοπλισμού (reliability of rolling equipment) μέσα σε αυτό το ερμηνευτικό πλαίσιο. Η ύπαρξη τριετών δεδομένων συντήρησης (three-year maintenance data), αναλυμένων ανά μηχανή

και ανά λειτουργική περιοχή, επιτρέπει την ανασύσταση της φθοράς ως θερμομηχανικά και χωρικά διαφοροποιημένης διαδικασίας (thermo-mechanically and spatially differentiated process), η οποία εξελίσσεται στον χρόνο και διαμορφώνει διακριτά failure behaviours (συμπεριφορές αστοχίας). Μέσα από αυτή την προσέγγιση, ο rolling εξοπλισμός (rolling equipment) δεν εξετάζεται ως ομοιογενής μηχανική μονάδα, αλλά ως δυναμικό σύστημα αλληλεπίδρασης φορτίου (load), φθοράς (degradation) και λειτουργικής σταθερότητας (operational stability), στο οποίο η στρατηγική συντήρησης (maintenance strategy) διαδραματίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση της αξιοπιστίας (reliability).

2.9 Failure propagation και συστημική διάσταση του downtime σε continuous production lines

Στις συνεχείς και ημι-συνεχείς γραμμές παραγωγής (continuous and semi-continuous production lines), οι αστοχίες (failures) δεν εκδηλώνονται ως μεμονωμένα τεχνικά γεγονότα περιορισμένης κλίμακας, αλλά ως συστημικές διαταραχές (systemic disturbances), οι οποίες διαχέονται κατά μήκος της παραγωγικής αλυσίδας (production chain) και επηρεάζουν πολλαπλά στάδια της διεργασίας (Jardine et al., 2006; Mobley, 2002). Σε αντίθεση με αυτόνομα ή νησιωτικά συστήματα παραγωγής (stand-alone or island production systems), όπου η αστοχία ενός μηχανήματος έχει κυρίως τοπικό χαρακτήρα, οι continuous lines (συνεχείς γραμμές παραγωγής) χαρακτηρίζονται από ισχυρή λειτουργική εξάρτηση (operational interdependence) μεταξύ διαδοχικών υποσυστημάτων (subsystems), με αποτέλεσμα ακόμη και μία περιορισμένης κλίμακας βλάβη να δύναται να προκαλέσει ευρύτερη αποσταθεροποίηση της παραγωγικής ροής (destabilization of production flow).

Η θεωρητική αυτή παρατήρηση συνδέεται με την έννοια της λειτουργικής σύζευξης (functional coupling), η οποία αναφέρεται στον βαθμό κατά τον οποίο η λειτουργία ενός υποσυστήματος προϋποθέτει τη συνεχή και ομαλή λειτουργία προηγούμενων ή επόμενων σταδίων (Perrow, 1999). Στις γραμμές έλασης και metal forming (rolling and metal forming lines), η ροή του υλικού (material flow), οι ταχύτητες κίνησης (operational speeds), οι θερμοκρασιακές καταστάσεις (thermal states) και ο χρονισμός των διεργασιών (process timing) διατηρούνται εντός στενών λειτουργικών παραθύρων ισορροπίας (operational equilibrium windows). Όταν μία αστοχία διακόψει αιφνιδίως τη ροή, το σύστημα εξέρχεται από αυτήν την ισορροπία, δημιουργώντας αλυσιδωτές συνέπειες (cascading effects) τόσο upstream όσο και downstream.

Η διάχυση των επιπτώσεων της αστοχίας δεν περιορίζεται στον καθαρό χρόνο μη λειτουργίας (downtime). Σε πολλές περιπτώσεις, η διακοπή σε ένα κρίσιμο υποσύστημα (critical subsystem) επηρεάζει το θερμομηχανικό καθεστώς του υλικού (thermo-mechanical regime of the material), οδηγεί σε απώλεια σταθερότητας σε γειτονικό εξοπλισμό, αυξάνει το λειτουργικό φορτίο επανεκκίνησης (restart load) και δημιουργεί μεταβατικές καταστάσεις λειτουργίας (transient operational states) στις οποίες η πιθανότητα δευτερογενών βλαβών (secondary failures) είναι αυξημένη (Mobley, 2002). Έτσι, η επίδραση ενός failure event (συμβάντος αστοχίας) αποκτά πολλαπλασιαστικό

χαρακτήρα (multiplicative impact), υπερβαίνοντας κατά πολύ τη διάρκεια του Mean Time To Repair – MTTR (μέσος χρόνος αποκατάστασης).

Η βιβλιογραφία για continuous-flow production (παραγωγή συνεχούς ροής) συστηματικά αναδεικνύει ότι το downtime (χρόνος διακοπής λειτουργίας) πρέπει να νοείται όχι ως στατικός χρονικός δείκτης, αλλά ως συστημικό φαινόμενο (systemic phenomenon) με τρεις διακριτές διαστάσεις: την άμεση απώλεια παραγωγικού χρόνου, τις δευτερογενείς λειτουργικές επιβαρύνσεις (secondary operational burdens) —όπως οι μεταβατικές εκκινήσεις (transient start-ups), η απώλεια θερμικής σταθερότητας (thermal stability) ή η ανάγκη απορρύπανσης της γραμμής (line cleaning or purging)— και τις εμμέσες επιπτώσεις στην αξιοπιστία (indirect reliability impacts) upstream και downstream εξοπλισμού (Jardine et al., 2006). Αυτή η τριπλή διάσταση καθιστά εμφανές ότι δύο αστοχίες ίσης διάρκειας μπορεί να έχουν εντελώς διαφορετικό λειτουργικό και παραγωγικό αντίκτυπο (operational and production impact), ανάλογα με τη θέση τους στη γραμμή και τον βαθμό λειτουργικής σύζευξης (functional coupling) του αντίστοιχου υποσυστήματος.

Στο πλαίσιο αυτό, η διάχυση αστοχιών (failure propagation) δεν ταυτίζεται με την απλή «μεταφορά» βλάβης από ένα σημείο σε άλλο, αλλά με την εξέλιξη ενός αρχικού μικρο-γεγονότος (micro-event) σε ευρύτερη λειτουργική διαταραχή (operational disturbance). Μικρές αποκλίσεις που δεν καταγράφονται άμεσα ως αστοχίες —όπως αστάθειες ταχύτητας (speed instabilities), μεταβολές ευθυγράμμισης (alignment deviations) ή θερμικές ανισοτροπίες (thermal anisotropies)— μπορούν, εάν δεν εντοπιστούν εγκαίρως, να οδηγήσουν σε επιταχυνόμενη φθορά γειτονικών υποσυστημάτων, αυξάνοντας την πιθανότητα εκδήλωσης σημαντικότερης βλάβης σε μεταγενέστερη χρονική στιγμή. Με αυτή την έννοια, η failure propagation (διάχυση αστοχιών) συνδέει τη μικροκλίμακα της φθοράς (micro-scale degradation) με τη μακροκλίμακα της παραγωγικής αστάθειας (macro-scale production instability).

Η συντήρηση βάσει κατάστασης (condition-based maintenance) και η δεδομενοκεντρική συντήρηση (data-driven maintenance) προσφέρουν ένα ιδιαίτερα κατάλληλο αναλυτικό πλαίσιο για την κατανόηση των φαινομένων αυτών, καθώς επιτρέπουν τη συσχέτιση των failure logs (αρχείων αστοχιών) με τη λειτουργική χρονικότητα της γραμμής (operational temporality of the line) (Lee et al., 2014). Μέσω της διαχρονικής ανάλυσης (longitudinal analysis) των γεγονότων downtime, της εντοπισμένης κατανομής (localized distribution) τους ανά λειτουργική περιοχή και της

διερεύνησης των μεταβατικών φάσεων (transient phases) πριν και μετά την αστοχία, καθίσταται δυνατό να αναγνωριστούν πρότυπα failure escalation (κλιμάκωσης αστοχιών), δηλαδή ακολουθίες τεχνικών συμβάντων που τείνουν να επαναλαμβάνονται υπό παρόμοιες συνθήκες.

Η σύγχρονη βιβλιογραφία υποδεικνύει ότι σε τέτοια περιβάλλοντα η αξιοπιστία (reliability) δεν πρέπει να ερμηνεύεται ως ιδιότητα της μεμονωμένης μηχανής, αλλά ως συστημική ιδιότητα (systemic property) του συνολικού παραγωγικού συστήματος (production system) (Perrow, 1999; Jardine et al., 2006). Η σταθερότητα του εξοπλισμού αποκτά νόημα μόνο όταν εξετάζεται σε συνάρτηση με τη λειτουργική του θέση (operational position) στη γραμμή, τον ρόλο του στον χρονισμό της διαδικασίας (process timing) και τον τρόπο με τον οποίο οι αστοχίες του επηρεάζουν τη συμπεριφορά του υπόλοιπου εξοπλισμού. Με αυτό τον τρόπο, η failure propagation (διάχυση αστοχιών) λειτουργεί ως έννοια-κλειδί (key concept) για την κατανόηση της σχέσης ανάμεσα στη μικροδομή των αστοχιών (micro-structure of failures) και στη μακροδομή του συστήματος παραγωγής (macro-structure of the production system).

Η παρούσα εργασία υιοθετεί αυτή τη συστημική θεώρηση (systemic perspective). Η ανάλυση των δεδομένων συντήρησης (maintenance data) δεν περιορίζεται στη μέτρηση αθροιστικού downtime, αλλά εστιάζει στον τρόπο με τον οποίο τα failure events (συμβάντα αστοχίας) κατανέμονται χωρικά και χρονικά (spatially and temporally), στον βαθμό επαναληπτικότητας (repeatability) ανά λειτουργική περιοχή και στη συσχέτιση συγκεκριμένων βλαβών με μεταβατικές καταστάσεις της γραμμής (line transient states). Στόχος είναι να διερευνηθεί όχι μόνο πόσο συχνά και πόσο διαρκούν οι αστοχίες, αλλά πώς εξελίσσονται μέσα στο σύστημα, πώς μετασχηματίζουν το λειτουργικό του προφίλ (operational profile) και σε ποιο βαθμό η ωρίμανση της στρατηγικής συντήρησης (maintenance strategy maturity) περιορίζει τα φαινόμενα failure propagation (διάχυσης αστοχιών) στον χρόνο.

2.10 Σύνθεση θεωρητικού πλαισίου και σύνδεση με βιομηχανική πρακτική

Η βιβλιογραφική ανασκόπηση (literature review) που προηγήθηκε επιτρέπει τη διαμόρφωση ενός συνεκτικού θεωρητικού πλαισίου (theoretical framework) για την ανάλυση της συντήρησης (maintenance) στη βαριά βιομηχανία (heavy industry) και ειδικότερα στον κλάδο των μετάλλων και του αλουμινίου (metals and aluminium industry). Σε αυτό το πλαίσιο, το Industry 4.0 δεν εκλαμβάνεται ως ένα σύνολο αποσπασματικών τεχνολογικών λύσεων (technological solutions), αλλά ως διαδικασία σταδιακής αναδιοργάνωσης (reorganization) του τρόπου με τον οποίο η βιομηχανική επιχείρηση αντιλαμβάνεται, παρακολουθεί και ερμηνεύει τη λειτουργική συμπεριφορά του εξοπλισμού (operational behaviour of equipment) της (Lee et al., 2014; Carvalho et al., 2019). Η συντήρηση μετασχηματίζεται από κλασική λειτουργία υποστήριξης (support function) σε κεντρικό μηχανισμό διαχείρισης λειτουργικού κινδύνου (operational risk management mechanism), παραγωγής τεχνικής γνώσης (technical knowledge) και υποστήριξης στρατηγικών αποφάσεων (strategic decision-making).

Ένα πρώτο βασικό συμπέρασμα είναι ότι η εξέλιξη των στρατηγικών συντήρησης (maintenance strategies) ακολουθεί μια σχετικά σταθερή πορεία ωρίμανσης (maturity trajectory): από τη reactive λογική (reactive maintenance / run-to-failure), όπου οι παρεμβάσεις ενεργοποιούνται μόνο μετά την εκδήλωση αστοχίας (failure), προς την preventive λογική (preventive maintenance – time-based ή usage-based), και από εκεί στη condition-based maintenance (CBM – συντήρηση βάσει κατάστασης) και τελικά στη predictive / prescriptive maintenance (προγνωστική / κατευθυνόμενη συντήρηση) (Moubray, 1997; Jardine et al., 2006). Η Condition-Based Maintenance (CBM) αναδεικνύεται ως κρίσιμο ενδιάμεσο βήμα, καθώς απαιτεί από τον οργανισμό να αναγνωρίσει ότι η φθορά (degradation) δεν είναι ένας στατικός, χρονικά γραμμικός μηχανισμός, αλλά μια δυναμική διεργασία (dynamic process), της οποίας η εξέλιξη μπορεί να παρατηρηθεί, να ποσοτικοποιηθεί και να επηρεαστεί μέσω κατάλληλων τεχνικών παρεμβάσεων (technical interventions).

Σε αυτό το θεωρητικό πλαίσιο, οι δείκτες MTBF (Mean Time Between Failures – μέσος χρόνος μεταξύ αστοχιών) και MTTR (Mean Time To Repair – μέσος χρόνος αποκατάστασης) λειτουργούν ως «παράθυρα» στις εσωτερικές δυναμικές της συντήρησης (maintenance dynamics). Όταν εξετάζονται διαχρονικά και σε ανάλυση ανά

μηχανή και λειτουργική περιοχή, δεν αποτελούν απλούς αριθμούς, αλλά συμπυκνώνουν πληροφορία για το πώς η συντήρηση μαθαίνει να ελέγχει τη συχνότητα (frequency) και τη διάρκεια των αστοχιών (duration of failures) (Mobley, 2002). Μελέτες σε βιομηχανικά περιβάλλοντα (industrial environments) δείχνουν ότι προγράμματα ψηφιακού μετασχηματισμού συντήρησης (digital maintenance transformation), τα οποία συνδυάζουν CMMS (Computerized Maintenance Management Systems), condition monitoring (παρακολούθηση κατάστασης) και data analytics (ανάλυση δεδομένων), οδηγούν σε σταδιακή αύξηση του MTBF και μείωση του MTTR, με άμεση επίδραση στη διαθεσιμότητα (availability) και στον Overall Equipment Effectiveness – OEE (συνολική αποτελεσματικότητα εξοπλισμού) (Lee et al., 2014; Carvalho et al., 2019). Στην πράξη αυτό σημαίνει ότι ο εξοπλισμός όχι μόνο χαλάει πιο σπάνια, αλλά όταν χαλάει επανέρχεται ταχύτερα σε κατάσταση πλήρους λειτουργικότητας, με μικρότερη διαταραχή της παραγωγικής ροής (production flow).

Η διαθεσιμότητα (availability) και ο OEE (Overall Equipment Effectiveness) αποτελούν τη γλώσσα μέσα από την οποία η συντήρηση γίνεται αντιληπτή από τη διοίκηση παραγωγής (production management). Δεν είναι τυχαίο ότι πολλές από τις πρόσφατες μελέτες ψηφιακού μετασχηματισμού (digital transformation) στη συντήρηση περιγράφονται ακριβώς με όρους βελτίωσης OEE, αύξησης uptime (χρόνου λειτουργίας) και μείωσης unplanned downtime (μη προγραμματισμένου χρόνου διακοπής λειτουργίας) (Carvalho et al., 2019). Σε αναφορές για τον ψηφιακό μετασχηματισμό της συντήρησης, τονίζεται ότι η εφαρμογή ψηφιακών εργαλείων, όπως online condition monitoring, advanced analytics και predictive models, συνδέεται με βελτίωση της διαθεσιμότητας και του OEE, πολλές φορές μετρήσιμη σε αύξηση της συνολικής αποδοτικότητας της τάξης μερικών ποσοστιαίων μονάδων, η οποία όμως μεταφράζεται σε σημαντική οικονομική επίδραση σε μεγάλες βιομηχανικές εγκαταστάσεις (industrial facilities).

Στον χώρο των μετάλλων (metals industry) και ειδικά στο αλουμίνιο (aluminium industry), οι εφαρμοσμένες μελέτες επιβεβαιώνουν ότι η ενσωμάτωση πρακτικών Industry 4.0 στη συντήρηση δεν είναι θεωρητική σύλληψη αλλά ήδη υπαρκτή βιομηχανική πραγματικότητα (industrial reality). Πρόσφατη μελέτη για predictive maintenance (προγνωστική συντήρηση) σε εξοπλισμό παραγωγής αλουμινίου, βασισμένη σε AI-powered αισθητήρες (AI-powered sensors) και αναλυτικά μοντέλα (analytical models), δείχνει ότι η έγκαιρη ανίχνευση αποκλίσεων στη συμπεριφορά του

εξοπλισμού επιτρέπει την προληπτική επέμβαση, μειώνοντας το απρογραμματίστο downtime (unplanned downtime) και βελτιώνοντας τη συνέπεια της παραγωγικής ροής (production consistency) (Lee et al., 2014). Αντίστοιχα, case studies σε μεταλλουργικές και εξορυκτικές εφαρμογές παρουσιάζουν την αξιοποίηση machine learning και deep learning τεχνικών για την πρόβλεψη αστοχιών σε mills, conveyors και άλλα κρίσιμα μηχανήματα, επιτυγχάνοντας σημαντική μείωση των βλαβών που οδηγούν σε μεγάλες διακοπές λειτουργίας (operational shutdowns).

Σε αυτό το σημείο αναδεικνύεται και η σημασία της ποιοτικής και δομημένης καταγραφής δεδομένων συντήρησης (structured maintenance data recording). Πολλά από τα αναφερόμενα case studies στηρίζονται σε δεδομένα που οργανώνονται όχι μόνο σε επίπεδο συνολικού μηχανήματος, αλλά και σε επίπεδο υποσυστήματος (subsystem level), επιτρέποντας την αναγνώριση συγκεκριμένων failure patterns (προτύπων αστοχίας) (Jardine et al., 2006). Το γεγονός ότι στην υπό εξέταση περίπτωση διατίθενται τριετή δεδομένα συντήρησης (three-year maintenance datasets), ταξινομημένα ανά μηχανή και ανά λειτουργική περιοχή, επιτρέπει μια αντίστοιχη, «βιομηχανικού τύπου» ανάλυση (industrial-type analysis), εναρμονισμένη με τις προσεγγίσεις που περιγράφονται στη διεθνή βιβλιογραφία. Η εργασία δεν επιχειρεί να εφαρμόσει απαραίτητα ένα πλήρως ανεπτυγμένο AI-based predictive μοντέλο, αλλά υιοθετεί την ίδια λογική: αντιμετωπίζει τα failure logs (αρχεία αστοχιών) ως χρονοσειρές λειτουργικής συμπεριφοράς (time series of operational behaviour), μέσα από τις οποίες μπορεί να αποκαλυφθεί η εσωτερική δυναμική των failure mechanisms (μηχανισμών αστοχίας).

Ένα ακόμη σημαντικό στοιχείο του θεωρητικού πλαισίου είναι η διάσταση της διάχυσης αστοχιών (failure propagation) σε συνεχείς γραμμές παραγωγής (continuous production lines). Σε κλασικές θεωρητικές προσεγγίσεις αξιοπιστίας (reliability theory), η αστοχία συχνά αντιμετωπίζεται ως ιδιότητα ενός αυτόνομου στοιχείου (autonomous component). Ωστόσο, τα case studies σε continuous-flow ή batch διεργασίες (continuous-flow or batch processes) δείχνουν ότι το πραγματικό λειτουργικό κόστος μιας αστοχίας (operational cost of a failure) δεν εξαρτάται μόνο από τη διάρκεια επισκευής, αλλά και από τον τρόπο με τον οποίο το failure event διαταράσσει τη ροή υλικού (material flow), τις χρονικές αλληλουχίες διεργασιών (process sequencing) και τις θερμομηχανικές καταστάσεις (thermo-mechanical states) των ενδιάμεσων προϊόντων (Perrow, 1999). Με αυτή την έννοια, η αξιοπιστία (reliability) δεν αποτελεί απλώς ιδιότητα του εξοπλισμού,

αλλά συστημικό χαρακτηριστικό (systemic characteristic) του συνολικού παραγωγικού μοντέλου (production system).

Επιπλέον, η βιβλιογραφία για τη στρατηγική διάσταση του maintenance (strategic dimension of maintenance) στον ψηφιακό μετασχηματισμό (digital transformation) αναδεικνύει ότι η επιτυχία τέτοιων πρωτοβουλιών εξαρτάται από την ικανότητα του οργανισμού να συνδέσει τα τεχνικά insights (technical insights) με τα επιχειρησιακά αποτελέσματα (operational outcomes). Μελέτες που εξετάζουν τη σχέση Total Productive Maintenance – TPM, Industry 4.0 technologies και maintenance performance δείχνουν ότι η υιοθέτηση digital enablers (ψηφιακών τεχνολογικών υποδομών) —όπως αισθητήρες, συστήματα επικοινωνίας και ανάλυση δεδομένων— ενισχύει τον αντίκτυπο των TPM πρακτικών στην απόδοση της συντήρησης, υπό την προϋπόθεση ότι υπάρχει σαφής στρατηγική στόχευση (strategic alignment) και οργανωσιακή δέσμευση (organizational commitment) (Carvalho et al., 2019).

