



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

«Διαχείριση και Τεχνολογία Ποιότητας»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ:

**«Ψηφιακή Διαχείριση Ποιότητας και Ασφάλειας στις Βιομηχανικές
Διεργασίες: Η Συμβολή του Quality 4.0»**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΣ ΦΟΙΤΗΤΗΣ

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ: ΒΟΥΡΒΑΧΑΚΙΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

ΕΠΙΒΛΕΠΟΥΣΑ ΚΑΘΗΓΗΤΡΙΑ : ΤΣΙΤΣΙΦΛΗ ΣΤΑΥΡΟΥΛΑ

ΠΑΤΡΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2026

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



ΕΛΛΗΝΙΚΟ ΑΝΟΙΚΤΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ

«Διαχείριση και Τεχνολογία Ποιότητας»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ:

**«Ψηφιακή Διαχείριση Ποιότητας και Ασφάλειας στις Βιομηχανικές
Διεργασίες: Η Συμβολή του Quality 4.0»**

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΣ ΦΟΙΤΗΤΗΣ

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ: ΒΟΥΡΒΑΧΑΚΙΣ ΙΩΑΝΝΗΣ

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια

Τσιτσιφλή Σταυρούλα

Χημικός Μηχανικός

Δρ. Μηχανολόγων Μηχανικών

Συν - Επιβλέπουσα Καθηγήτρια

Ανεζίρη Όλγα

Διευθυντής Ερευνών

Δρ. Χημικός Μηχανικός

ΠΑΤΡΑ, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2026

Ευχαριστίες

Η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτέλεσε μια ιδιαίτερα σημαντική και απαιτητική διαδικασία, μέσα από την οποία είχα την ευκαιρία να εμβαθύνω σε ένα αντικείμενο άμεσα συνδεδεμένο με τη σύγχρονη βιομηχανική πραγματικότητα, την ποιότητα, την ασφάλεια και τον ψηφιακό μετασχηματισμό.

Θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά την επιβλέπουσα καθηγήτριά μου, κα Σταυρούλα Τσιτσιφλή, για την καθοδήγηση, τις ουσιαστικές παρατηρήσεις και τη συνεχή υποστήριξή της σε όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Ευχαριστώ επίσης την κα Όλγα Ανεζίρη για τη συμμετοχή της στην επίβλεψη και αξιολόγηση της εργασίας, καθώς και για τον χρόνο και τις παρατηρήσεις της.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένειά μου και τους ανθρώπους που με στήριξαν σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία διερευνά τον τρόπο με τον οποίο τα ψηφιακά δεδομένα παραγωγής, τα πληροφοριακά συστήματα και τα εργαλεία οπτικοποίησης συμβάλλουν στη βελτίωση της διαχείρισης ποιότητας και ασφάλειας σε βιομηχανικές διεργασίες, υπό το πρίσμα του πλαισίου Quality 4.0. Στόχος της εργασίας είναι η σύνθεση ενός εφαρμόσιμου πλαισίου ψηφιακής ωρίμανσης για βιομηχανικές μονάδες σε φάση ψηφιακής μετάβασης, με ταυτόχρονη γεφύρωση της διαχείρισης ποιότητας με τη διαχείριση κινδύνου και ασφάλειας — μια σύνδεση που παραμένει υπό-αναπτυγμένη στη διεθνή βιβλιογραφία.

Η μεθοδολογία υιοθετεί στρατηγική εμβαθυμένης μελέτης περίπτωσης (single embedded case study) με μικτή μεθοδολογική προσέγγιση παράλληλης σύγκλισης. Η εμπειρική ανάλυση τροφοδοτείται από τέσσερις πηγές δεδομένων: 1.108 ανωνυμοποιημένες εντολές παραγωγής έτους 2025 με 43 πεδία ανά εγγραφή, τέσσερις ημιδομημένες συνεντεύξεις με στελέχη διαφορετικών λειτουργικών περιοχών, εσωτερικά οργανωτικά έγγραφα και στοχευμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση της περιόδου 2019–2026. Η ανάλυση συνδυάζει περιγραφική στατιστική, ανάλυση αποκλίσεων, διερευνητική ανάλυση συσχετίσεων, θεματική ανάλυση κατά Braun και Clarke (2006), ανάλυση κενών και συνθετική διαμόρφωση πλαισίου ωρίμανσης.

Τα ευρήματα αναδεικνύουν συστηματικές αποκλίσεις μεταξύ προγραμματισμένων και πραγματικών μεγεθών παραγωγής, υψηλή μεταβλητότητα σε συγκεκριμένους παραγωγικούς πόρους και μερική μόνο μετατροπή των ψηφιακών δεδομένων σε αποφάσεις βελτίωσης — μοτίβο τυπικό της σύγχρονης ευρωπαϊκής μεσαίας βιομηχανίας. Η εργασία προτείνει εφαρμόσιμο Πλαίσιο Ψηφιακής Ωρίμανσης Quality 4.0 με έξι αλληλοτροφοδοτούμενους άξονες: data foundation, real-time visibility, material flow and spatial control, decision support and KPIs, organizational alignment και continuous improvement loop. Συνεισφέρει στη διεθνή βιβλιογραφία με τρία στοιχεία πρωτοτυπίας: εμπειρική τεκμηρίωση σε πραγματικό βιομηχανικό περιβάλλον, συστηματική γεφύρωση Quality 4.0 και Safety 4.0 και εστίαση στο πλαίσιο της μεσαίας ευρωπαϊκής βιομηχανίας.