Συνολικά, το θεωρητικό πλαίσιο (theoretical framework) που προκύπτει από τη βιβλιογραφία μπορεί να συνοψιστεί ως εξής, χωρίς να χρειάζεται να το μετατρέψουμε σε λίστα: ο εξοπλισμός της βαριάς βιομηχανίας (heavy industrial equipment) πρέπει να ιδωθεί ως σύστημα αλληλεξαρτώμενων υποσυστημάτων (interdependent subsystems), στα οποία η φθορά και οι αστοχίες έχουν εξελικτικό και συστημικό χαρακτήρα (evolutionary and systemic nature)· οι δείκτες αξιοπιστίας και διαθεσιμότητας (reliability and availability indicators) —MTBF, MTTR, availability, OEE— λειτουργούν ως συμπυκνωμένες αναπαραστάσεις (condensed representations) της λειτουργικής ωριμότητας και της αποτελεσματικότητας της στρατηγικής συντήρησης (maintenance strategy)· οι πρακτικές Industry 4.0, μέσω CBM (Condition-Based Maintenance) και PdM (Predictive Maintenance), επιτρέπουν τη μετάβαση από μια συντήρηση που «αντιδρά» σε μια συντήρηση που «προβλέπει» και «μαθαίνει» από τα δεδομένα· και τέλος, οι πραγματικές βιομηχανικές περιπτώσεις (industrial case studies) στον κλάδο του αλουμινίου και των μετάλλων (aluminium and metals sector) επιβεβαιώνουν ότι αυτός ο μετασχηματισμός μπορεί να αποτυπωθεί σε μετρήσιμα αποτελέσματα (measurable outcomes), όπως η μείωση του downtime, η αύξηση του OEE και η βελτίωση της ενεργειακής και υλικής αποδοτικότητας (energy and material efficiency).

3. Μεθοδολογία Έρευνας (Research Methodology)

3.1 Ερευνητική προσέγγιση και σχεδιασμός μελέτης (Research Approach and Study Design)

Η παρούσα εργασία υιοθετεί τη μεθοδολογική προσέγγιση της εμπειρικής βιομηχανικής μελέτης περίπτωσης (empirical industrial case study), η οποία αποτελεί ευρέως χρησιμοποιούμενη ερευνητική στρατηγική για την ανάλυση πολύπλοκων τεχνικών και οργανωσιακών φαινομένων σε πραγματικά βιομηχανικά περιβάλλοντα. Η συγκεκριμένη προσέγγιση επιτρέπει τη διερεύνηση της λειτουργικής συμπεριφοράς βιομηχανικών συστημάτων μέσα στο πραγματικό τους λειτουργικό πλαίσιο, αξιοποιώντας πραγματικά επιχειρησιακά δεδομένα (real operational data) και όχι θεωρητικές ή προσομοιωμένες παραδοχές (Yin, 2018).

Στο πεδίο της βιομηχανικής συντήρησης (industrial maintenance) και της αξιοπιστίας εξοπλισμού (equipment reliability), η μελέτη περίπτωσης θεωρείται ιδιαίτερα κατάλληλη ερευνητική μέθοδος, καθώς επιτρέπει τη συστηματική ανάλυση της λειτουργικής συμπεριφοράς συγκεκριμένων εγκαταστάσεων παραγωγής, λαμβάνοντας υπόψη τις τεχνικές, οργανωσιακές και λειτουργικές ιδιαιτερότητες που χαρακτηρίζουν κάθε βιομηχανικό σύστημα (Jardine et al., 2006). Σε αντίθεση με καθαρά θεωρητικές προσεγγίσεις, η εμπειρική μελέτη περίπτωσης επιτρέπει την κατανόηση της συντήρησης ως δυναμικής διεργασίας διαχείρισης φθοράς και λειτουργικού κινδύνου (dynamic process of degradation and operational risk management).

Η παρούσα έρευνα επικεντρώνεται σε γραμμή έλασης αλουμινίου (aluminium rolling production line), ένα βιομηχανικό περιβάλλον το οποίο χαρακτηρίζεται από υψηλό επίπεδο μηχανικής καταπόνησης, έντονες θερμομηχανικές αλληλεπιδράσεις και ισχυρή λειτουργική αλληλεξάρτηση μεταξύ των επιμέρους υποσυστημάτων της παραγωγικής διαδικασίας. Σε τέτοιες εγκαταστάσεις, η αξιοπιστία του εξοπλισμού δεν επηρεάζει μόνο τη λειτουργία μεμονωμένων μηχανών, αλλά καθορίζει τη συνολική σταθερότητα της παραγωγικής διαδικασίας και τη δυνατότητα διατήρησης συνεχούς ροής παραγωγής.

Οι γραμμές έλασης αποτελούν χαρακτηριστικά παραδείγματα continuous production systems (συστημάτων συνεχούς παραγωγής), στα οποία η λειτουργία των επιμέρους μηχανών είναι στενά συνδεδεμένη μέσω της ροής του υλικού, των ταχυτήτων επεξεργασίας και των θερμομηχανικών συνθηκών της διεργασίας. Σε τέτοια περιβάλλοντα, ακόμη και μικρής κλίμακας τεχνικές αστοχίες μπορούν να προκαλέσουν δυσανάλογες διαταραχές στη λειτουργία της γραμμής, οδηγώντας σε διακοπές παραγωγής, απώλεια παραγωγικού χρόνου και αυξημένες απαιτήσεις επανεκκίνησης του εξοπλισμού (Mobley, 2002).

Στο πλαίσιο αυτό, η ανάλυση των δεδομένων συντήρησης αποκτά ιδιαίτερη σημασία, καθώς επιτρέπει την κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η φθορά και οι αστοχίες εξελίσσονται μέσα στον χρόνο και επηρεάζουν τη λειτουργική συμπεριφορά του εξοπλισμού. Η συστηματική καταγραφή των συμβάντων βλάβης (failure events), του αντίστοιχου χρόνου αποκατάστασης (repair time) και της φύσης της αστοχίας (failure type) δημιουργεί ένα σύνολο δεδομένων που μπορεί να αξιοποιηθεί για την ανάλυση προτύπων φθοράς, τη διερεύνηση της επαναληπτικότητας των βλαβών και την εκτίμηση της συνολικής αξιοπιστίας του εξοπλισμού.

Η εμπειρική βάση της μελέτης αποτελείται από ιστορικά δεδομένα συντήρησης (historical maintenance datasets) τα οποία προέρχονται από τη λειτουργία μιας βιομηχανικής εγκατάστασης παραγωγής αλουμινίου και καλύπτουν χρονική περίοδο περίπου τριών ετών (2022–2025). Τα δεδομένα αυτά αφορούν επτά βασικές μηχανές της γραμμής παραγωγής και περιλαμβάνουν καταγραφές μη προγραμματισμένων βλαβών (unplanned maintenance events), τον αντίστοιχο χρόνο διακοπής λειτουργίας καθώς και τον χρόνο που απαιτήθηκε για την αποκατάσταση της βλάβης.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται σε δύο από τις μηχανές της γραμμής παραγωγής, τις Herrvoss-2 και Georg-1, οι οποίες θεωρούνται κρίσιμα στοιχεία της λειτουργίας της εγκατάστασης. Για τις συγκεκριμένες μηχανές διατίθενται πιο αναλυτικά δεδομένα αξιοπιστίας, τα οποία περιλαμβάνουν δείκτες όπως Mean Time Between Failures (MTBF – μέσος χρόνος μεταξύ αστοχιών) και Mean Time To Repair (MTTR – μέσος χρόνος αποκατάστασης), καθώς και αναλύσεις Pareto (Pareto analysis) που επιτρέπουν την αναγνώριση των σημαντικότερων κατηγοριών βλαβών. Η ύπαρξη αυτών των δεδομένων καθιστά δυνατή τη βαθύτερη διερεύνηση της λειτουργικής συμπεριφοράς των συγκεκριμένων μηχανών και τη συσχέτιση των βλαβών με συγκεκριμένες τεχνικές αιτίες.

Για τις υπόλοιπες πέντε μηχανές της γραμμής παραγωγής, τα διαθέσιμα δεδομένα έχουν μηνιαία μορφή καταγραφής (monthly maintenance records) και περιλαμβάνουν πληροφορίες σχετικά με τη διάρκεια των βλαβών μέσα σε κάθε μήνα, καθώς και τη φύση της αστοχίας. Οι βλάβες κατηγοριοποιούνται σε μηχανολογικές (mechanical failures) και ηλεκτρολογικές ή ηλεκτρονικές (electrical / electronic failures), γεγονός που επιτρέπει την ανάλυση της σχετικής συμβολής διαφορετικών τεχνικών κατηγοριών αστοχιών στη συνολική διακοπή λειτουργίας του εξοπλισμού.

Επιπλέον, τα δεδομένα αυτά επιτρέπουν την αξιολόγηση της απόδοσης κάθε μηχανής σε σχέση με συγκεκριμένους λειτουργικούς στόχους διαθεσιμότητας (availability targets) που τίθενται από τη βιομηχανική εγκατάσταση σε μηνιαία και ετήσια βάση. Μέσα από τη σύγκριση της πραγματικής επίδοσης των μηχανών με τους στόχους αυτούς, καθίσταται δυνατό να αξιολογηθεί ο βαθμός στον οποίο οι αστοχίες επηρεάζουν τη συνολική λειτουργική αποδοτικότητα της γραμμής παραγωγής.

Η μεθοδολογική προσέγγιση της εργασίας βασίζεται στην ποσοτική ανάλυση δεδομένων συντήρησης (quantitative maintenance data analysis) με στόχο την αναγνώριση προτύπων αστοχίας (failure patterns) και την κατανόηση της εξέλιξης της αξιοπιστίας του εξοπλισμού μέσα στον χρόνο. Μέσω της διαχρονικής ανάλυσης των δεδομένων επιδιώκεται να διερευνηθεί κατά πόσο οι αστοχίες παρουσιάζουν συγκεκριμένα μοτίβα επαναληπτικότητας, αν συγκεντρώνονται σε συγκεκριμένες λειτουργικές περιοχές και πώς επηρεάζουν τη συνολική διαθεσιμότητα της γραμμής παραγωγής.

Με αυτόν τον τρόπο, η μελέτη εντάσσεται στο ευρύτερο ερευνητικό πλαίσιο της μετάβασης από τις παραδοσιακές πρακτικές συντήρησης προς πιο δεδομενοκεντρικές στρατηγικές συντήρησης (data-driven maintenance strategies). Στο πλαίσιο αυτό, τα ιστορικά δεδομένα συντήρησης δεν αντιμετωπίζονται απλώς ως αρχεία καταγραφής βλαβών, αλλά ως πηγές πληροφορίας για την κατανόηση της δυναμικής λειτουργίας του εξοπλισμού και για την υποστήριξη της σταδιακής μετάβασης προς πρακτικές condition-based και predictive maintenance.

3.2 Περιγραφή Βιομηχανικού Συστήματος και Μελέτης Περίπτωσης (Industrial System and Case Study Description)

Η εμπειρική ανάλυση της παρούσας εργασίας βασίζεται σε δεδομένα που προέρχονται από μια βιομηχανική εγκατάσταση επεξεργασίας αλουμινίου, η οποία λειτουργεί σε περιβάλλον συνεχούς βιομηχανικής παραγωγής (continuous industrial production). Η εγκατάσταση αυτή περιλαμβάνει πολλαπλές μονάδες επεξεργασίας φύλλων και ρολών αλουμινίου, στις οποίες πραγματοποιούνται διεργασίες κοπής, διαμόρφωσης και προετοιμασίας του υλικού (cutting, forming and material preparation processes) πριν από την περαιτέρω χρήση ή μεταποίηση του προϊόντος.

Στο επίκεντρο της παρούσας μελέτης βρίσκονται επτά βασικές μηχανές της παραγωγικής εγκατάστασης, οι οποίες λειτουργούν ως διακριτές γραμμές επεξεργασίας αλουμινίου (independent aluminium processing lines). Οι μηχανές αυτές λειτουργούν ως παράλληλες παραγωγικές μονάδες μέσα στο ίδιο βιομηχανικό περιβάλλον και δεν συνδέονται μεταξύ τους σε μία ενιαία διαδοχική παραγωγική αλυσίδα. Κάθε μηχανή επεξεργάζεται ανεξάρτητα το εισερχόμενο υλικό και μπορεί να παράγει τελικό προϊόν χωρίς να απαιτείται η διαδοχική επεξεργασία του σε άλλη γραμμή.

Οι επτά μηχανές που περιλαμβάνονται στην παρούσα μελέτη είναι οι εξής:

- Georg-1
- Herrvoss-2
- Ungerer-1
- Ungerer-2
- Jagenberg
- Ingersoll – Πριόνι (Ingersoll Saw)
- Stretcher

Οι περισσότερες από τις παραπάνω μηχανές λειτουργούν ως γραμμές διαμήκους κοπής αλουμινίου (aluminium slitting lines), οι οποίες αναλαμβάνουν τη διαμήκη κοπή μεγάλων ρολών αλουμινίου σε επιμέρους ταινίες μικρότερου πλάτους, σύμφωνα με τις τεχνικές προδιαγραφές των τελικών προϊόντων. Η διαδικασία αυτή αποτελεί κρίσιμο

στάδιο της βιομηχανικής επεξεργασίας του υλικού, καθώς απαιτεί υψηλό επίπεδο ακρίβειας, σταθερότητας και συγχρονισμού μεταξύ των επιμέρους μηχανικών και ηλεκτρολογικών υποσυστημάτων κάθε γραμμής.

Κάθε slitting line περιλαμβάνει ένα σύνολο βασικών υποσυστημάτων που συνεργάζονται για τη διαχείριση της κίνησης και της επεξεργασίας του υλικού. Τα σημαντικότερα από αυτά είναι το σύστημα εκτύλιξης ρολού (uncoiler), το οποίο τροφοδοτεί τη γραμμή με το αρχικό ρολό αλουμινίου, το σύστημα κοπής (slitting unit) που πραγματοποιεί τη διαμήκη κοπή του υλικού, καθώς και το σύστημα επανατύλιξης (recoiler) που επανατυλίγει τις κομμένες ταινίες σε νέα ρολά. Σε πολλές από τις γραμμές αυτές ενσωματώνεται επίσης σύστημα εξομάλυνσης τάσεων (tension leveller), το οποίο χρησιμοποιείται για τη βελτίωση της επίπεδης μορφής του φύλλου και τη μείωση εσωτερικών τάσεων στο υλικό πριν ή μετά τη διαδικασία κοπής.

Στην υπό εξέταση εγκατάσταση, οι περισσότερες από τις γραμμές κοπής διαθέτουν τόσο συστήματα recoiler–uncoiler όσο και tension leveller, γεγονός που επιτρέπει τη διαχείριση ενός ευρέος φάσματος προϊόντων και γεωμετρικών χαρακτηριστικών των φύλλων αλουμινίου. Η συνδυασμένη λειτουργία των υποσυστημάτων αυτών δημιουργεί ένα σύνθετο μηχανολογικό περιβάλλον στο οποίο η σταθερότητα της διεργασίας εξαρτάται από τη σωστή ευθυγράμμιση των μηχανικών στοιχείων, τη σταθερότητα της τάσης του υλικού και τη συνεχή λειτουργία των ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων της γραμμής.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον για την παρούσα μελέτη παρουσιάζουν δύο από τις επτά γραμμές επεξεργασίας, οι οποίες αποτελούν κρίσιμα στοιχεία της παραγωγικής λειτουργίας της εγκατάστασης. Οι γραμμές αυτές είναι η Georg-1 και η Herrvoss-2, οι οποίες χαρακτηρίζονται από υψηλή παραγωγική ικανότητα και σημαντική συμβολή στη συνολική δυναμικότητα της μονάδας, ενώ παράλληλα παρουσιάζουν σημαντικές διαφοροποιήσεις ως προς την ηλικία του εξοπλισμού και τα τεχνολογικά χαρακτηριστικά τους.

Η Georg-1 αποτελεί μια σύγχρονη γραμμή κοπής, η οποία εγκαταστάθηκε στη βιομηχανική μονάδα το 2019. Η γραμμή αυτή διαθέτει τα βασικά υποσυστήματα uncoiler, slitting unit και recoiler, ωστόσο δεν περιλαμβάνει σύστημα tension leveller. Παρ' όλα αυτά, η συγκεκριμένη γραμμή θεωρείται ιδιαίτερα κρίσιμη για τη λειτουργία της εγκατάστασης λόγω της υψηλής παραγωγικής της ευελιξίας. Ένα από τα κύρια

τεχνολογικά χαρακτηριστικά της είναι η δυνατότητα εκτέλεσης πολλαπλών διαμήκων κοπών (multiple slitting operations) καθώς και διαφορετικών τύπων ξακρίσματος ακμών (edge trimming operations), γεγονός που επιτρέπει την παραγωγή προϊόντων με διαφορετικά γεωμετρικά χαρακτηριστικά και τεχνικές προδιαγραφές.

Η Georg-1 μπορεί να επεξεργαστεί φύλλα αλουμινίου πάχους από περίπου 0,05 mm έως 3 mm, γεγονός που της επιτρέπει να εξυπηρετεί μεγάλο εύρος παραγωγικών απαιτήσεων. Επιπλέον, η γραμμή μπορεί να διαχειριστεί υλικά διαφορετικών τύπων και πάχους σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα, γεγονός που την καθιστά ιδιαίτερα σημαντική για την παραγωγή προϊόντων υψηλού όγκου και για την ταχεία εναλλαγή μεταξύ διαφορετικών παραγγελιών.

Η δεύτερη κρίσιμη γραμμή της εγκατάστασης είναι η Herrvoss-2, η οποία αποτελεί μια πιο σύνθετη τεχνολογικά εγκατάσταση κοπής και είναι κατασκευής 1990. Σε αντίθεση με την Georg-1, η Herrvoss-2 διαθέτει πλήρη διάταξη επεξεργασίας υλικού, η οποία περιλαμβάνει uncoiler, slitting unit, recoiler και σύστημα tension levelling. Ένα ιδιαίτερο χαρακτηριστικό της συγκεκριμένης γραμμής είναι η ύπαρξη τριών διαφορετικών tension levellers, τα οποία χρησιμοποιούνται ανάλογα με το πάχος του υλικού που επεξεργάζεται η γραμμή. Η διάταξη αυτή επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας εξομάλυνσης του υλικού για διαφορετικές κατηγορίες προϊόντων.

Η Herrvoss-2 έχει τη δυνατότητα επεξεργασίας φύλλων αλουμινίου με πάχος που κυμαίνεται περίπου από 1 mm έως 12 mm, καλύπτοντας έτσι ένα σημαντικό τμήμα της παραγωγής που αφορά παχύτερα και μηχανικά πιο απαιτητικά προϊόντα. Επιπλέον, όπως και η Georg-1, μπορεί να επεξεργαστεί φύλλα αλουμινίου με πλάτος έως περίπου 2,5 μέτρα, γεγονός που υποδηλώνει ότι πρόκειται για εξοπλισμό σχεδιασμένο για επεξεργασία μεγάλων βιομηχανικών ρολών.

Τα αρχικά ρολά αλουμινίου που τροφοδοτούν τις γραμμές αυτές μπορούν να έχουν ιδιαίτερα μεγάλο μήκος, το οποίο σε ορισμένες περιπτώσεις φτάνει τα 12 έως 15 χιλιόμετρα υλικού. Η διαχείριση τόσο μεγάλων μηκών υλικού δημιουργεί αυξημένες απαιτήσεις για τη σταθερότητα της διεργασίας, καθώς οποιαδήποτε διακοπή λειτουργίας μιας μηχανής μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την παραγωγική απόδοση της αντίστοιχης μονάδας και να δημιουργήσει αυξημένες ανάγκες επανεκκίνησης του εξοπλισμού.

Η πολυπλοκότητα των slitting lines, σε συνδυασμό με το μεγάλο μήκος των ρολών και τη συνεχή λειτουργία των μηχανών, καθιστά τη συντήρηση του εξοπλισμού

κρίσιμο παράγοντα για τη διατήρηση της παραγωγικής σταθερότητας. Οι μηχανικές και ηλεκτρολογικές αστοχίες που εμφανίζονται κατά τη διάρκεια της λειτουργίας κάθε γραμμής μπορούν να οδηγήσουν σε απρογραμμάτιστο χρόνο διακοπής λειτουργίας (unplanned downtime), επηρεάζοντας τόσο την παραγωγική δυναμικότητα όσο και την αξιοπιστία της εγκατάστασης.

Για τον λόγο αυτό, η παρούσα εργασία εστιάζει ιδιαίτερα στην ανάλυση των δεδομένων συντήρησης των μηχανών αυτών, με στόχο την κατανόηση των προτύπων αστοχίας και την αξιολόγηση της λειτουργικής επίδοσης του εξοπλισμού μέσα στον χρόνο. Μέσω της ανάλυσης των ιστορικών δεδομένων βλαβών και των χρόνων αποκατάστασης, επιχειρείται να διερευνηθεί ο τρόπος με τον οποίο οι αστοχίες κατανέμονται μεταξύ των διαφορετικών μηχανών της εγκατάστασης, καθώς και ο βαθμός στον οποίο συγκεκριμένες γραμμές παρουσιάζουν μεγαλύτερη λειτουργική ευπάθεια σε σχέση με άλλες.

3.3 Περιγραφή Δεδομένων και Δομής Dataset (Data Description and Dataset Structure)

Η εμπειρική ανάλυση της παρούσας εργασίας βασίζεται σε ιστορικά δεδομένα συντήρησης που προέρχονται από το πληροφοριακό σύστημα καταγραφής βλαβών και καθυστερήσεων της βιομηχανικής εγκατάστασης. Τα δεδομένα αυτά αφορούν την περίοδο 2022–2025 και περιλαμβάνουν καταγραφές απρογραμμάτιστων διακοπών λειτουργίας εξοπλισμού (*unplanned downtime events*) για επτά βασικές μηχανές επεξεργασίας αλουμινίου.

Το σύνολο των δεδομένων οργανώνεται σε αρχεία υπολογιστικών φύλλων (*spreadsheet datasets*) και περιλαμβάνει τόσο αναλυτικές καταγραφές βλαβών όσο και συγκεντρωτικές αναφορές λειτουργικής επίδοσης ανά μηχανή και ανά χρονική περίοδο. Η δομή των δεδομένων επιτρέπει την ανάλυση της αξιοπιστίας του εξοπλισμού σε πολλαπλά επίπεδα, συμπεριλαμβανομένης της συχνότητας εμφάνισης αστοχιών, της διάρκειας των διακοπών λειτουργίας και της κατανομής των τεχνικών αιτιών βλάβης.

Το dataset καλύπτει τις επτά βασικές μηχανές της εγκατάστασης που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο:

- Georg-1
- Herrvoss-2
- Ungerer-1
- Ungerer-2
- Jagenberg
- Ingersoll – Πριόνι (Ingersoll Saw)
- Stretcher

Για τις μηχανές αυτές καταγράφονται γεγονότα αστοχίας (*failure events*) τα οποία οδηγούν σε απρογραμμάτιστο χρόνο διακοπής λειτουργίας (*unplanned downtime*). Κάθε καταγραφή αντιστοιχεί σε ένα τεχνικό συμβάν που επηρεάζει τη λειτουργία της μηχανής και απαιτεί παρέμβαση συντήρησης για την αποκατάσταση της κανονικής λειτουργίας του εξοπλισμού.

Τα δεδομένα περιλαμβάνουν βασικές πληροφορίες για κάθε συμβάν, όπως:

- η ημερομηνία εμφάνισης της βλάβης
- η διάρκεια της διακοπής λειτουργίας
- ο χρόνος αποκατάστασης του εξοπλισμού
- η τεχνική φύση της βλάβης, η οποία κατηγοριοποιείται σε μηχανολογικές αστοχίες (mechanical failures) και ηλεκτρολογικές ή ηλεκτρονικές αστοχίες (electrical / electronic failures).

Η καταγραφή αυτή επιτρέπει τον διαχωρισμό των βλαβών ανά τεχνολογικό πεδίο και την ανάλυση της συνεισφοράς διαφορετικών κατηγοριών αστοχίας στο συνολικό downtime της εγκατάστασης.

Εκτός από τις αναλυτικές καταγραφές συμβάντων, τα δεδομένα περιλαμβάνουν και μηνιαίες συγκεντρωτικές αναφορές λειτουργικής επίδοσης για το σύνολο των μηχανών. Στις αναφορές αυτές αποτυπώνεται ο συνολικός χρόνος καθυστέρησης που προκλήθηκε από βλάβες κατά τη διάρκεια κάθε μήνα, καθώς και η σύγκριση της πραγματικής επίδοσης με προκαθορισμένους στόχους λειτουργικής απόδοσης (performance targets) που έχουν τεθεί από τη διοίκηση της παραγωγής.

Η ύπαρξη αυτών των στόχων επιτρέπει την αξιολόγηση της λειτουργικής συμπεριφοράς κάθε μηχανής όχι μόνο σε απόλυτους όρους downtime, αλλά και σε σχέση με το αποδεκτό επίπεδο καθυστερήσεων που θεωρείται συμβατό με τη συνολική παραγωγική στρατηγική της μονάδας.

Ιδιαίτερη σημασία για την ανάλυση της παρούσας εργασίας έχουν οι δύο βασικές γραμμές επεξεργασίας που παρουσιάστηκαν στο προηγούμενο υποκεφάλαιο, δηλαδή η Georg-1 και η Herrvoss-2. Για τις συγκεκριμένες μηχανές διατίθενται πιο αναλυτικά δεδομένα συντήρησης, τα οποία περιλαμβάνουν Pareto αναλύσεις βλαβών, καθώς και υπολογισμούς βασικών δεικτών αξιοπιστίας, όπως:

- MTBF (Mean Time Between Failures) – μέσος χρόνος μεταξύ διαδοχικών αστοχιών
- MTTR (Mean Time To Repair) – μέσος χρόνος αποκατάστασης μετά από αστοχία.

Οι δείκτες αυτοί αποτελούν θεμελιώδη εργαλεία στη βιομηχανική ανάλυση αξιοπιστίας (*reliability analysis*), καθώς επιτρέπουν την ποσοτική αποτίμηση τόσο της συχνότητας εμφάνισης των βλαβών όσο και της αποτελεσματικότητας των διαδικασιών συντήρησης.

Η χρήση Pareto αναλύσεων (Pareto failure analysis) για τις μηχανές Georg-1 και Herrvoss-2 επιτρέπει την αναγνώριση των σημαντικότερων κατηγοριών βλάβης που συμβάλλουν στο μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού downtime. Η προσέγγιση αυτή βασίζεται στην αρχή ότι ένα σχετικά μικρό ποσοστό αιτίων αστοχίας ευθύνεται για το μεγαλύτερο ποσοστό των διακοπών λειτουργίας, γεγονός που επιτρέπει την ιεράρχηση των τεχνικών παρεμβάσεων συντήρησης.

Συνολικά, η δομή του dataset επιτρέπει την ανάλυση των δεδομένων σε πολλαπλές διαστάσεις:

- χρονική διάσταση (temporal analysis), μέσω της παρακολούθησης των βλαβών ανά μήνα και ανά έτος
- λειτουργική διάσταση (machine-level analysis), μέσω της σύγκρισης της συμπεριφοράς διαφορετικών μηχανών
- τεχνική διάσταση (failure type analysis), μέσω του διαχωρισμού μηχανολογικών και ηλεκτρολογικών αστοχιών
- αναλυτική αξιοπιστία εξοπλισμού (reliability metrics analysis), μέσω δεικτών όπως MTBF και MTTR.

Η ύπαρξη δεδομένων για περίοδο τεσσάρων ετών επιτρέπει επίσης τη διερεύνηση διαχρονικών τάσεων λειτουργικής επίδοσης (longitudinal performance trends), καθώς και την παρατήρηση πιθανών αλλαγών στη συμπεριφορά του εξοπλισμού που μπορεί να συνδέονται με πρακτικές συντήρησης, τεχνικές βελτιώσεις ή μεταβολές στη χρήση των μηχανών.

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, τα δεδομένα αυτά αξιοποιούνται για την κατανόηση των προτύπων αστοχίας του εξοπλισμού (*failure patterns*) και για την αξιολόγηση της λειτουργικής αξιοπιστίας των βασικών μηχανών της εγκατάστασης. Μέσω της συνδυαστικής ανάλυσης downtime, δεικτών αξιοπιστίας και Pareto κατανομών, επιχειρείται να αναδειχθούν τα κρίσιμα σημεία του εξοπλισμού στα οποία η

συντήρηση μπορεί να έχει τη μεγαλύτερη επίδραση στη βελτίωση της παραγωγικής σταθερότητας.

3.4 Μεθοδολογία Ανάλυσης Δεδομένων (Analytical Methodology)

Η μεθοδολογία που εφαρμόζεται στην παρούσα εργασία βασίζεται σε μια ολοκληρωμένη διαδικασία ανάλυσης ιστορικών δεδομένων συντήρησης, με στόχο την κατανόηση της λειτουργικής συμπεριφοράς του βιομηχανικού εξοπλισμού και την αναγνώριση των προτύπων αστοχίας που επηρεάζουν τη σταθερότητα της παραγωγικής διαδικασίας. Η ανάλυση επικεντρώνεται στα δεδομένα βλαβών και καθυστερήσεων που έχουν καταγραφεί για τις επτά βασικές μηχανές της εγκατάστασης κατά την περίοδο 2022–2025 και αξιοποιεί καθιερωμένες τεχνικές της βιομηχανικής αξιοπιστίας, της στατιστικής ανάλυσης συντήρησης και της διερεύνησης failure patterns.

Η προσέγγιση που ακολουθείται δεν περιορίζεται στην απλή καταγραφή του χρόνου διακοπής λειτουργίας των μηχανών, αλλά επιχειρεί να εξετάσει τη λειτουργική συμπεριφορά του εξοπλισμού ως δυναμικό σύστημα τεχνικών συμβάντων που εξελίσσονται στον χρόνο. Με τον τρόπο αυτό, η ανάλυση μετατοπίζεται από μια απλή περιγραφική αποτύπωση των βλαβών προς μια πιο ερμηνευτική προσέγγιση, η οποία επιδιώκει να αναδείξει τη σχέση μεταξύ της συχνότητας εμφάνισης αστοχιών, της διάρκειας των επεμβάσεων συντήρησης και της συνολικής λειτουργικής αξιοπιστίας των μηχανών.

Η πρώτη διάσταση της μεθοδολογίας αφορά την ανάλυση του χρόνου διακοπής λειτουργίας του εξοπλισμού, δηλαδή του συνολικού χρόνου κατά τον οποίο οι μηχανές δεν ήταν διαθέσιμες για παραγωγή λόγω απρογραμμάτιστων τεχνικών συμβάντων. Τα δεδομένα downtime αποτελούν ένα από τα βασικότερα μεγέθη αξιολόγησης της λειτουργικής επίδοσης ενός βιομηχανικού συστήματος, καθώς αποτυπώνουν άμεσα την επίδραση των τεχνικών αστοχιών στην παραγωγική διαδικασία. Στην παρούσα εργασία, ο χρόνος διακοπής λειτουργίας υπολογίζεται για κάθε μηχανή τόσο σε μηνιαία όσο και σε ετήσια βάση, επιτρέποντας την παρακολούθηση των μεταβολών της λειτουργικής επίδοσης κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης χρονικής περιόδου. Η σύγκριση των τιμών downtime μεταξύ διαφορετικών μηχανών παρέχει τη δυνατότητα εντοπισμού εξοπλισμού

με αυξημένη λειτουργική ευπάθεια, ενώ παράλληλα επιτρέπει την αξιολόγηση της πραγματικής λειτουργικής επίδοσης σε σχέση με τους στόχους καθυστερήσεων που έχουν τεθεί από τη διοίκηση παραγωγής.

Παράλληλα με την ανάλυση downtime, ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στην αξιολόγηση βασικών δεικτών αξιοπιστίας του εξοπλισμού. Στη βιομηχανική μηχανική συντήρησης, η αξιοπιστία ενός μηχανικού συστήματος δεν αποτυπώνεται μόνο μέσω της συνολικής διάρκειας των διακοπών λειτουργίας, αλλά και μέσω της σχέσης μεταξύ της συχνότητας εμφάνισης αστοχιών και του χρόνου που απαιτείται για την αποκατάστασή τους. Για τον λόγο αυτό, η παρούσα μελέτη αξιοποιεί δύο από τους πλέον καθιερωμένους δείκτες αξιοπιστίας: τον δείκτη Mean Time Between Failures (MTBF) και τον δείκτη Mean Time To Repair (MTTR).

Ο δείκτης MTBF εκφράζει τον μέσο χρόνο λειτουργίας ενός εξοπλισμού μεταξύ δύο διαδοχικών αστοχιών και αποτελεί βασικό μέτρο αξιολόγησης της αξιοπιστίας του συστήματος. Όσο μεγαλύτερη είναι η τιμή του MTBF, τόσο μεγαλύτερα είναι τα χρονικά διαστήματα απρόσκοπτης λειτουργίας της μηχανής, γεγονός που υποδηλώνει υψηλότερο επίπεδο τεχνικής σταθερότητας. Αντίθετα, χαμηλές τιμές MTBF υποδηλώνουν ότι οι αστοχίες εμφανίζονται συχνότερα, γεγονός που μπορεί να σχετίζεται είτε με αυξημένη φθορά εξοπλισμού είτε με ανεπαρκή προληπτική συντήρηση.

Ο δείκτης MTTR, από την άλλη πλευρά, εκφράζει τον μέσο χρόνο που απαιτείται για την αποκατάσταση μιας αστοχίας και την επαναφορά του εξοπλισμού σε πλήρη λειτουργία. Η τιμή του δείκτη αυτού αντανακλά την αποτελεσματικότητα των διαδικασιών συντήρησης και την οργανωτική ικανότητα της τεχνικής ομάδας να αντιμετωπίζει τεχνικά προβλήματα με ταχύτητα και ακρίβεια. Σε ένα βιομηχανικό περιβάλλον συνεχούς παραγωγής, η μείωση του MTTR αποτελεί κρίσιμο στόχο, καθώς συμβάλλει άμεσα στη μείωση του συνολικού downtime και στη βελτίωση της διαθεσιμότητας του εξοπλισμού.

Στην παρούσα εργασία οι δείκτες MTBF και MTTR υπολογίζονται κυρίως για τις δύο βασικές μηχανές της εγκατάστασης, την Georg-1 και την Herrvoss-2, για τις οποίες διατίθενται πιο αναλυτικά δεδομένα συντήρησης και καταγραφής βλαβών. Η επιλογή αυτή επιτρέπει μια πιο λεπτομερή διερεύνηση της λειτουργικής συμπεριφοράς των συγκεκριμένων μηχανών, οι οποίες αποτελούν κρίσιμα στοιχεία της παραγωγικής δυναμικότητας της μονάδας.

Ένα επιπλέον επίπεδο ανάλυσης αφορά την κατηγοριοποίηση των τεχνικών αστοχιών που εμφανίζονται στις μηχανές της εγκατάστασης. Η καταγραφή των βλαβών επιτρέπει τον διαχωρισμό των τεχνικών συμβάντων σε δύο βασικές κατηγορίες: μηχανολογικές αστοχίες και ηλεκτρολογικές ή ηλεκτρονικές αστοχίες. Ο διαχωρισμός αυτός είναι ιδιαίτερα σημαντικός για την ερμηνεία των δεδομένων συντήρησης, καθώς επιτρέπει τη διερεύνηση του κατά πόσο οι καθυστερήσεις στην παραγωγή προκύπτουν κυρίως από μηχανικές φθορές του εξοπλισμού ή από προβλήματα που σχετίζονται με τα συστήματα αυτοματισμού και ελέγχου. Η ανάλυση αυτή συμβάλλει επίσης στην καλύτερη κατανόηση των τεχνολογικών αδυναμιών του συστήματος και παρέχει χρήσιμες πληροφορίες για τον σχεδιασμό στοχευμένων παρεμβάσεων συντήρησης.

Ιδιαίτερη σημασία για την κατανόηση των προτύπων αστοχίας έχει και η εφαρμογή ανάλυσης Pareto για τις μηχανές Georg-1 και Herrvoss-2. Η ανάλυση Pareto αποτελεί ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο εργαλείο στη βιομηχανική συντήρηση, καθώς επιτρέπει την ιεράρχηση των αιτίων αστοχίας με βάση τη συχνότητα εμφάνισής τους ή τη συνεισφορά τους στο συνολικό downtime. Μέσω της κατασκευής διαγραμμάτων Pareto καθίσταται δυνατή η αναγνώριση των λίγων εκείνων τεχνικών προβλημάτων που ευθύνονται για το μεγαλύτερο μέρος των καθυστερήσεων, γεγονός που επιτρέπει την εστίαση των προσπαθειών συντήρησης στα πιο κρίσιμα σημεία του εξοπλισμού.

Τέλος, η μεθοδολογία περιλαμβάνει και διαχρονική ανάλυση της λειτουργικής συμπεριφοράς των μηχανών κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου. Η ύπαρξη δεδομένων για τέσσερα διαδοχικά έτη επιτρέπει την παρακολούθηση των μεταβολών στη λειτουργική επίδοση του εξοπλισμού και την αναγνώριση πιθανών τάσεων βελτίωσης ή επιδείνωσης της αξιοπιστίας. Μέσω της σύγκρισης των δεδομένων μεταξύ διαφορετικών ετών καθίσταται δυνατό να διερευνηθεί κατά πόσο οι πρακτικές συντήρησης και οι τεχνικές παρεμβάσεις που εφαρμόζονται στην εγκατάσταση συμβάλλουν στη σταδιακή σταθεροποίηση της λειτουργίας των μηχανών.

Η συνδυαστική εφαρμογή των παραπάνω αναλυτικών προσεγγίσεων επιτρέπει τη δημιουργία μιας ολοκληρωμένης εικόνας της λειτουργικής συμπεριφοράς του εξοπλισμού και παρέχει τη μεθοδολογική βάση για την παρουσίαση και ερμηνεία των αποτελεσμάτων στο επόμενο κεφάλαιο της εργασίας.

4. Ανάλυση Αποτελεσμάτων (Results and Empirical Analysis)

Η παρούσα ενότητα παρουσιάζει τα αποτελέσματα της εμπειρικής ανάλυσης των δεδομένων συντήρησης που συλλέχθηκαν από τη βιομηχανική εγκατάσταση επεξεργασίας αλουμινίου. Η ανάλυση βασίζεται στα ιστορικά δεδομένα απρογραμμάτιστων διακοπών λειτουργίας των μηχανών για την περίοδο 2022–2025 και αποσκοπεί στην κατανόηση της λειτουργικής συμπεριφοράς του εξοπλισμού, καθώς και στον εντοπισμό προτύπων αστοχίας που επηρεάζουν την παραγωγική σταθερότητα της εγκατάστασης.

Η παρουσίαση των αποτελεσμάτων ακολουθεί μια διαδοχική αναλυτική προσέγγιση. Αρχικά εξετάζεται η συνολική κατανομή των καθυστερήσεων μεταξύ των μηχανών της εγκατάστασης, ώστε να αποτυπωθεί η σχετική συμβολή κάθε μηχανής στο συνολικό downtime της παραγωγής. Στη συνέχεια πραγματοποιείται διαχρονική ανάλυση της εξέλιξης των καθυστερήσεων κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης, με στόχο την αναγνώριση πιθανών τάσεων μεταβολής της λειτουργικής επίδοσης. Ακολούθως, η ανάλυση εστιάζει στις δύο βασικές γραμμές επεξεργασίας της εγκατάστασης, την Georg-1 και την Herrvoss-2, για τις οποίες διατίθενται πιο αναλυτικά δεδομένα συντήρησης. Τέλος, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της ανάλυσης Pareto των αστοχιών, καθώς και η αξιολόγηση των δεικτών αξιοπιστίας MTBF και MTTR.

Με τον τρόπο αυτό, το κεφάλαιο επιχειρεί να συνδέσει τα ποσοτικά δεδομένα των βλαβών με τη λειτουργική συμπεριφορά του εξοπλισμού και να αναδείξει τα κρίσιμα σημεία στα οποία η στρατηγική συντήρησης μπορεί να συμβάλει στη βελτίωση της παραγωγικής σταθερότητας.

4.1 Συνολική Κατανομή Καθυστερήσεων μεταξύ Μηχανών (Downtime Distribution Across Machines)

Το πρώτο στάδιο της ανάλυσης επικεντρώνεται στη συνολική κατανομή του χρόνου καθυστέρησης μεταξύ των επτά μηχανών της εγκατάστασης. Η διερεύνηση αυτή επιτρέπει την αποτύπωση της σχετικής συνεισφοράς κάθε μηχανής στο συνολικό downtime της παραγωγής και παρέχει μια πρώτη ένδειξη για το ποιες μονάδες εξοπλισμού παρουσιάζουν αυξημένη λειτουργική επιβάρυνση.

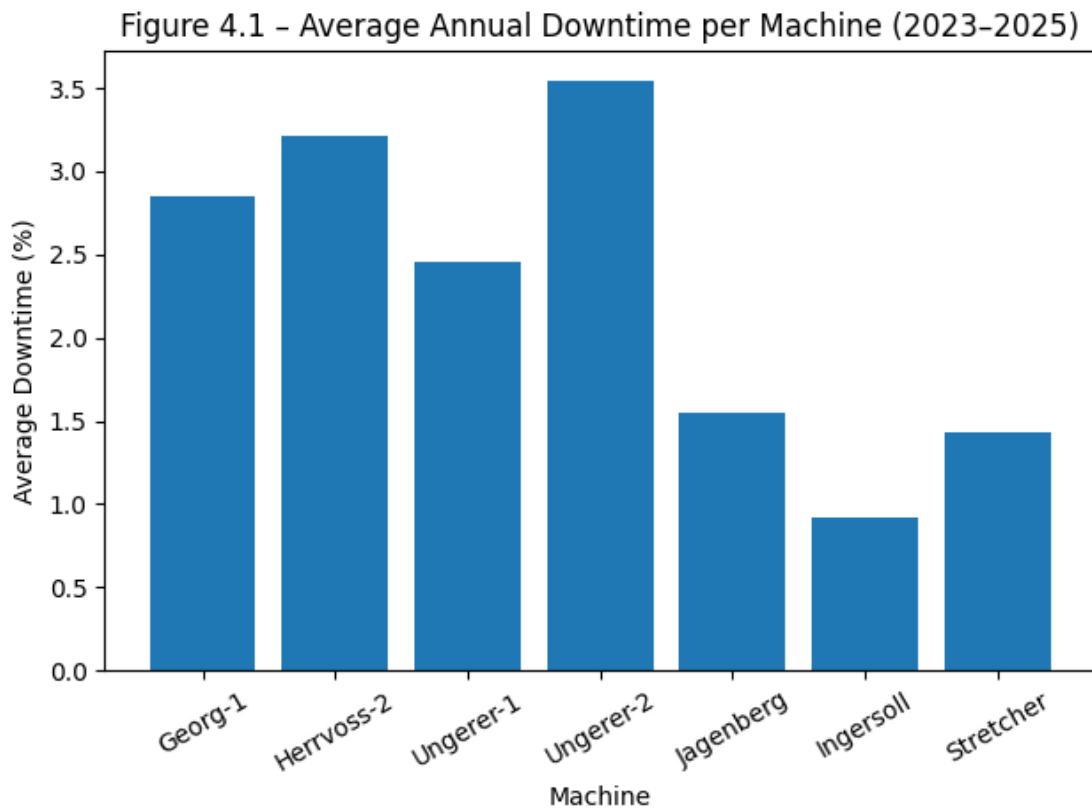
Η επεξεργασία των δεδομένων δείχνει ότι οι καθυστερήσεις δεν κατανέμονται ομοιόμορφα μεταξύ των μηχανών. Ορισμένες μονάδες παρουσιάζουν σημαντικά υψηλότερο αριθμό συμβάντων αστοχίας ή μεγαλύτερη διάρκεια διακοπών λειτουργίας σε σχέση με άλλες. Η διαφοροποίηση αυτή μπορεί να αποδοθεί σε πολλούς παράγοντες, όπως η ηλικία του εξοπλισμού, η πολυπλοκότητα της τεχνολογικής διάταξης της μηχανής, το εύρος των προϊόντων που επεξεργάζεται ή η ένταση της χρήσης της στο πλαίσιο της παραγωγικής διαδικασίας.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σύγκριση μεταξύ παλαιότερων και νεότερων μηχανών της εγκατάστασης. Η ύπαρξη εξοπλισμού διαφορετικών τεχνολογικών γενεών δημιουργεί ένα ενδιαφέρον πεδίο ανάλυσης, καθώς επιτρέπει την αξιολόγηση της επίδρασης της ηλικίας του εξοπλισμού στη συχνότητα εμφάνισης αστοχιών και στη διάρκεια των επεμβάσεων συντήρησης. Στην περίπτωση της παρούσας εγκατάστασης, η Herrvoss-2 αποτελεί ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα παλαιότερου εξοπλισμού, ενώ η Georg-1 αντιπροσωπεύει μια πιο σύγχρονη τεχνολογική λύση.

Η ανάλυση της συνολικής κατανομής των καθυστερήσεων παρουσιάζεται μέσω συγκεντρωτικών γραφημάτων downtime, στα οποία αποτυπώνεται ο συνολικός χρόνος καθυστέρησης που αποδίδεται σε κάθε μηχανή κατά την περίοδο μελέτης. Τα γραφήματα αυτά επιτρέπουν τη γρήγορη οπτική σύγκριση των επιπέδων λειτουργικής σταθερότητας μεταξύ των διαφορετικών μονάδων εξοπλισμού.

Η σύγκριση των μηχανών σε επίπεδο συνολικού downtime αποτελεί το πρώτο βήμα για την κατανόηση της λειτουργικής συμπεριφοράς της εγκατάστασης. Ωστόσο, η ανάλυση αυτή δεν επαρκεί από μόνη της για την πλήρη ερμηνεία των δεδομένων. Για τον λόγο αυτό, στο επόμενο υποκεφάλαιο εξετάζεται η διαχρονική εξέλιξη των

καθυστερήσεων, με στόχο την αναγνώριση πιθανών μεταβολών στη λειτουργική επίδοση των μηχανών κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου.



Σχήμα 4.1 – Average annual downtime percentage per machine during the period 2023–2025

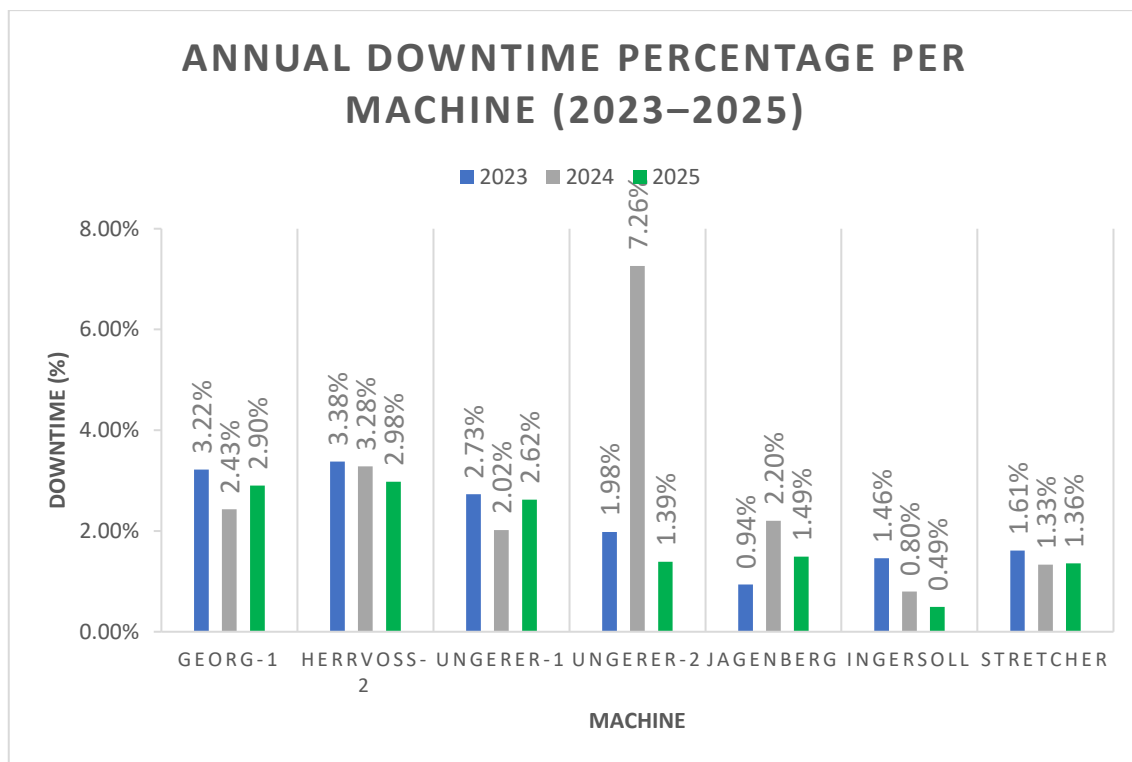
Η κατανομή του μέσου ετήσιου ποσοστού downtime ανά μηχανή για την περίοδο 2023–2025 παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.1. Από την ανάλυση προκύπτει ότι ορισμένες μηχανές παρουσιάζουν σημαντικά υψηλότερα επίπεδα διακοπών λειτουργίας σε σχέση με άλλες. Συγκεκριμένα, οι γραμμές Ungerer-2, Herrvoss-2 και Georg-1 εμφανίζουν τα υψηλότερα ποσοστά downtime, γεγονός που υποδηλώνει αυξημένες απαιτήσεις συντήρησης ή υψηλότερη ένταση χρήσης του εξοπλισμού. Αντίθετα, μηχανές όπως η Ingersoll και η Stretcher παρουσιάζουν σημαντικά χαμηλότερα ποσοστά διακοπών λειτουργίας, γεγονός που υποδηλώνει μεγαλύτερη λειτουργική σταθερότητα κατά την εξεταζόμενη περίοδο.

Η ανάλυση αυτή παρέχει μια πρώτη συνολική εικόνα της κατανομής των βλαβών στο σύνολο του εξοπλισμού της εγκατάστασης και επιτρέπει τον εντοπισμό των μηχανών στις οποίες συγκεντρώνεται το μεγαλύτερο μέρος των τεχνικών παρεμβάσεων συντήρησης. Η παρατήρηση αυτή δικαιολογεί την περαιτέρω διερεύνηση συγκεκριμένων γραμμών παραγωγής, όπως οι Georg-1 και Herrvoss-2, οι οποίες αναλύονται εκτενέστερα στα επόμενα υποκεφάλαια.

4.2 Χρονική Εξέλιξη των Καθυστερήσεων Λειτουργίας (Temporal Evolution of Downtime)

Η ανάλυση της χρονικής εξέλιξης των καθυστερήσεων λειτουργίας αποτελεί ένα κρίσιμο βήμα για την κατανόηση της συμπεριφοράς του παραγωγικού εξοπλισμού σε βάθος χρόνου. Ενώ η κατανομή των βλαβών μεταξύ των μηχανών παρέχει μια στιγμιαία εικόνα της λειτουργικής κατάστασης του συστήματος, η διαχρονική ανάλυση επιτρέπει την αναγνώριση τάσεων που σχετίζονται με την αξιοπιστία του εξοπλισμού, την αποτελεσματικότητα των πρακτικών συντήρησης και την επίδραση των λειτουργικών συνθηκών στη σταθερότητα της παραγωγικής διαδικασίας.

Για την καλύτερη αποτύπωση της χρονικής εξέλιξης των καθυστερήσεων λειτουργίας, παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2 το ετήσιο ποσοστό downtime ανά μηχανή για την περίοδο 2023–2025. Η οπτικοποίηση αυτή επιτρέπει τη συγκριτική αξιολόγηση των επτά βασικών μηχανών της εγκατάστασης και διευκολύνει την αναγνώριση διαφοροποιήσεων ως προς τη λειτουργική τους σταθερότητα.



Σχήμα 4.2 – Annual Downtime Percentage per Machine (2023–2025)

Όπως φαίνεται στο Σχήμα 4.2, οι μηχανές Georg-1 και Herrvoss-2 παρουσιάζουν διαχρονικά σχετικά υψηλά ποσοστά downtime, γεγονός που επιβεβαιώνει τη σημασία τους για την παρούσα ανάλυση. Παράλληλα, η Ungerer-2 εμφανίζει έντονη απόκλιση το 2024, με σαφώς υψηλότερο ποσοστό downtime σε σχέση με τα έτη 2023 και 2025, στοιχείο που υποδηλώνει περίοδο αυξημένης λειτουργικής αστάθειας. Αντίθετα, οι μηχανές Ingersoll και Stretcher παρουσιάζουν χαμηλότερα και σχετικά σταθερά επίπεδα downtime, γεγονός που παραπέμπει σε συγκριτικά υψηλότερη λειτουργική σταθερότητα κατά την εξεταζόμενη περίοδο.

Στην παρούσα μελέτη εξετάστηκε η εξέλιξη των καθυστερήσεων λειτουργίας για την περίοδο 2023–2025, χρησιμοποιώντας ως βασικό δείκτη τον συνολικό λόγο καθυστερήσεων (downtime ratio), ο οποίος υπολογίζεται ως το ποσοστό του χρόνου λειτουργίας που επηρεάζεται από μηχανολογικές και ηλεκτρολογικές βλάβες. Ο δείκτης αυτός παρέχει μια συνοπτική αλλά ιδιαίτερα χρήσιμη εικόνα της συνολικής λειτουργικής επίδοσης του εξοπλισμού, καθώς συνδυάζει τη συχνότητα εμφάνισης βλαβών με τη διάρκεια των παρεμβάσεων συντήρησης.

Η διαχρονική εξέταση των δεδομένων συντήρησης αποκαλύπτει ότι η λειτουργική συμπεριφορά του εξοπλισμού δεν παραμένει σταθερή κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου. Αντίθετα, παρατηρούνται διακυμάνσεις στους δείκτες downtime, οι οποίες αντανακλούν μεταβολές στις συνθήκες λειτουργίας του εξοπλισμού, στην ένταση χρήσης των μηχανών και στις πρακτικές συντήρησης που εφαρμόζονται στη μονάδα.

Σε βιομηχανικά περιβάλλοντα συνεχούς παραγωγής, τέτοιου είδους διακυμάνσεις θεωρούνται αναμενόμενες, καθώς η λειτουργική κατάσταση των μηχανών επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες, όπως η φθορά των μηχανικών εξαρτημάτων, οι μεταβολές στα φορτία λειτουργίας, οι αλλαγές στο παραγωγικό πρόγραμμα και οι τεχνικές παρεμβάσεις που πραγματοποιούνται κατά τη διάρκεια προγραμματισμένων συντηρήσεων. Η σταδιακή φθορά των εξαρτημάτων, σε συνδυασμό με την ένταση λειτουργίας του εξοπλισμού, μπορεί να οδηγήσει σε περιόδους αυξημένης πιθανότητας εμφάνισης αστοχιών, οι οποίες αντανακλώνται σε υψηλότερους δείκτες downtime.

Παράλληλα, η διαχρονική ανάλυση μπορεί να αποκαλύψει περιόδους βελτίωσης της λειτουργικής επίδοσης του εξοπλισμού, οι οποίες συνδέονται συχνά με την εφαρμογή πιο αποτελεσματικών στρατηγικών συντήρησης ή με την αντικατάσταση κρίσιμων εξαρτημάτων. Σε τέτοιες περιπτώσεις, η μείωση του downtime αποτελεί ένδειξη ότι οι τεχνικές παρεμβάσεις που πραγματοποιήθηκαν είχαν θετική επίδραση στην αξιοπιστία του συστήματος.

Η εξέταση των δεδομένων της συγκεκριμένης βιομηχανικής εγκατάστασης δείχνει ότι η εξέλιξη των δεικτών downtime δεν ακολουθεί μια αυστηρά γραμμική πορεία. Αντίθετα, παρουσιάζει διακυμάνσεις μεταξύ των διαφορετικών ετών της εξεταζόμενης περιόδου. Οι μεταβολές αυτές μπορούν να ερμηνευθούν ως αποτέλεσμα τόσο των λειτουργικών συνθηκών της παραγωγής όσο και των τεχνικών παρεμβάσεων που πραγματοποιήθηκαν στον εξοπλισμό κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης.

Η κατανόηση των τάσεων αυτών είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον σχεδιασμό αποτελεσματικών στρατηγικών συντήρησης. Μέσω της διαχρονικής ανάλυσης των δεδομένων downtime, οι τεχνικές ομάδες μπορούν να εντοπίσουν περιόδους αυξημένης πιθανότητας εμφάνισης βλαβών, να αξιολογήσουν την αποτελεσματικότητα των παρεμβάσεων συντήρησης και να προσαρμόσουν τις πρακτικές διαχείρισης του

εξοπλισμού με στόχο τη βελτίωση της συνολικής αξιοπιστίας του παραγωγικού συστήματος.

Επιπλέον, η διαχρονική παρακολούθηση των δεικτών λειτουργικής επίδοσης επιτρέπει την ανάπτυξη πιο προληπτικών προσεγγίσεων στη συντήρηση. Όταν οι τάσεις των δεδομένων δείχνουν σταδιακή αύξηση των καθυστερήσεων λειτουργίας, οι υπεύθυνοι συντήρησης μπορούν να παρέμβουν πριν η κατάσταση εξελιχθεί σε σοβαρό λειτουργικό πρόβλημα. Με τον τρόπο αυτό, η ανάλυση των δεδομένων downtime μετατρέπεται από ένα απλό εργαλείο καταγραφής βλαβών σε ένα δυναμικό εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων για τη διαχείριση της αξιοπιστίας του εξοπλισμού.

Στο επόμενο στάδιο της ανάλυσης εξετάζεται η τεχνική φύση των βλαβών που εμφανίζονται στον εξοπλισμό της εγκατάστασης. Συγκεκριμένα, οι αστοχίες κατηγοριοποιούνται σε μηχανολογικές και ηλεκτρολογικές/ηλεκτρονικές βλάβες, προκειμένου να διερευνηθεί ποιοι τύποι τεχνικών προβλημάτων συμβάλλουν περισσότερο στις καθυστερήσεις λειτουργίας του παραγωγικού συστήματος.

4.3 Ανάλυση Τύπων Βλαβών (Failure Type Analysis)

Η ανάλυση της τεχνικής φύσης των βλαβών αποτελεί ένα σημαντικό στάδιο στην αξιολόγηση της αξιοπιστίας του παραγωγικού εξοπλισμού. Ενώ η συνολική καταγραφή του downtime επιτρέπει την ποσοτική εκτίμηση της λειτουργικής επίδοσης των μηχανών, η κατηγοριοποίηση των αστοχιών σε επιμέρους τεχνικές κατηγορίες επιτρέπει την κατανόηση των μηχανισμών που οδηγούν στις διακοπές λειτουργίας. Με τον τρόπο αυτό, η ανάλυση των δεδομένων συντήρησης μεταβαίνει από μια απλή περιγραφική προσέγγιση σε μια πιο ερμηνευτική ανάλυση της συμπεριφοράς του εξοπλισμού.

Στην παρούσα μελέτη οι καταγεγραμμένες βλάβες κατηγοριοποιήθηκαν σε δύο βασικές τεχνικές κατηγορίες: μηχανολογικές βλάβες (mechanical failures) και ηλεκτρολογικές ή ηλεκτρονικές βλάβες (electrical and electronic failures). Η διάκριση αυτή είναι ιδιαίτερα διαδεδομένη στη βιομηχανική πρακτική, καθώς αντανακλά τις δύο κύριες κατηγορίες τεχνικών προβλημάτων που εμφανίζονται στον σύγχρονο βιομηχανικό εξοπλισμό.

Οι μηχανολογικές βλάβες σχετίζονται κυρίως με τη φθορά μηχανικών εξαρτημάτων, όπως έδρανα, άξονες, συστήματα μετάδοσης κίνησης, μηχανισμούς κοπής και στοιχεία ευθυγράμμισης της γραμμής. Σε γραμμές επεξεργασίας μετάλλων, όπως οι *slitting lines* που εξετάζονται στην παρούσα εργασία, τα μηχανικά φορτία που αναπτύσσονται κατά τη διάρκεια της επεξεργασίας του υλικού είναι ιδιαίτερα υψηλά. Η συνεχής λειτουργία των μηχανών υπό τέτοιες συνθήκες οδηγεί αναπόφευκτα σε φθορά των εξαρτημάτων και σε αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης μηχανολογικών αστοχιών.

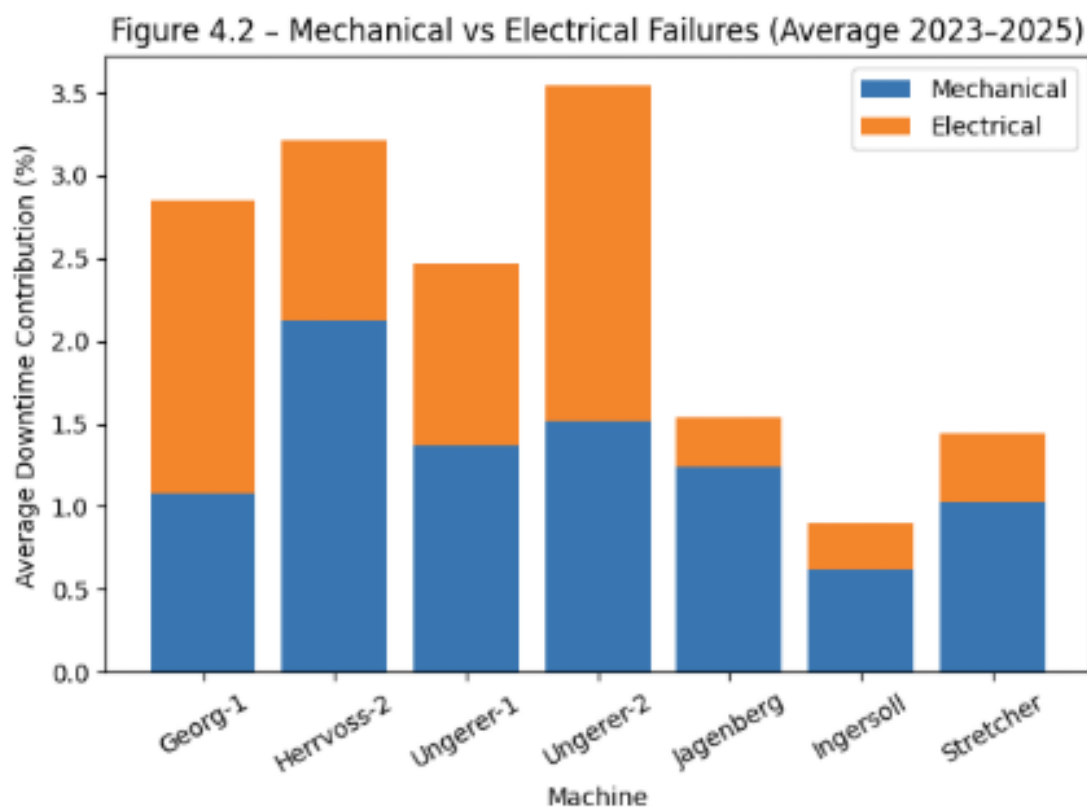
Αντίστοιχα, οι ηλεκτρολογικές και ηλεκτρονικές βλάβες συνδέονται με προβλήματα σε ηλεκτρικά συστήματα, αισθητήρες, συστήματα ελέγχου, μετατροπείς ισχύος και προγραμματιζόμενους λογικούς ελεγκτές (Programmable Logic Controllers – PLC). Στις σύγχρονες βιομηχανικές εγκαταστάσεις, η λειτουργία των μηχανών εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από πολύπλοκα συστήματα αυτοματισμού, τα οποία διασφαλίζουν τον συγχρονισμό των επιμέρους υποσυστημάτων της γραμμής. Η πολυπλοκότητα αυτών των συστημάτων μπορεί να οδηγήσει σε βλάβες που σχετίζονται με αισθητήρες, καλωδιώσεις, μονάδες ελέγχου ή λογισμικό λειτουργίας.

Η ανάλυση των δεδομένων συντήρησης δείχνει ότι οι δύο αυτές κατηγορίες βλαβών συμβάλλουν με διαφορετικό τρόπο στη συνολική κατανομή του downtime. Σε πολλές περιπτώσεις, οι μηχανολογικές βλάβες εμφανίζονται με μικρότερη συχνότητα αλλά οδηγούν σε μεγαλύτερους χρόνους αποκατάστασης, λόγω της ανάγκης αντικατάστασης ή επισκευής μηχανικών εξαρτημάτων. Αντίθετα, οι ηλεκτρολογικές ή ηλεκτρονικές βλάβες εμφανίζονται συχνά με μεγαλύτερη συχνότητα, αλλά η αποκατάστασή τους μπορεί να πραγματοποιηθεί σε μικρότερο χρονικό διάστημα, ιδιαίτερα όταν το πρόβλημα σχετίζεται με ρυθμίσεις συστημάτων ελέγχου ή με την αντικατάσταση μικρότερων εξαρτημάτων.

Η διάκριση αυτή έχει ιδιαίτερη σημασία για τον σχεδιασμό αποτελεσματικών στρατηγικών συντήρησης. Οι μηχανολογικές αστοχίες συνδέονται συχνά με φαινόμενα σταδιακής φθοράς και μπορούν να αντιμετωπιστούν μέσω πρακτικών *condition-based maintenance*, όπως η παρακολούθηση κραδασμών (*vibration monitoring*) ή η ανάλυση θερμοκρασιών λειτουργίας. Αντίθετα, οι ηλεκτρολογικές βλάβες σχετίζονται συχνά με προβλήματα σε συστήματα αυτοματισμού και μπορούν να αντιμετωπιστούν μέσω συστηματικής διάγνωσης των συστημάτων ελέγχου και προληπτικών ελέγχων των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων.

Η κατανόηση της σχετικής συμβολής των διαφορετικών τύπων βλαβών στη συνολική λειτουργική επίδοση της εγκατάστασης αποτελεί βασικό εργαλείο για τη βελτίωση της στρατηγικής συντήρησης. Μέσω της ανάλυσης αυτής, οι υπεύθυνοι συντήρησης μπορούν να εντοπίσουν τους τομείς στους οποίους απαιτούνται τεχνικές παρεμβάσεις και να προσαρμόσουν τις πρακτικές συντήρησης με στόχο τη μείωση των απρογραμματίστων διακοπών λειτουργίας.

Στο επόμενο στάδιο της ανάλυσης εξετάζονται πιο αναλυτικά τα πρότυπα εμφάνισης των βλαβών σε επίπεδο μεμονωμένων μηχανών. Συγκεκριμένα, εφαρμόζεται ανάλυση Pareto για τις δύο κρίσιμες γραμμές παραγωγής της εγκατάστασης, Georg-1 και Herrvoss-2, προκειμένου να εντοπιστούν οι κατηγορίες αστοχιών που συμβάλλουν περισσότερο στις συνολικές καθυστερήσεις λειτουργίας.



Σχήμα 4.3 – Distribution of mechanical and electrical failures per machine (average values for the period 2023–2025)

Η κατανομή των μηχανολογικών και ηλεκτρολογικών βλαβών για τις μηχανές της εγκατάστασης παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.2. Από την ανάλυση προκύπτει ότι η συμβολή

των δύο κατηγοριών βλαβών διαφέρει σημαντικά μεταξύ των μηχανών. Σε ορισμένες γραμμές παραγωγής, όπως η Herrvoss-2 και η Jagenberg, οι μηχανολογικές βλάβες αποτελούν το μεγαλύτερο ποσοστό των συνολικών διακοπών λειτουργίας, γεγονός που συνδέεται με τα υψηλά μηχανικά φορτία που αναπτύσσονται κατά την επεξεργασία του υλικού. Αντίθετα, σε άλλες μηχανές όπως η Georg-1 και η Ungerer-2 παρατηρείται μεγαλύτερη συμμετοχή ηλεκτρολογικών ή ηλεκτρονικών βλαβών, γεγονός που μπορεί να σχετίζεται με την αυξημένη πολυπλοκότητα των συστημάτων αυτοματισμού και ελέγχου της γραμμής.

Η διάκριση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον σχεδιασμό αποτελεσματικών στρατηγικών συντήρησης. Οι μηχανολογικές αστοχίες συνδέονται συχνά με φαινόμενα φθοράς και μπορούν να αντιμετωπιστούν μέσω τεχνικών condition monitoring, ενώ οι ηλεκτρολογικές βλάβες απαιτούν συστηματικό έλεγχο των συστημάτων αυτοματισμού και των ηλεκτρικών εγκαταστάσεων της γραμμής. Η κατανόηση της σχετικής συμβολής των δύο κατηγοριών βλαβών παρέχει σημαντικές πληροφορίες για τη βελτιστοποίηση των πρακτικών συντήρησης της εγκατάστασης.

4.4 Ανάλυση Pareto για τη μηχανή Georg-1 (Pareto Analysis for Georg-1)

Η ανάλυση Pareto αποτελεί ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο εργαλείο στη βιομηχανική συντήρηση για την αναγνώριση των σημαντικότερων αιτιών βλαβών σε ένα τεχνικό σύστημα. Η βασική αρχή της μεθόδου βασίζεται στον κανόνα 80/20, σύμφωνα με τον οποίο ένα σχετικά μικρό ποσοστό αιτιών είναι συχνά υπεύθυνο για το μεγαλύτερο ποσοστό των προβλημάτων που εμφανίζονται σε ένα σύστημα. Στο πλαίσιο της συντήρησης βιομηχανικού εξοπλισμού, η ανάλυση Pareto επιτρέπει τον εντοπισμό των τεχνικών κατηγοριών αστοχιών που συμβάλλουν περισσότερο στον συνολικό χρόνο διακοπής λειτουργίας.

Στην παρούσα μελέτη εφαρμόστηκε ανάλυση Pareto για τη γραμμή κοπής Georg-1, η οποία αποτελεί μία από τις σημαντικότερες παραγωγικές μονάδες της εγκατάστασης. Η συγκεκριμένη μηχανή χαρακτηρίζεται από υψηλό βαθμό παραγωγικής ευελιξίας,

καθώς μπορεί να επεξεργαστεί μεγάλο εύρος πάχους και τύπων αλουμινίου, ενώ παράλληλα έχει τη δυνατότητα εκτέλεσης πολλαπλών κοπών και διαφορετικών διαδικασιών ξακρίσματος των ακμών του υλικού. Η έντονη χρήση της μηχανής και η τεχνολογική πολυπλοκότητα των λειτουργιών της καθιστούν ιδιαίτερα σημαντική την κατανόηση των προτύπων αστοχίας που εμφανίζονται κατά τη λειτουργία της.

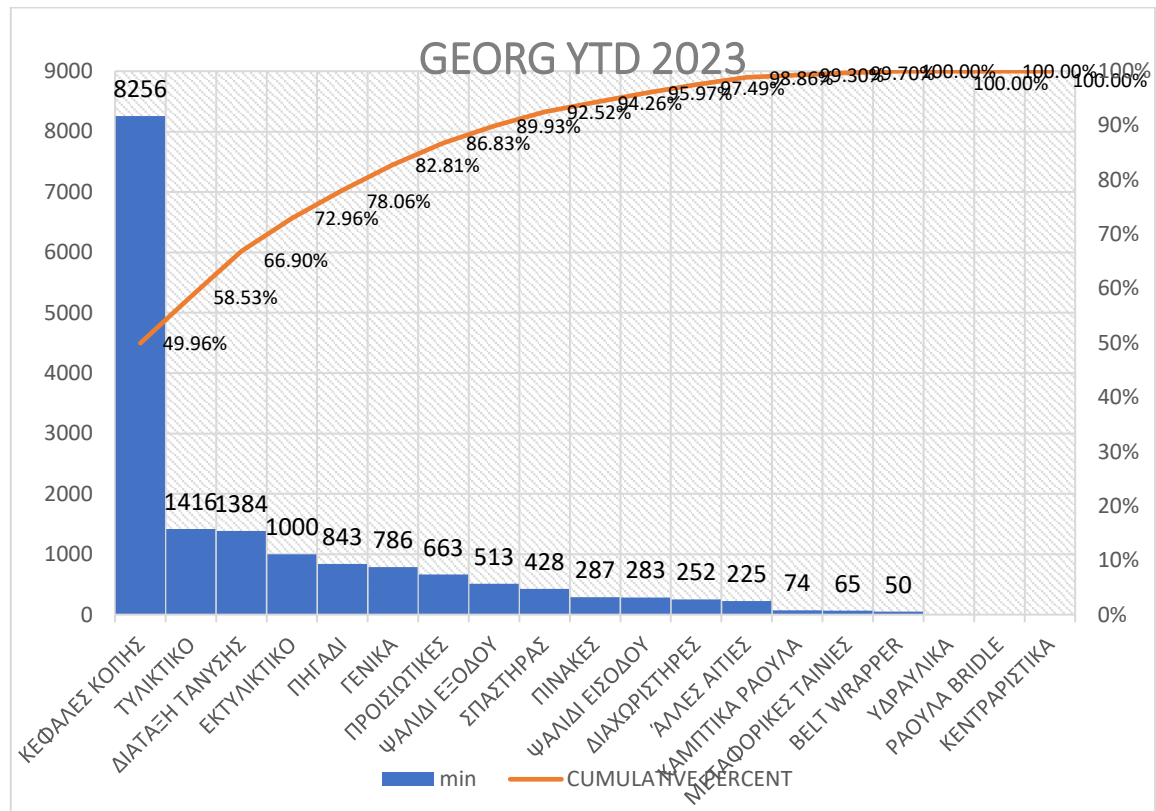
Για την πραγματοποίηση της ανάλυσης χρησιμοποιήθηκαν τα ιστορικά δεδομένα βλαβών που καταγράφηκαν στο σύστημα συντήρησης της εγκατάστασης. Οι βλάβες κατηγοριοποιήθηκαν ανάλογα με την τεχνική τους αιτία και καταγράφηκαν με βάση τη συχνότητα εμφάνισής τους καθώς και τη συνολική επίδρασή τους στον χρόνο διακοπής λειτουργίας της μηχανής. Η ταξινόμηση των δεδομένων πραγματοποιήθηκε σε φθίνουσα σειρά συχνότητας, προκειμένου να αναδειχθούν οι κατηγορίες αστοχιών που συμβάλλουν περισσότερο στη συνολική λειτουργική επιβάρυνση της γραμμής.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν ότι ορισμένες κατηγορίες βλαβών εμφανίζονται σημαντικά συχνότερα από άλλες και συγκεντρώνουν το μεγαλύτερο ποσοστό των τεχνικών παρεμβάσεων συντήρησης. Οι κατηγορίες αυτές σχετίζονται κυρίως με κρίσιμα υποσυστήματα της γραμμής, όπως το σύστημα κοπής, τα συστήματα μετάδοσης κίνησης και τα συστήματα ελέγχου της τάσης του υλικού. Η συγκέντρωση μεγάλου ποσοστού βλαβών σε συγκεκριμένα υποσυστήματα επιβεβαιώνει τη σημασία της στοχευμένης παρακολούθησης αυτών των στοιχείων του εξοπλισμού.

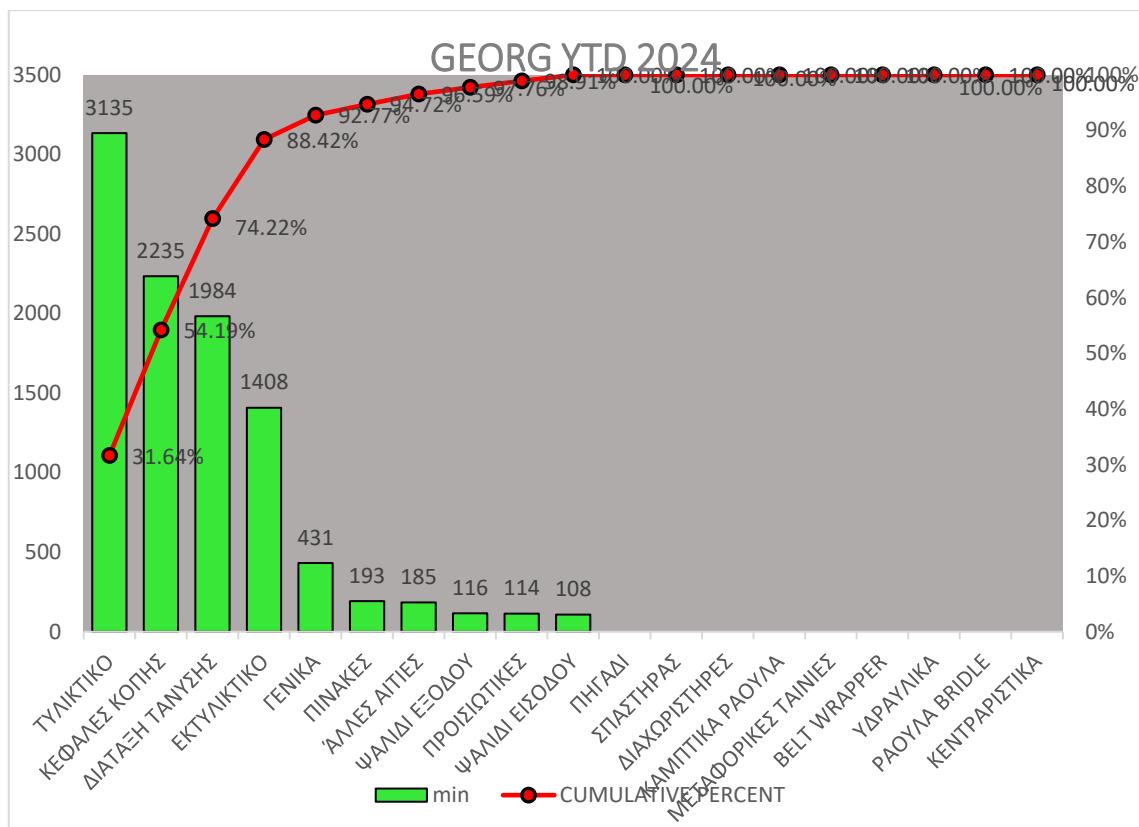
Η εφαρμογή της ανάλυσης Pareto επιτρέπει την ιεράρχηση των τεχνικών προβλημάτων που επηρεάζουν τη λειτουργία της Georg-1 και παρέχει ένα χρήσιμο εργαλείο για τον σχεδιασμό στρατηγικών συντήρησης. Αντί να κατανέμονται οι πόροι συντήρησης ομοιόμορφα σε όλα τα υποσυστήματα της μηχανής, η ανάλυση δείχνει ότι η εστίαση σε συγκεκριμένες κατηγορίες βλαβών μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση των προγραμματιστών διακοπών λειτουργίας.

Επιπλέον, τα αποτελέσματα της ανάλυσης μπορούν να αξιοποιηθούν ως βάση για την εφαρμογή πιο προηγμένων πρακτικών συντήρησης, όπως η predictive maintenance. Μέσω της συστηματικής παρακολούθησης των κρίσιμων υποσυστημάτων που εμφανίζουν υψηλή συχνότητα βλαβών, καθίσταται δυνατό να εντοπιστούν πρόωρα σημάδια φθοράς και να προγραμματιστούν προληπτικές παρεμβάσεις πριν την εκδήλωση σοβαρών τεχνικών αστοχιών.

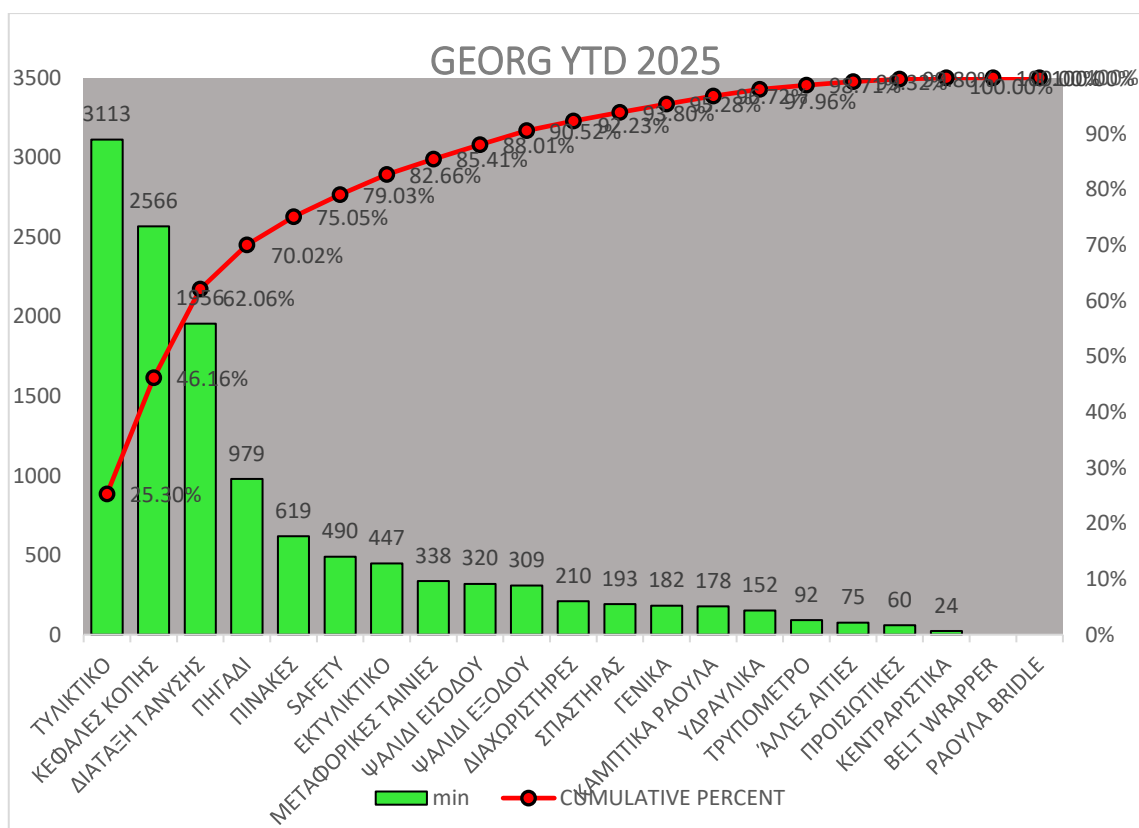
Η κατανόηση των προτύπων αστοχίας της Georg-1 αποτελεί ένα σημαντικό βήμα για τη βελτίωση της συνολικής αξιοπιστίας του εξοπλισμού της εγκατάστασης. Στο επόμενο υποκεφάλαιο εφαρμόζεται αντίστοιχη ανάλυση Pareto για τη μηχανή Herrvoss-2, η οποία παρουσιάζει διαφορετικά τεχνικά χαρακτηριστικά και λειτουργεί υπό διαφορετικές συνθήκες επεξεργασίας υλικού.



Σχήμα 4.4 – Pareto analysis of failures for Georg-1 (2023)



Σχήμα 4.5 – Pareto analysis of failures for Georg-1 (2024)



Σχήμα 4.6 – Pareto analysis of failures for Georg-1 (2025)

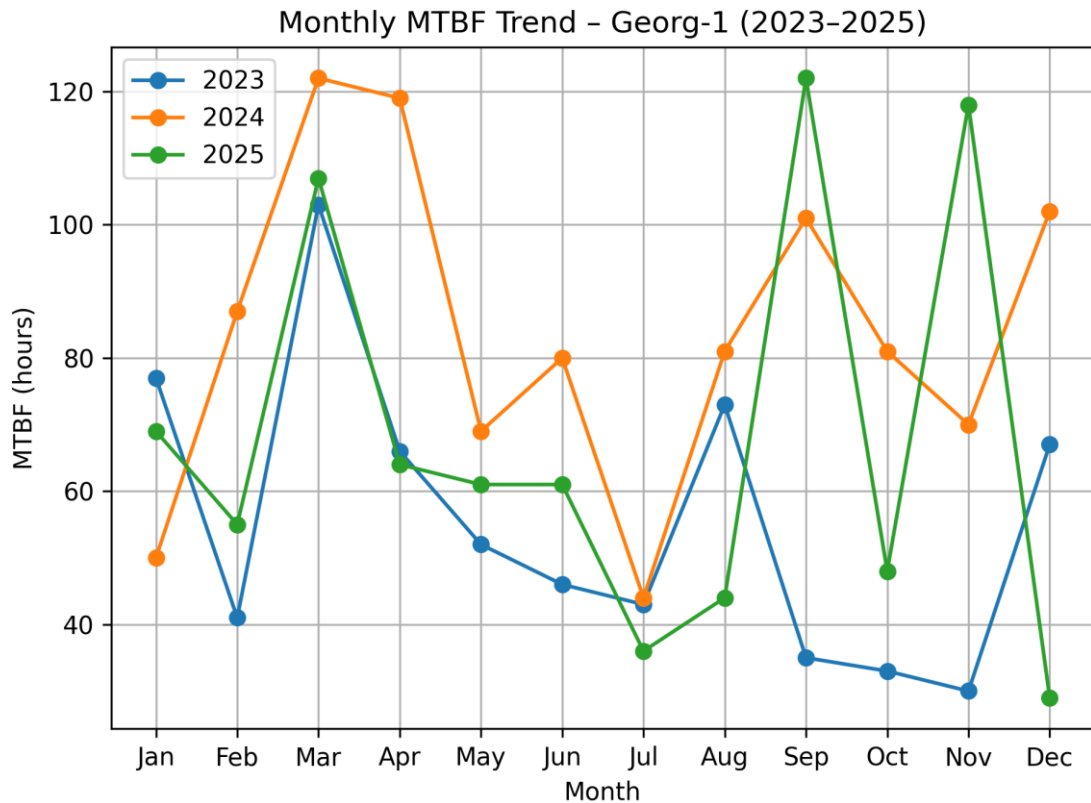
Η ανάλυση Pareto εφαρμόστηκε για τη γραμμή κοπής Georg-1 με στόχο τον εντοπισμό των κατηγοριών βλαβών που συμβάλλουν περισσότερο στον συνολικό χρόνο διακοπής λειτουργίας της μηχανής. Η μέθοδος Pareto επιτρέπει την ιεράρχηση των αιτιών αστοχίας με βάση τη συμβολή τους στο συνολικό downtime και αποτελεί ένα ιδιαίτερα χρήσιμο εργαλείο στη διαχείριση βιομηχανικής συντήρησης.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης για τα έτη 2023, 2024 και 2025 παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.3 έως 4.5. Σε κάθε γράφημα παρουσιάζεται η κατανομή του χρόνου βλαβών ανά κατηγορία τεχνικής αιτίας, καθώς και η αθροιστική ποσοστιαία συμβολή των επιμέρους κατηγοριών στο συνολικό downtime της γραμμής.

Από την ανάλυση των δεδομένων προκύπτει ότι ένα σχετικά περιορισμένο σύνολο κατηγοριών βλαβών ευθύνεται για το μεγαλύτερο μέρος των καθυστερήσεων λειτουργίας της μηχανής. Συγκεκριμένα, κατηγορίες όπως οι κεφαλές κοπής, το τυλικτικό σύστημα και οι διατάξεις τάνυσης εμφανίζονται συστηματικά μεταξύ των σημαντικότερων αιτιών βλαβών κατά τα εξεταζόμενα έτη. Οι κατηγορίες αυτές σχετίζονται άμεσα με τα βασικά μηχανολογικά υποσυστήματα της γραμμής κοπής και επηρεάζονται από τα μηχανικά φορτία που αναπτύσσονται κατά τη διαδικασία επεξεργασίας του υλικού.

Επιπλέον, η ανάλυση δείχνει ότι οι πρώτες λίγες κατηγορίες βλαβών συγκεντρώνουν σημαντικό ποσοστό του συνολικού downtime, επιβεβαιώνοντας την αρχή Pareto σύμφωνα με την οποία ένα μικρό ποσοστό αιτιών είναι υπεύθυνο για το μεγαλύτερο μέρος των προβλημάτων ενός συστήματος. Η παρατήρηση αυτή υποδεικνύει ότι η εστίαση των πρακτικών συντήρησης στα συγκεκριμένα κρίσιμα υποσυστήματα μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική βελτίωση της αξιοπιστίας της γραμμής παραγωγής.

Η συστηματική παρακολούθηση των κατηγοριών αυτών, σε συνδυασμό με την εφαρμογή πρακτικών condition-based maintenance και predictive maintenance, μπορεί να συμβάλει στη μείωση των απρογραμματίστων διακοπών λειτουργίας και στη βελτίωση της συνολικής διαθεσιμότητας της εγκατάστασης.

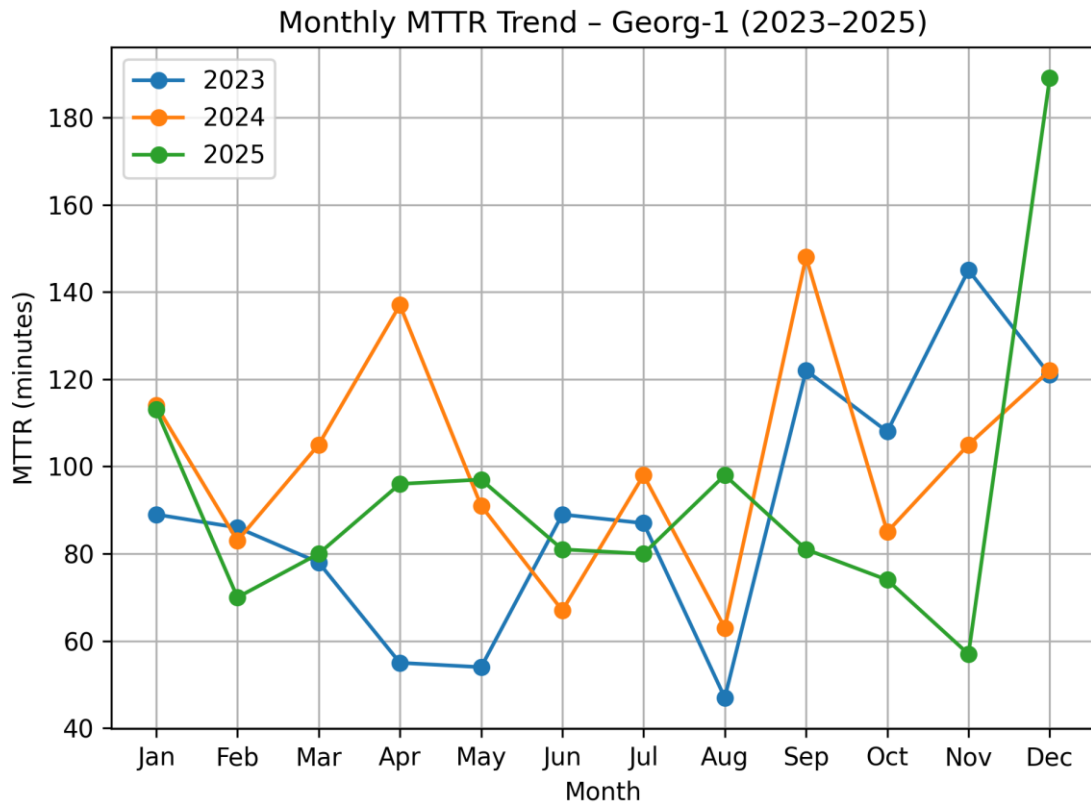


Σχήμα 4.7 – Monthly MTBF trend for Georg-1 (2023–2025)

Η ανάλυση του δείκτη MTBF παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.3. Παρατηρείται σημαντική διακύμανση στις τιμές του δείκτη κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης. Κατά το έτος 2023, ο δείκτης MTBF κυμάνθηκε σε σχετικά χαμηλά επίπεδα, υποδεικνύοντας αυξημένη συχνότητα εμφάνισης βλαβών στη γραμμή παραγωγής.

Το 2024 παρατηρείται βελτίωση της αξιοπιστίας του εξοπλισμού, καθώς σε αρκετούς μήνες ο δείκτης MTBF εμφανίζει υψηλότερες τιμές, γεγονός που υποδηλώνει μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα λειτουργίας μεταξύ διαδοχικών αστοχιών. Αντίστοιχα, το 2025 παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις, με ορισμένους μήνες να εμφανίζουν ιδιαίτερα υψηλές τιμές MTBF, ενώ σε άλλες περιπτώσεις παρατηρείται σημαντική μείωση.

Η μεταβλητότητα αυτή υποδηλώνει την ύπαρξη συγκεκριμένων κατηγοριών βλαβών που επηρεάζουν σημαντικά τη λειτουργική αξιοπιστία του εξοπλισμού, γεγονός που αναλύεται περαιτέρω μέσω της Pareto analysis στις επόμενες ενότητες.



Σχήμα 4.8 – Monthly MTTR trend for Georg-1 (2023–2025)

Η εξέλιξη του δείκτη MTTR παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.4 και αποτυπώνει τον μέσο χρόνο αποκατάστασης των βλαβών στη γραμμή Georg-1.

Παρατηρείται ότι κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης ο δείκτης MTTR παρουσιάζει σημαντικές διακυμάνσεις, γεγονός που υποδηλώνει διαφοροποίηση στη διάρκεια αποκατάστασης των βλαβών. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η αύξηση του MTTR μπορεί να σχετίζεται με πιο σύνθετες τεχνικές βλάβες, ανάγκη για εξειδικευμένα ανταλλακτικά ή καθυστερήσεις στη διαδικασία διάγνωσης της βλάβης.

Παρά τις διακυμάνσεις αυτές, σε αρκετούς μήνες παρατηρούνται χαμηλότερες τιμές MTTR, γεγονός που υποδεικνύει βελτίωση στην αποτελεσματικότητα των διαδικασιών συντήρησης και ταχύτερη αποκατάσταση της λειτουργίας του εξοπλισμού.

Η συνδυασμένη ανάλυση των δεικτών MTBF και MTTR παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα της αξιοπιστίας και της συντηρησιμότητας της γραμμής παραγωγής.

4.5 Ανάλυση Pareto για τη μηχανή Herrvoss-2 (Pareto Analysis for Herrvoss-2)

Η γραμμή κοπής Herrvoss-2 αποτελεί ένα από τα βασικά στοιχεία της παραγωγικής λειτουργίας της εγκατάστασης και παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον από πλευράς αξιοπιστίας και συντήρησης. Σε αντίθεση με τη γραμμή Georg-1, η οποία αποτελεί πιο σύγχρονη εγκατάσταση, η Herrvoss-2 είναι μηχανή παλαιότερης κατασκευής και λειτουργεί σε ιδιαίτερα απαιτητικές συνθήκες επεξεργασίας υλικού. Η συγκεκριμένη γραμμή χρησιμοποιείται κυρίως για την επεξεργασία παχύτερων φύλλων αλουμινίου, τα οποία δημιουργούν υψηλότερα μηχανικά φορτία στον εξοπλισμό και αυξημένες απαιτήσεις στα μηχανικά υποσυστήματα της γραμμής.

Η Herrvoss-2 διαθέτει πλήρη διάταξη επεξεργασίας υλικού, η οποία περιλαμβάνει σύστημα εκτύλιξης ρολού (uncoiler), σύστημα κοπής (slitting unit), σύστημα επανατύλιξης (recoiler) καθώς και σύστημα εξομάλυνσης τάσεων (tension levelling). Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της γραμμής είναι η ύπαρξη τριών διαφορετικών tension levellers, τα οποία χρησιμοποιούνται ανάλογα με το πάχος του υλικού που επεξεργάζεται η μηχανή. Η διάταξη αυτή επιτρέπει την επεξεργασία φύλλων αλουμινίου με πάχος που κυμαίνεται περίπου από 1 έως 12 χιλιοστά, καλύπτοντας ένα σημαντικό μέρος της παραγωγής που αφορά βαριά και μηχανικά απαιτητικά προϊόντα.

Για την ανάλυση των προτύπων αστοχίας της Herrvoss-2 εφαρμόστηκε αντίστοιχη μεθοδολογία Pareto με αυτή που χρησιμοποιήθηκε για τη γραμμή Georg-1. Τα δεδομένα βλαβών συλλέχθηκαν από τα αρχεία συντήρησης της εγκατάστασης και ταξινομήθηκαν με βάση τη συχνότητα εμφάνισης των τεχνικών συμβάντων και τη συμβολή τους στον συνολικό χρόνο διακοπής λειτουργίας της μηχανής. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με σκοπό τον εντοπισμό των κατηγοριών βλαβών που συμβάλλουν περισσότερο στις καθυστερήσεις λειτουργίας της γραμμής.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης δείχνουν ότι, όπως και στην περίπτωση της Georg-1, ένα σχετικά περιορισμένο σύνολο τεχνικών αιτιών είναι υπεύθυνο για σημαντικό μέρος των συνολικών βλαβών της μηχανής. Οι συχνότερες αστοχίες σχετίζονται κυρίως με μηχανικά υποσυστήματα της γραμμής, όπως τα συστήματα

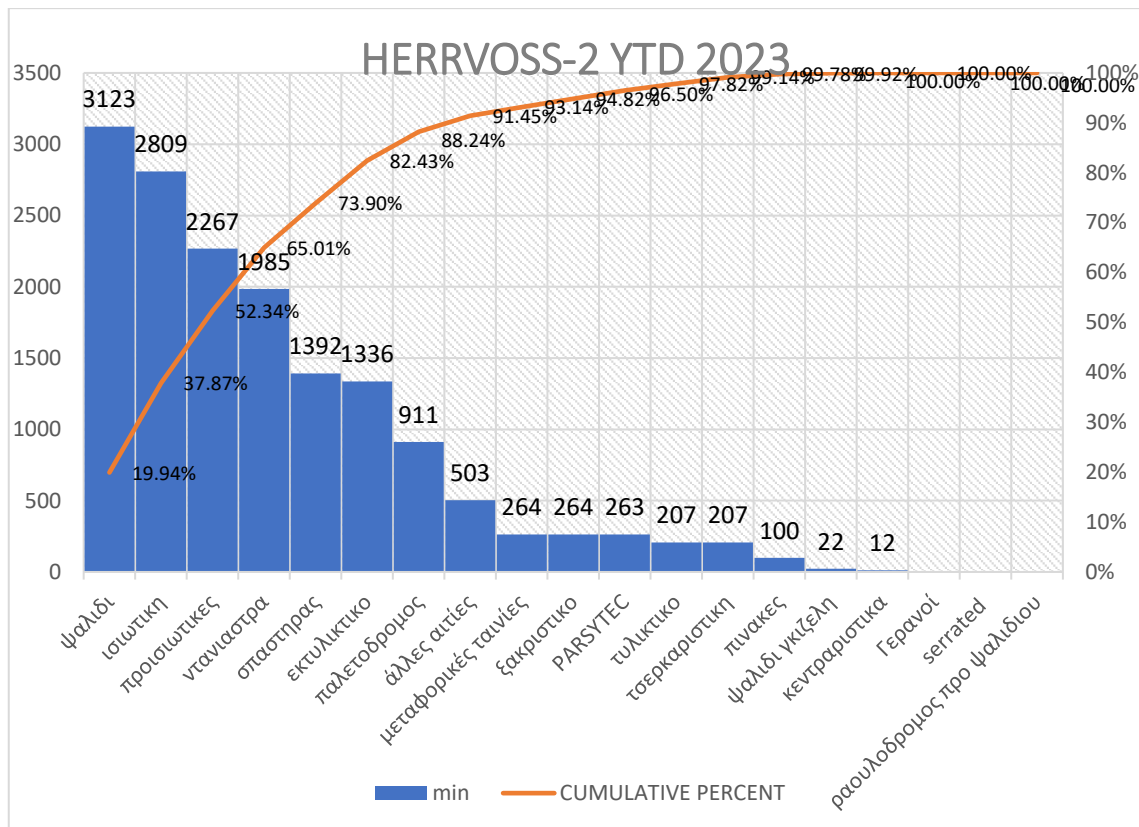
μετάδοσης κίνησης, τα στοιχεία στήριξης και ευθυγράμμισης των αξόνων, καθώς και τα συστήματα που εμπλέκονται στη διαχείριση της τάσης του υλικού κατά τη διαδικασία κοπής και επανατύλιξης.

Η αυξημένη παρουσία μηχανολογικών αστοχιών στη συγκεκριμένη μηχανή μπορεί να ερμηνευθεί σε μεγάλο βαθμό από τις συνθήκες λειτουργίας της γραμμής. Η επεξεργασία παχύτερων φύλλων αλουμινίου συνεπάγεται μεγαλύτερα μηχανικά φορτία στα περιστρεφόμενα στοιχεία της γραμμής, γεγονός που επιταχύνει τη φθορά εξαρτημάτων όπως έδρανα, άξονες και μηχανισμούς μετάδοσης κίνησης. Παράλληλα, η ηλικία της εγκατάστασης μπορεί να συμβάλλει στην εμφάνιση βλαβών που σχετίζονται με την κόπωση των υλικών ή με τη φθορά παλαιότερων μηχανικών διατάξεων.

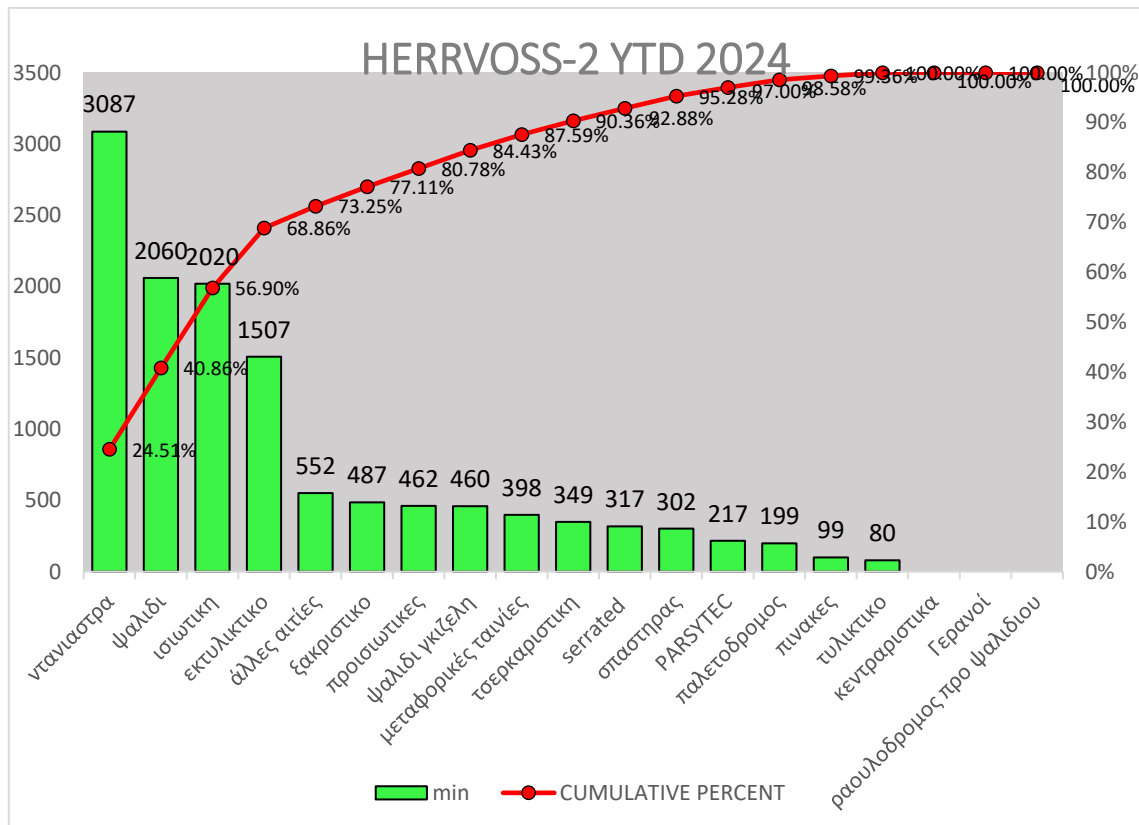
Παρά τις προκλήσεις αυτές, η ανάλυση Pareto δείχνει ότι η συγκέντρωση των βλαβών σε συγκεκριμένα υποσυστήματα δημιουργεί τη δυνατότητα στοχευμένων παρεμβάσεων συντήρησης. Η συστηματική παρακολούθηση των κρίσιμων μηχανικών στοιχείων της γραμμής μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη μείωση των απρογραμματίστων διακοπών λειτουργίας. Επιπλέον, η εφαρμογή τεχνικών condition monitoring, όπως η παρακολούθηση κραδασμών ή η θερμογραφική επιθεώρηση, μπορεί να βοηθήσει στον έγκαιρο εντοπισμό ενδείξεων φθοράς πριν την εμφάνιση σοβαρών αστοχιών.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των αναλύσεων Pareto για τις δύο γραμμές παραγωγής, Georg-1 και Herrvoss-2, παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα των προτύπων αστοχίας που εμφανίζονται στην εγκατάσταση. Ενώ η Georg-1 παρουσιάζει υψηλή λειτουργική ευελιξία και συχνά επηρεάζεται από βλάβες που σχετίζονται με την πολυπλοκότητα των διαδικασιών κοπής και αυτοματισμού, η Herrvoss-2 εμφανίζει μεγαλύτερη ευαισθησία σε μηχανολογικές αστοχίες που σχετίζονται με τα υψηλά φορτία λειτουργίας και την ηλικία του εξοπλισμού.

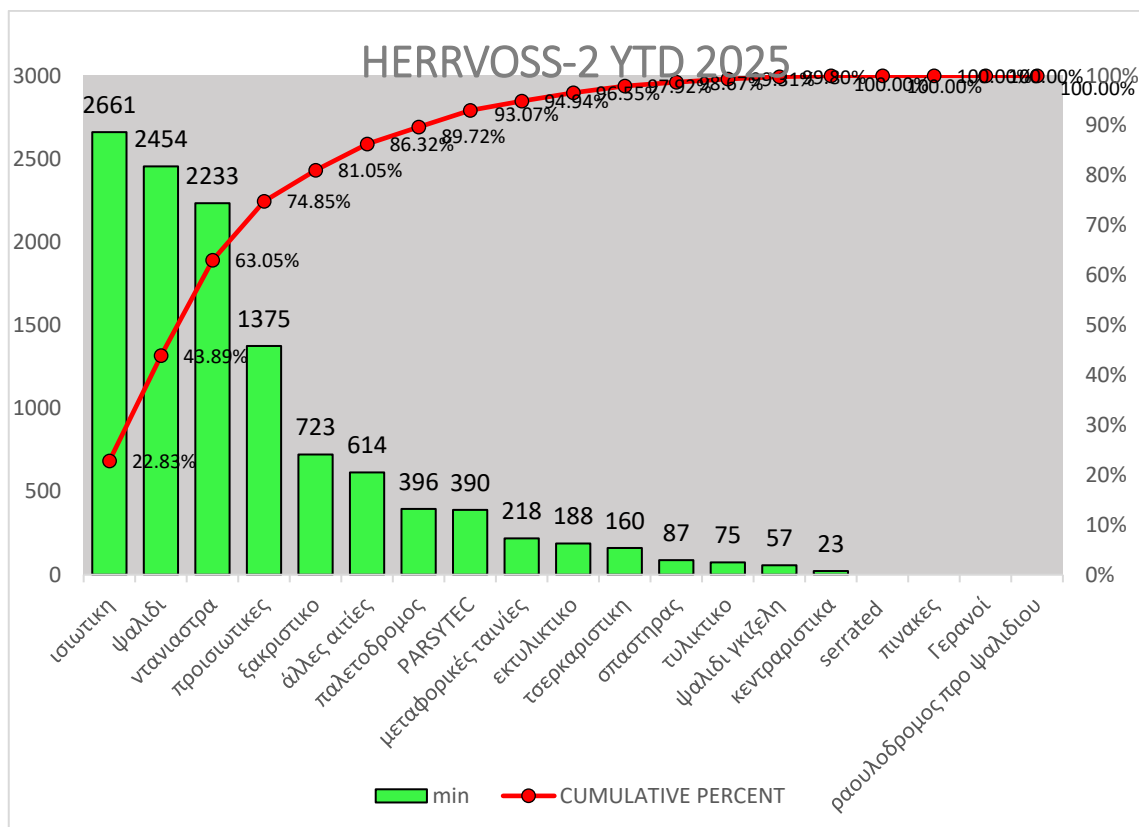
Η κατανόηση των διαφορών αυτών είναι ιδιαίτερα σημαντική για τον σχεδιασμό αποτελεσματικών στρατηγικών συντήρησης στη βιομηχανική εγκατάσταση. Μέσω της ανάλυσης των δεδομένων βλαβών και της εφαρμογής εργαλείων όπως η ανάλυση Pareto, οι υπεύθυνοι συντήρησης μπορούν να αναπτύξουν πιο στοχευμένες πρακτικές διαχείρισης του εξοπλισμού και να βελτιώσουν τη συνολική αξιοπιστία της παραγωγικής διαδικασίας.



Σχήμα 4.9 – Pareto analysis of failures for Herrvoss-2 (2023)



Σχήμα 4.10 – Pareto analysis of failures for Herrvoss-2 (2024)



Σχήμα 4.11 – Pareto analysis of failures for Herrvoss-2 (2025)

Η ανάλυση Pareto εφαρμόστηκε και στη γραμμή κοπής Herrvoss-2 με σκοπό τον εντοπισμό των βασικών κατηγοριών αστοχιών που επηρεάζουν τον συνολικό χρόνο διακοπής λειτουργίας της μηχανής. Η Herrvoss-2 αποτελεί παλαιότερο εξοπλισμό σε σχέση με τη Georg-1, καθώς η εγκατάστασή της πραγματοποιήθηκε το 1990. Ως αποτέλεσμα, η λειτουργία της γραμμής χαρακτηρίζεται από διαφορετικά πρότυπα φθοράς και μηχανολογικής καταπόνησης σε σχέση με πιο σύγχρονες εγκαταστάσεις.

Τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάζονται στα Σχήματα 4.6 έως 4.8 για τα έτη 2023, 2024 και 2025 αντίστοιχα. Τα γραφήματα Pareto παρουσιάζουν την κατανομή του χρόνου διακοπής λειτουργίας ανά κατηγορία βλάβης, καθώς και την αθροιστική ποσοστιαία συμβολή κάθε κατηγορίας στο συνολικό downtime της γραμμής παραγωγής.

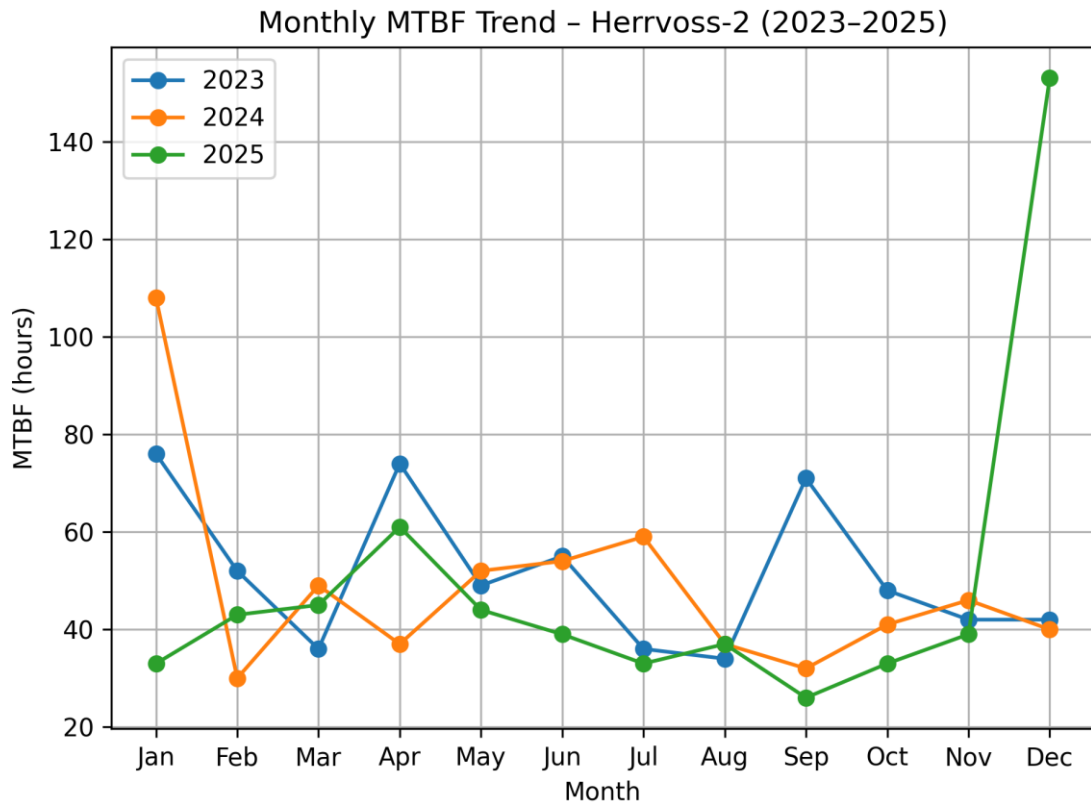
Η ανάλυση των δεδομένων δείχνει ότι ο μεγαλύτερος αριθμός καθυστερήσεων προέρχεται από συγκεκριμένα μηχανολογικά υποσυστήματα της γραμμής. Μεταξύ των σημαντικότερων κατηγοριών βλαβών εμφανίζονται τα συστήματα ψαλιδιών, το ισιωτικό σύστημα, καθώς και διάφορα μηχανικά στοιχεία που σχετίζονται με τη μεταφορά και καθοδήγηση του υλικού μέσα στη γραμμή επεξεργασίας. Οι κατηγορίες αυτές αποτελούν

κρίσιμα στοιχεία της λειτουργίας μιας slitting line, καθώς συμμετέχουν άμεσα στη διαδικασία ευθυγράμμισης, κοπής και επανατύλιξης του υλικού.

Παρατηρείται επίσης ότι οι πρώτες λίγες κατηγορίες βλαβών συγκεντρώνουν σημαντικό ποσοστό του συνολικού χρόνου καθυστέρησης. Το φαινόμενο αυτό επιβεβαιώνει την αρχή Pareto, σύμφωνα με την οποία ένα περιορισμένο σύνολο αιτιών ευθύνεται για το μεγαλύτερο μέρος των προβλημάτων ενός συστήματος. Στην περίπτωση της Herrvoss-2, οι κυριότερες κατηγορίες βλαβών σχετίζονται κυρίως με μηχανολογικές φθορές και μηχανικές αστοχίες που προκύπτουν από τη μακροχρόνια λειτουργία του εξοπλισμού.

Η σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ των τριών ετών δείχνει ότι οι βασικές κατηγορίες αστοχίας παραμένουν σχετικά σταθερές, γεγονός που υποδηλώνει ότι συγκεκριμένα υποσυστήματα της γραμμής παρουσιάζουν συστηματικά μεγαλύτερη πιθανότητα εμφάνισης βλαβών. Η πληροφορία αυτή είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για τον σχεδιασμό στοχευμένων στρατηγικών συντήρησης, καθώς επιτρέπει την προτεραιοποίηση των επεμβάσεων σε εκείνα τα σημεία του εξοπλισμού που επηρεάζουν περισσότερο την αξιοπιστία της εγκατάστασης.

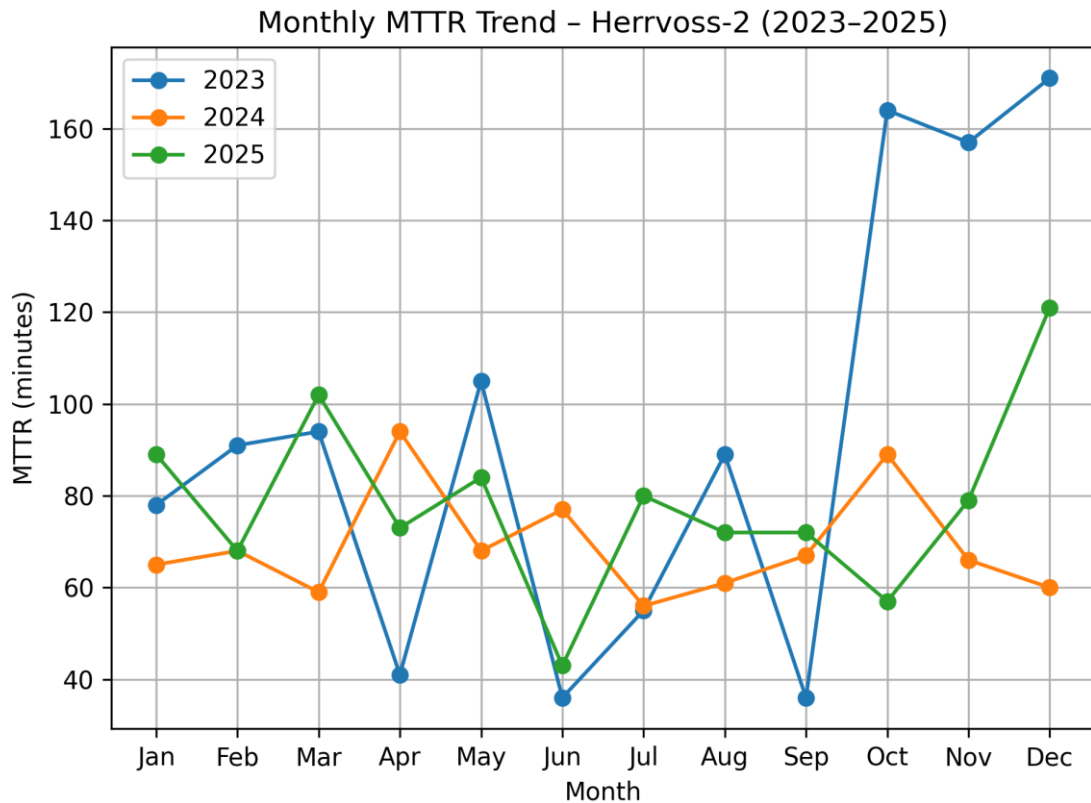
Συνεπώς, η εφαρμογή προσεγγίσεων προγνωστικής συντήρησης (predictive maintenance) και συντήρησης βάσει κατάστασης (condition-based maintenance) στα συγκεκριμένα υποσυστήματα μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη μείωση των απρογραμμάτιστων διακοπών λειτουργίας και στη βελτίωση της συνολικής διαθεσιμότητας της γραμμής παραγωγής.



Σχήμα 4.12 – Monthly MTBF trend for Herrvoss-2 (2023–2025)

Η εξέλιξη του δείκτη MTBF για τη γραμμή Herrvoss-2 παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.5. Τα αποτελέσματα δείχνουν σημαντική μεταβλητότητα στις τιμές του δείκτη κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης. Σε αρκετούς μήνες οι τιμές του MTBF βρίσκονται κοντά ή κάτω από το επιθυμητό επίπεδο στόχου, γεγονός που υποδηλώνει σχετικά συχνή εμφάνιση βλαβών στη γραμμή παραγωγής.

Ωστόσο, σε ορισμένες χρονικές περιόδους παρατηρούνται αυξημένες τιμές MTBF, γεγονός που υποδηλώνει μεγαλύτερα διαστήματα απρόσκοπτης λειτουργίας του εξοπλισμού. Η διακύμανση αυτή υποδεικνύει ότι συγκεκριμένες κατηγορίες βλαβών επηρεάζουν δυσανάλογα τη συνολική αξιοπιστία της γραμμής.



Σχήμα 4.13 – Monthly MTTR trend for Herrvoss-2 (2023–2025)

Η ανάλυση του δείκτη MTTR παρουσιάζεται στο Σχήμα 4.6 και απεικονίζει τον χρόνο που απαιτείται για την αποκατάσταση των βλαβών στη γραμμή Herrvoss-2. Οι τιμές του δείκτη εμφανίζουν σημαντικές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης, γεγονός που υποδηλώνει ότι η διάρκεια των επεμβάσεων συντήρησης διαφοροποιείται ανάλογα με το είδος της βλάβης.

Σε αρκετές περιπτώσεις οι τιμές του MTTR παραμένουν εντός των επιθυμητών ορίων, γεγονός που υποδηλώνει αποτελεσματική απόκριση της ομάδας συντήρησης. Ωστόσο, ορισμένα περιστατικά παρουσιάζουν σημαντικά αυξημένους χρόνους αποκατάστασης, γεγονός που επηρεάζει αρνητικά τη συνολική διαθεσιμότητα του εξοπλισμού.

Η συνδυασμένη αξιολόγηση των δεικτών MTBF και MTTR επιτρέπει την πληρέστερη κατανόηση της αξιοπιστίας και της συντηρησιμότητας της γραμμής παραγωγής.

4.6 Συμπεράσματα ανάλυσης (Summary of Findings)

Η ανάλυση των δεδομένων συντήρησης για την περίοδο 2023–2025 επέτρεψε τη διαμόρφωση μιας συγκροτημένης εικόνας για τη λειτουργική συμπεριφορά των βασικών μηχανών της εγκατάστασης επεξεργασίας αλουμινίου. Μέσα από τη συνδυαστική αξιοποίηση των ποσοστών downtime, της κατανομής των τύπων βλαβών, των δεικτών αξιοπιστίας MTBF και MTTR, καθώς και της ανάλυσης Pareto για τις δύο κρίσιμες γραμμές Georg-1 και Herrvoss-2, κατέστη δυνατή η ανάδειξη των κύριων παραγόντων που επηρεάζουν την αξιοπιστία και τη διαθεσιμότητα του εξοπλισμού.

Σε επίπεδο συνολικής λειτουργικής επίδοσης, τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι διακοπές λειτουργίας δεν κατανέμονται ομοιόμορφα μεταξύ των μηχανών. Ορισμένες γραμμές παραγωγής εμφανίζουν αυξημένα ποσοστά downtime, γεγονός που υποδηλώνει μεγαλύτερη λειτουργική επιβάρυνση και αυξημένες απαιτήσεις συντήρησης. Η παρατήρηση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς αναδεικνύει ότι η συνολική παραγωγική σταθερότητα της εγκατάστασης δεν εξαρτάται ισομερώς από όλο τον εξοπλισμό, αλλά επηρεάζεται περισσότερο από συγκεκριμένες μηχανές που λειτουργούν ως κρίσιμοι κόμβοι τεχνικής ευπάθειας.

Παράλληλα, η διάκριση των βλαβών σε μηχανολογικές και ηλεκτρολογικές/ηλεκτρονικές κατηγορίες ανέδειξε ότι η τεχνική φύση των αστοχιών διαφοροποιείται από μηχανή σε μηχανή. Σε ορισμένες περιπτώσεις επικρατούν σαφώς οι μηχανολογικές βλάβες, γεγονός που συνδέεται με αυξημένα μηχανικά φορτία, φθορά κινούμενων μερών και απαιτήσεις ευθυγράμμισης. Σε άλλες περιπτώσεις, η μεγαλύτερη συμμετοχή ηλεκτρολογικών ή ηλεκτρονικών βλαβών υποδηλώνει αυξημένη εξάρτηση από τα συστήματα αυτοματισμού, ελέγχου και αισθητήρων. Η διάκριση αυτή έχει ιδιαίτερη πρακτική σημασία, καθώς δείχνει ότι μια ενιαία στρατηγική συντήρησης δεν είναι επαρκής για όλες τις γραμμές παραγωγής, αλλά απαιτείται διαφοροποίηση ανάλογα με την κυρίαρχη φύση των αστοχιών.

Η ανάλυση των δεικτών MTBF και MTTR για τις γραμμές Georg-1 και Herrvoss-2 παρείχε μια βαθύτερη εικόνα για τη λειτουργική αξιοπιστία και τη συντηρησιμότητα των δύο πιο κρίσιμων μηχανών της εγκατάστασης. Οι διακυμάνσεις στις τιμές του MTBF κατέδειξαν ότι η συχνότητα εμφάνισης βλαβών δεν παραμένει σταθερή στον χρόνο, αλλά επηρεάζεται από τις συνθήκες λειτουργίας, την παραγωγική φόρτιση και πιθανόν από τη

σταδιακή φθορά επιμέρους υποσυστημάτων. Αντίστοιχα, οι μεταβολές στον δείκτη MTTR έδειξαν ότι ο χρόνος αποκατάστασης βλαβών επηρεάζεται όχι μόνο από τη φύση του τεχνικού προβλήματος, αλλά και από παράγοντες όπως η διαθεσιμότητα ανταλλακτικών, η τεχνική πολυπλοκότητα της επέμβασης και η επιχειρησιακή ετοιμότητα της ομάδας συντήρησης.

Ιδιαίτερα σημαντικά υπήρξαν τα ευρήματα της ανάλυσης Pareto για τις γραμμές Georg-1 και Herrvoss-2. Η ανάλυση αυτή ανέδειξε ότι ένα περιορισμένο σύνολο κατηγοριών βλάβης ευθύνεται για το μεγαλύτερο ποσοστό του συνολικού downtime, επιβεβαιώνοντας στην πράξη την αρχή ότι λίγες κρίσιμες αιτίες παράγουν το μεγαλύτερο μέρος των λειτουργικών προβλημάτων. Η πληροφορία αυτή είναι εξαιρετικά χρήσιμη από πλευράς στρατηγικής συντήρησης, διότι επιτρέπει την ιεράρχηση των τεχνικών παρεμβάσεων και την εστίαση πόρων στα υποσυστήματα εκείνα που έχουν τη μεγαλύτερη επίδραση στη συνολική λειτουργική σταθερότητα.

Συνολικά, τα αποτελέσματα του κεφαλαίου δείχνουν ότι η εγκατάσταση διαθέτει ήδη μια σημαντική βάση δεδομένων συντήρησης, η οποία μπορεί να αξιοποιηθεί όχι μόνο για απολογιστική καταγραφή βλαβών, αλλά και για πιο ώριμες μορφές ανάλυσης αξιοπιστίας. Η συστηματική ερμηνεία των δεδομένων αυτών αποτελεί ουσιαστικά το πρώτο βήμα μετάβασης από μια συμβατική λογική καταγραφής συμβάντων προς μια περισσότερο δεδομενοκεντρική και προγνωστική προσέγγιση συντήρησης. Με αυτή την έννοια, τα ευρήματα της παρούσας ανάλυσης δεν περιορίζονται μόνο στην αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης, αλλά δημιουργούν και το υπόβαθρο για τη διαμόρφωση προτάσεων βελτίωσης και για τη σταδιακή ενσωμάτωση πρακτικών predictive maintenance, οι οποίες εξετάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

5. Προτάσεις βελτίωσης και εφαρμογή predictive maintenance (Improvement Proposals and Predictive Maintenance Strategy)

5.1 Ανάγκη για βελτίωση της στρατηγικής συντήρησης (Need for maintenance strategy improvement)

Η αξιοπιστία και η διαθεσιμότητα του βιομηχανικού εξοπλισμού αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για τη διασφάλιση της ομαλής λειτουργίας μιας παραγωγικής εγκατάστασης συνεχούς λειτουργίας. Στην περίπτωση των γραμμών επεξεργασίας και κοπής φύλλων αλουμινίου, οποιαδήποτε απρογραμματίστη διακοπή λειτουργίας μπορεί να επηρεάσει σημαντικά την παραγωγική ροή, καθώς οι διεργασίες χαρακτηρίζονται από υψηλό βαθμό αυτοματοποίησης και μεγάλα μήκη επεξεργαζόμενου υλικού.

Η ανάλυση των δεδομένων συντήρησης που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο κατέδειξε ότι οι διακοπές λειτουργίας δεν κατανέμονται ομοιόμορφα μεταξύ των μηχανών της εγκατάστασης. Ορισμένες γραμμές παραγωγής εμφανίζουν υψηλότερα ποσοστά downtime και μεγαλύτερη συχνότητα εμφάνισης βλαβών, γεγονός που υποδηλώνει ότι η αξιοπιστία του εξοπλισμού επηρεάζεται από ένα σύνολο τεχνικών και λειτουργικών παραγόντων. Η παρατήρηση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς αναδεικνύει ότι η συνολική παραγωγική σταθερότητα της εγκατάστασης δεν εξαρτάται ισότιμα από όλο τον εξοπλισμό, αλλά επηρεάζεται σε μεγαλύτερο βαθμό από συγκεκριμένες κρίσιμες γραμμές παραγωγής.

Η αξιολόγηση των ποσοστών downtime, σε συνδυασμό με την ανάλυση των δεικτών MTBF και MTTR, έδειξε ότι η συχνότητα εμφάνισης βλαβών και ο χρόνος αποκατάστασης τους παρουσιάζουν σημαντικές διακυμάνσεις κατά τη διάρκεια της περιόδου μελέτης. Σε ορισμένες περιπτώσεις παρατηρήθηκαν περίοδοι αυξημένης λειτουργικής σταθερότητας, όπου οι τιμές του MTBF ήταν υψηλότερες και τα χρονικά διαστήματα μεταξύ διαδοχικών βλαβών μεγαλύτερα. Αντίθετα, σε άλλες χρονικές περιόδους οι τιμές του δείκτη μειώθηκαν αισθητά, γεγονός που υποδηλώνει αυξημένη εμφάνιση αστοχιών.

Παράλληλα, η ανάλυση του δείκτη MTTR ανέδειξε ότι ο χρόνος αποκατάστασης των βλαβών διαφοροποιείται σημαντικά ανάλογα με τη φύση του τεχνικού προβλήματος και την πολυπλοκότητα της επέμβασης συντήρησης. Σε ορισμένες περιπτώσεις οι επεμβάσεις πραγματοποιούνται σχετικά γρήγορα, γεγονός που υποδηλώνει αποτελεσματική διαχείριση της διαδικασίας συντήρησης. Ωστόσο, υπάρχουν και περιπτώσεις όπου ο χρόνος αποκατάστασης αυξάνεται σημαντικά, γεγονός που μπορεί να σχετίζεται με δυσκολία διάγνωσης της βλάβης, περιορισμένη διαθεσιμότητα ανταλλακτικών ή αυξημένη τεχνική πολυπλοκότητα των απαιτούμενων εργασιών.

Η ανάλυση Pareto των βλαβών για τις γραμμές Georg-1 και Herrvoss-2 επιβεβαίωσε επίσης ότι ένα σχετικά μικρό σύνολο κατηγοριών βλαβών ευθύνεται για το μεγαλύτερο ποσοστό των συνολικών διακοπών λειτουργίας. Το εύρημα αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τη διαμόρφωση μιας αποτελεσματικής στρατηγικής συντήρησης, καθώς υποδεικνύει ότι η στοχευμένη αντιμετώπιση συγκεκριμένων τεχνικών προβλημάτων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση του συνολικού downtime της εγκατάστασης.

Τα αποτελέσματα αυτά υποδηλώνουν ότι η υφιστάμενη στρατηγική συντήρησης, η οποία βασίζεται κυρίως σε προγραμματισμένες επιθεωρήσεις και διορθωτικές επεμβάσεις μετά την εμφάνιση της βλάβης, ενδέχεται να μην αξιοποιεί πλήρως τις δυνατότητες που παρέχει η ανάλυση των διαθέσιμων δεδομένων λειτουργίας. Η παραδοσιακή αυτή προσέγγιση συντήρησης είναι συχνά αποτελεσματική για την αντιμετώπιση άμεσων τεχνικών προβλημάτων, ωστόσο δεν επιτρέπει πάντα τον έγκαιρο εντοπισμό πιθανών αστοχιών πριν αυτές επηρεάσουν την παραγωγική διαδικασία.

Για τον λόγο αυτό, η μετάβαση προς πιο σύγχρονες στρατηγικές συντήρησης που βασίζονται στην ανάλυση δεδομένων και στη συστηματική παρακολούθηση της κατάστασης του εξοπλισμού μπορεί να συμβάλει σημαντικά στη βελτίωση της λειτουργικής αξιοπιστίας των γραμμών παραγωγής. Η αξιοποίηση ιστορικών δεδομένων βλαβών, σε συνδυασμό με τη συνεχή παρακολούθηση κρίσιμων δεικτών απόδοσης, δημιουργεί τις προϋποθέσεις για την ανάπτυξη πιο προηγμένων προσεγγίσεων συντήρησης, όπως η προγνωστική συντήρηση (predictive maintenance).

Συνεπώς, η ανάλυση που πραγματοποιήθηκε στην παρούσα εργασία δεν περιορίζεται μόνο στην αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης του εξοπλισμού, αλλά αναδεικνύει επίσης την ανάγκη για την υιοθέτηση πιο εξελιγμένων πρακτικών

διαχείρισης συντήρησης. Η ενσωμάτωση τέτοιων πρακτικών μπορεί να συμβάλει στη μείωση των απρογραμματίστων διακοπών λειτουργίας, στη βελτίωση της διαθεσιμότητας του εξοπλισμού και τελικά στην αύξηση της συνολικής αποδοτικότητας της παραγωγικής εγκατάστασης.

5.2 Προληπτική και προγνωστική συντήρηση (Preventive and Predictive Maintenance Approaches)

Η αποτελεσματική διαχείριση της συντήρησης σε σύγχρονα βιομηχανικά περιβάλλοντα απαιτεί την υιοθέτηση στρατηγικών που υπερβαίνουν την παραδοσιακή διορθωτική συντήρηση (corrective maintenance). Η διορθωτική προσέγγιση βασίζεται στην αποκατάσταση του εξοπλισμού μετά την εμφάνιση μιας βλάβης και, παρότι αποτελεί αναπόφευκτο στοιχείο της λειτουργίας μιας παραγωγικής εγκατάστασης, συνδέεται συχνά με αυξημένο κόστος, απώλεια παραγωγικής δυναμικότητας και μη προβλέψιμες διακοπές λειτουργίας. Για τον λόγο αυτό, η σύγχρονη βιομηχανική πρακτική στρέφεται προς στρατηγικές συντήρησης που επιδιώκουν την πρόληψη ή την έγκαιρη πρόβλεψη των αστοχιών.

Η προληπτική συντήρηση (preventive maintenance) βασίζεται στον προγραμματισμό περιοδικών επιθεωρήσεων και επεμβάσεων συντήρησης σύμφωνα με προκαθορισμένα χρονικά διαστήματα ή κύκλους λειτουργίας του εξοπλισμού. Η λογική της προσέγγισης αυτής είναι ότι η φθορά των μηχανικών και ηλεκτρολογικών εξαρτημάτων ακολουθεί σε μεγάλο βαθμό προβλέψιμα πρότυπα, τα οποία μπορούν να αντιμετωπιστούν μέσω τακτικών αντικαταστάσεων ή ρυθμίσεων πριν εμφανιστεί αστοχία. Στο πλαίσιο αυτό, εξαρτήματα όπως έδρανα, κύλινδροι, συστήματα μετάδοσης κίνησης ή ηλεκτρολογικά υποσυστήματα ελέγχονται και συντηρούνται σε προγραμματισμένα χρονικά διαστήματα, ανεξάρτητα από την πραγματική κατάσταση φθοράς τους.

Παρότι η προληπτική συντήρηση συμβάλλει στη μείωση των απρογραμματίστων διακοπών λειτουργίας, παρουσιάζει σημαντικούς περιορισμούς όταν εφαρμόζεται σε σύνθετα βιομηχανικά συστήματα. Η βασικότερη αδυναμία της σχετίζεται με το γεγονός ότι οι παρεμβάσεις πραγματοποιούνται με βάση χρονικά κριτήρια και όχι με βάση την

πραγματική κατάσταση του εξοπλισμού. Ως αποτέλεσμα, σε πολλές περιπτώσεις εξαρτήματα αντικαθίστανται πρόωρα, ενώ σε άλλες περιπτώσεις η φθορά μπορεί να εξελιχθεί ταχύτερα από το προβλεπόμενο πρόγραμμα συντήρησης, οδηγώντας σε απροσδόκητες αστοχίες.

Η προγνωστική συντήρηση (predictive maintenance) επιχειρεί να αντιμετωπίσει αυτούς τους περιορισμούς μέσω της αξιοποίησης δεδομένων λειτουργίας και τεχνικών ανάλυσης δεδομένων για την πρόβλεψη της μελλοντικής συμπεριφοράς του εξοπλισμού. Σε αντίθεση με την προληπτική προσέγγιση, η predictive maintenance βασίζεται στην παρακολούθηση της πραγματικής κατάστασης λειτουργίας των μηχανών και στη χρήση κατάλληλων δεικτών ή αλγοριθμικών μοντέλων για την εκτίμηση της πιθανότητας εμφάνισης βλάβης.

Η εφαρμογή προγνωστικής συντήρησης στηρίζεται σε μεγάλο βαθμό στη συλλογή και επεξεργασία δεδομένων από διάφορες πηγές. Στα σύγχρονα βιομηχανικά συστήματα, δεδομένα μπορούν να προέρχονται από αισθητήρες δονήσεων, θερμοκρασίας, πίεσης ή κατανάλωσης ενέργειας, καθώς και από συστήματα αυτοματισμού και ελέγχου της παραγωγής. Η συνεχής καταγραφή αυτών των παραμέτρων επιτρέπει την ανίχνευση αποκλίσεων από τη φυσιολογική λειτουργία του εξοπλισμού, οι οποίες συχνά αποτελούν πρώιμους δείκτες επερχόμενης αστοχίας.

Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης, η ανάλυση των ιστορικών δεδομένων βλαβών και των δεικτών αξιοπιστίας παρέχει μια πρώτη μορφή data-driven προσέγγισης στη διαχείριση της συντήρησης. Οι δείκτες MTBF και MTTR λειτουργούν ως βασικοί ποσοτικοί δείκτες αξιοπιστίας του εξοπλισμού και επιτρέπουν την αξιολόγηση της λειτουργικής συμπεριφοράς των γραμμών παραγωγής σε βάθος χρόνου. Η συστηματική παρακολούθηση των δεικτών αυτών μπορεί να αποκαλύψει τάσεις υποβάθμισης της λειτουργικής κατάστασης μιας μηχανής, γεγονός που αποτελεί βασικό στοιχείο μιας προγνωστικής στρατηγικής συντήρησης.

Παράλληλα, η ανάλυση Pareto των αιτιών βλαβών συμβάλλει στον εντοπισμό των κρίσιμων υποσυστημάτων που επηρεάζουν σε μεγαλύτερο βαθμό τη διαθεσιμότητα του εξοπλισμού. Η γνώση αυτή επιτρέπει την εστίαση των ενεργειών συντήρησης σε συγκεκριμένα τεχνικά στοιχεία της εγκατάστασης, όπως συστήματα κοπής, μηχανισμούς μεταφοράς υλικού ή κρίσιμα ηλεκτρολογικά υποσυστήματα. Με τον τρόπο αυτό, η predictive maintenance μπορεί να εφαρμοστεί αρχικά σε περιορισμένο αριθμό κρίσιμων

σημείων του εξοπλισμού, όπου η πιθανότητα αστοχίας και οι επιπτώσεις της είναι μεγαλύτερες.

Η υιοθέτηση μιας προγνωστικής στρατηγικής συντήρησης προσφέρει πολλαπλά πλεονεκτήματα για τη λειτουργία μιας βιομηχανικής εγκατάστασης. Πρώτον, συμβάλλει στη σημαντική μείωση των απρογραμμάτιστων διακοπών λειτουργίας, καθώς οι επεμβάσεις συντήρησης μπορούν να προγραμματιστούν πριν την εμφάνιση μιας κρίσιμης αστοχίας. Δεύτερον, επιτρέπει την αποτελεσματικότερη διαχείριση των πόρων συντήρησης, καθώς οι εργασίες πραγματοποιούνται μόνο όταν είναι πραγματικά απαραίτητες. Τρίτον, βελτιώνει τη συνολική αξιοπιστία του εξοπλισμού και αυξάνει τη διαθεσιμότητα των γραμμών παραγωγής.

Συνεπώς, η σταδιακή μετάβαση από παραδοσιακές μορφές συντήρησης προς πιο προηγμένες, data-driven προσεγγίσεις αποτελεί σημαντικό βήμα για τη βελτίωση της λειτουργικής αποδοτικότητας των βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Η αξιοποίηση των δεδομένων που συλλέγονται από τη λειτουργία των μηχανών, σε συνδυασμό με την εφαρμογή κατάλληλων μεθόδων ανάλυσης, μπορεί να αποτελέσει τη βάση για την ανάπτυξη ολοκληρωμένων συστημάτων predictive maintenance στο μέλλον.

6. Μεθοδολογία Έρευνας, Συμπεράσματα και Προτάσεις (Research Methodology, Conclusions and Recommendations)

6.1 Μεθοδολογία Έρευνας (Research Methodology)

Η παρούσα μελέτη βασίστηκε στην ποσοτική ανάλυση πραγματικών δεδομένων συντήρησης βιομηχανικού εξοπλισμού, με στόχο την αξιολόγηση της λειτουργικής αξιοπιστίας των γραμμών παραγωγής και τον εντοπισμό των κύριων παραγόντων που επηρεάζουν τη διαθεσιμότητα τους. Τα δεδομένα συλλέχθηκαν από το σύστημα καταγραφής βλαβών της εγκατάστασης και αφορούν χρονική περίοδο τριών ετών, συγκεκριμένα από το 2023 έως και το 2025.

Η ανάλυση επικεντρώθηκε σε επτά κύριες μηχανές παραγωγής, οι οποίες λειτουργούν ως ανεξάρτητες μονάδες επεξεργασίας υλικού. Κάθε μηχανή παράγει τελικό προϊόν χωρίς να υπάρχει λειτουργική αλληλουχία μεταξύ των γραμμών παραγωγής. Η ιδιαιτερότητα αυτή επιτρέπει την ανεξάρτητη αξιολόγηση της λειτουργικής συμπεριφοράς κάθε γραμμής, χωρίς να επηρεάζεται άμεσα η παραγωγική λειτουργία των υπολοίπων μηχανών.

Στο πρώτο στάδιο της έρευνας πραγματοποιήθηκε συλλογή και κατηγοριοποίηση των καταγεγραμμένων βλαβών σε μηχανολογικές, ηλεκτρολογικές και λοιπές κατηγορίες τεχνικών προβλημάτων. Τα δεδομένα οργανώθηκαν σε μηνιαία και ετήσια βάση, επιτρέποντας τη συγκριτική αξιολόγηση της λειτουργικής συμπεριφοράς των γραμμών παραγωγής κατά τη διάρκεια της εξεταζόμενης περιόδου.

Στη συνέχεια εφαρμόστηκαν βασικές μέθοδοι ανάλυσης αξιοπιστίας του εξοπλισμού. Συγκεκριμένα υπολογίστηκαν οι δείκτες MTBF (Mean Time Between Failures) και MTTR (Mean Time To Repair), οι οποίοι χρησιμοποιούνται ευρέως στη βιομηχανική συντήρηση για την αξιολόγηση της συχνότητας εμφάνισης βλαβών και του χρόνου αποκατάστασης τους. Οι δείκτες αυτοί επέτρεψαν την ποσοτική εκτίμηση της λειτουργικής συμπεριφοράς των μηχανών και τη σύγκριση της απόδοσης τους σε διαφορετικές χρονικές περιόδους.

Παράλληλα, εφαρμόστηκε ανάλυση Pareto για την αναγνώριση των σημαντικότερων αιτιών βλαβών στις βασικές γραμμές παραγωγής της εγκατάστασης. Η

μεθοδολογία αυτή χρησιμοποιήθηκε για τον εντοπισμό των τεχνικών προβλημάτων που συμβάλλουν στο μεγαλύτερο ποσοστό των διακοπών λειτουργίας. Μέσω της προσέγγισης αυτής κατέστη δυνατή η ανάδειξη των κρίσιμων σημείων του εξοπλισμού που επηρεάζουν περισσότερο τη συνολική διαθεσιμότητα των γραμμών παραγωγής.

Τέλος, τα αποτελέσματα της ανάλυσης παρουσιάστηκαν μέσω γραφημάτων και συγκριτικών διαγραμμάτων που απεικονίζουν την εξέλιξη των ποσοστών downtime, των δεικτών αξιοπιστίας και των βασικών κατηγοριών βλαβών. Η οπτικοποίηση των δεδομένων συνέβαλε στην καλύτερη κατανόηση της λειτουργικής συμπεριφοράς των μηχανών και υποστήριξε την εξαγωγή τεκμηριωμένων συμπερασμάτων σχετικά με τη διαχείριση της συντήρησης του εξοπλισμού.

6.2 Συμπεράσματα (Conclusions)

Η ανάλυση των δεδομένων συντήρησης ανέδειξε ότι η λειτουργική αξιοπιστία των γραμμών παραγωγής παρουσιάζει σημαντικές διαφοροποιήσεις μεταξύ των επιμέρους μηχανών της εγκατάστασης. Ορισμένες γραμμές παραγωγής εμφανίζουν υψηλότερη συχνότητα εμφάνισης βλαβών και μεγαλύτερα ποσοστά downtime, γεγονός που επηρεάζει άμεσα τη συνολική παραγωγική αποδοτικότητα του συστήματος.

Η συγκριτική αξιολόγηση των δεδομένων για τα έτη 2023 έως 2025 έδειξε ότι η λειτουργική συμπεριφορά των μηχανών δεν παραμένει σταθερή αλλά μεταβάλλεται με την πάροδο του χρόνου. Οι μεταβολές αυτές μπορεί να σχετίζονται με παράγοντες όπως η ένταση χρήσης του εξοπλισμού, η φθορά μηχανικών εξαρτημάτων, η αποτελεσματικότητα των διαδικασιών συντήρησης ή οι λειτουργικές συνθήκες της παραγωγικής διαδικασίας.

Η ανάλυση των δεικτών αξιοπιστίας MTBF και MTTR κατέδειξε ότι οι δύο αυτοί δείκτες αποτελούν κρίσιμα εργαλεία για την αξιολόγηση της λειτουργικής απόδοσης του εξοπλισμού. Η αύξηση του MTBF υποδηλώνει μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα συνεχούς λειτουργίας μεταξύ των βλαβών, ενώ η μείωση του MTTR αντανakλά την ικανότητα του συστήματος συντήρησης να αποκαθιστά γρήγορα τη λειτουργία του εξοπλισμού μετά από τεχνικές αστοχίες.

Επιπλέον, η εφαρμογή της ανάλυσης Pareto ανέδειξε ότι ένα περιορισμένο σύνολο αιτιών ευθύνεται για σημαντικό ποσοστό των συνολικών διακοπών λειτουργίας. Η παρατήρηση αυτή επιβεβαιώνει τη σημασία της στοχευμένης αντιμετώπισης συγκεκριμένων τεχνικών προβλημάτων, καθώς η βελτίωση ορισμένων κρίσιμων υποσυστημάτων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της συνολικής διαθεσιμότητας των γραμμών παραγωγής.

Συνολικά, τα αποτελέσματα της μελέτης καταδεικνύουν ότι η συστηματική καταγραφή και ανάλυση των δεδομένων συντήρησης μπορεί να αποτελέσει σημαντικό εργαλείο για την κατανόηση της λειτουργικής συμπεριφοράς των βιομηχανικών εγκαταστάσεων. Η αξιοποίηση τέτοιων δεδομένων επιτρέπει τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων σχετικά με τη διαχείριση του εξοπλισμού και συμβάλλει στη βελτίωση της συνολικής αποδοτικότητας της παραγωγικής διαδικασίας.

6.3 Προτάσεις (Recommendations)

Με βάση τα αποτελέσματα της ανάλυσης προκύπτουν ορισμένες βασικές κατευθύνσεις για τη βελτίωση της διαχείρισης συντήρησης των γραμμών παραγωγής της εγκατάστασης. Πρώτον, η συστηματική παρακολούθηση των βασικών δεικτών αξιοπιστίας, όπως οι MTBF και MTTR, μπορεί να συμβάλει σημαντικά στην έγκαιρη αναγνώριση μεταβολών στη λειτουργική συμπεριφορά του εξοπλισμού. Η περιοδική αξιολόγηση των δεικτών αυτών επιτρέπει τον εντοπισμό τάσεων που ενδέχεται να υποδηλώνουν αυξημένη πιθανότητα εμφάνισης βλαβών.

Δεύτερον, η αξιοποίηση της ανάλυσης Pareto για την κατηγοριοποίηση των βλαβών μπορεί να υποστηρίξει τον αποτελεσματικό σχεδιασμό των προγραμμάτων συντήρησης. Η εστίαση των τεχνικών παρεμβάσεων σε συγκεκριμένα κρίσιμα υποσυστήματα του εξοπλισμού μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση των απρογραμμάτιστων διακοπών λειτουργίας.

Τρίτον, η περαιτέρω ανάπτυξη συστημάτων συλλογής και ανάλυσης δεδομένων λειτουργίας μπορεί να ενισχύσει τη δυνατότητα παρακολούθησης της κατάστασης του εξοπλισμού σε πραγματικό χρόνο. Η αξιοποίηση τέτοιων δεδομένων μπορεί να

υποστηρίζει την εφαρμογή πιο προηγμένων στρατηγικών διαχείρισης συντήρησης και να συμβάλει στη βελτίωση της λειτουργικής αξιοπιστίας των βιομηχανικών εγκαταστάσεων.

Συμπερασματικά, η εφαρμογή συστηματικών μεθόδων ανάλυσης δεδομένων συντήρησης αποτελεί σημαντικό εργαλείο για τη βελτίωση της διαχείρισης βιομηχανικού εξοπλισμού. Η αξιοποίηση των πληροφοριών που προκύπτουν από την καταγραφή και επεξεργασία των δεδομένων λειτουργίας μπορεί να συμβάλει στην αύξηση της διαθεσιμότητας του εξοπλισμού, στη μείωση των διακοπών λειτουργίας και στη συνολική βελτίωση της αποδοτικότητας της παραγωγικής διαδικασίας.

Βιβλιογραφία

Carvalho, T. P., Soares, F. A. A. M. N., Vita, R., Francisco, R. P., Basto, J. P., & Alcalá, S. G. S. (2019). A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106024. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106024>

Ebeling, C. E. (1997). *An introduction to reliability and maintainability engineering*. McGraw-Hill.

Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012>

Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239–242. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>

Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>

Lee, J., Wu, F., Zhao, W., Ghaffari, M., Liao, L., & Siegel, D. (2014). Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, methodology and applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 42(1–2), 314–334. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.06.004>

Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance* (2nd ed.). Industrial Press.

Nakajima, S. (1988). *Introduction to TPM: Total productive maintenance*. Productivity Press.

Perrow, C. (1999). *Normal accidents: Living with high-risk technologies* (Updated ed.). Princeton University Press.

Tsang, A. H. C. (2002). Strategic dimensions of maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 8(1), 7–39. <https://doi.org/10.1108/13552510210420577>

Wireman, T. (2010). *Benchmarking best practices in maintenance management* (2nd ed.). Industrial Press.

Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). SAGE Publications.

Carvalho, T. P., Soares, F. A. A. M. N., Vita, R., Francisco, R. P., Basto, J. P., & Alcalá, S. G. S. (2019). A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering*, 137, 106024. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106024>

Ebeling, C. E. (1997). *An introduction to reliability and maintainability engineering*. McGraw-Hill.

Jardine, A. K. S., Lin, D., & Banjevic, D. (2006). A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 20(7), 1483–1510. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012>

Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H.-G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering*, 6(4), 239–242. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>

Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2015). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001>

Lee, J., Wu, F., Zhao, W., Ghaffari, M., Liao, L., & Siegel, D. (2014). Prognostics and health management design for rotary machinery systems—Reviews, methodology and applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 42(1–2), 314–334. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.06.004>

Mobley, R. K. (2002). *An introduction to predictive maintenance* (2nd ed.). Butterworth-Heinemann.

Moubray, J. (1997). *Reliability-centered maintenance* (2nd ed.). Industrial Press.

Nakajima, S. (1988). Introduction to TPM: Total productive maintenance. Productivity Press.

Perrow, C. (1999). Normal accidents: Living with high-risk technologies (Updated ed.). Princeton University Press.

Tsang, A. H. C. (2002). Strategic dimensions of maintenance management. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 8(1), 7–39. <https://doi.org/10.1108/13552510210420577>

Wireman, T. (2010). Benchmarking best practices in maintenance management (2nd ed.). Industrial Press.

Yin, R. K. (2018). Case study research and applications: Design and methods (6th ed.). SAGE Publications.