Λέξεις-κλειδιά: Quality 4.0, ψηφιακός μετασχηματισμός, Διοίκηση Ολικής Ποιότητας, διαχείριση κινδύνου, Βιομηχανία 4.0, μελέτη περίπτωσης, πλαίσιο ωρίμανσης, ISO 9001, ISO 45001, βιομηχανικές διεργασίες

Abstract

This master's thesis investigates how digital production data, information systems and data visualization tools contribute to the improvement of quality and safety management in industrial processes, within the Quality 4.0 framework. The objective is to synthesize an applicable digital maturity framework for industrial units in a transitional phase of digitalization, while simultaneously bridging quality management with risk and safety management — a connection that remains under-developed in the international literature.

The methodology adopts a single embedded case study strategy with a convergent parallel mixed-methods approach. The empirical analysis draws on four data sources: 1,108 anonymized production work orders for the year 2025 with 43 fields per record, four semi-structured interviews with executives from different functional areas, internal organizational documents, and a systematic literature review covering the period 2019–2026. The analysis combines descriptive and inferential statistics, thematic analysis following Braun and Clarke (2006), gap analysis, and the abductive synthesis of a maturity framework.

The findings reveal systematic deviations between planned and actual production parameters, high variability across specific production resources, and only partial conversion of digital data into improvement decisions — a pattern typical of contemporary European medium-sized industry. The study proposes an applicable Quality 4.0 Digital Maturity Framework with six interdependent axes: data foundation, real-time visibility, material flow and spatial control, decision support and KPIs, organizational alignment, and continuous improvement loop. It contributes to the international literature through three elements of originality: empirical documentation in a real industrial environment, systematic bridging of Quality 4.0 and Safety 4.0, and a focus on the context of medium-sized European industry.

Keywords: Quality 4.0, digital transformation, Total Quality Management, risk management, Industry 4.0, case study, maturity framework, ISO 9001, ISO 45001, industrial processes

Περιεχόμενα

Ευχαριστίες	iv
Περίληψη	v
Abstract	vii
ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	xii
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	xiii
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ	14
1.1 Πλαίσιο και Σπουδαιότητα του Θέματος	14
1.2 Από τη Διοίκηση Ολικής Ποιότητας στο Quality 4.0	15
1.3 Ερευνητικό Πρόβλημα και Σκοπιμότητα της Έργασίας	16
1.4 Σκοπός, Στόχοι και Ερευνητικά Ερωτήματα	17
1.5 Στοιχεία Πρωτοτυπίας και Δομή της Εργασίας	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ	20
2.1 Από τη Διοίκηση Ολικής Ποιότητας στο Quality 4.0	20
2.1.1 Ιστορική Εξέλιξη της Διοίκησης Ποιότητας	20
2.1.2 Industry 4.0: Τεχνολογικό Πλαίσιο και Παραδειγματική Αλλαγή	22
2.1.3 Quality 4.0: Ορισμοί, Διαστάσεις και Χαρακτηριστικά	23
2.2 Ψηφιακός Μετασχηματισμός και Διαχείριση Ποιότητας	26
2.2.1 Τεχνολογίες-Επιταχυντές του Ψηφιακού Μετασχηματισμού	26
2.2.2 Δεδομενοκεντρική Διαχείριση Ποιότητας	28
2.2.3 Ολοκλήρωση Πληροφοριακών Συστημάτων στην Παραγωγή	29
2.2.4 Πλαίσια Ωρίμανσης Quality 4.0	31
2.3 Ψηφιακή Διαχείριση Ασφάλειας και Κινδύνου	33
2.3.1 Βασικές Αρχές Διαχείρισης Βιομηχανικής Ασφάλειας	33
2.3.2 Θεσμικό Πλαίσιο: ISO 31000 και ISO 45001	34

2.3.3 Safety 4.0 και Διαχείριση Κινδύνου στην Ψηφιακή Εποχή	34
2.3.4 Διαχείριση Ροής Υλικών, Χωροταξίας και Επιχειρησιακής Συνέχειας	36
2.3.5 Σύζευξη Διαχείρισης Ποιότητας και Ασφάλειας	37
2.4 Ερευνητικά Κενά	38
2.4.1 Κενό Εμπειρικής Τεκμηρίωσης	39
2.4.2 Υπό-Αναπτυγμένη Σύνδεση Ποιότητας με Ασφάλεια	39
2.4.3 Ασθενής Εστίαση στο Πλαίσιο της Μεσαίας Ευρωπαϊκής Βιομηχανίας	40
2.4.4 Έλλειψη Εφαρμόσιμων Πλαισίων Ωρίμανσης.....	40
2.4.5 Μεθοδολογικό Κενό: Έλλειψη Μικτών Προσεγγίσεων.....	41
2.4.6 Σύνοψη και Διασύνδεση με την Παρούσα Έρευνα	42
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ	43
3.1 Ερευνητικός Σχεδιασμός.....	43
3.1.1 Επιστημολογικό Πλαίσιο και Φιλοσοφία Έρευνας	43
3.1.2 Στρατηγική Έρευνας: Embedded Single Case Study	44
3.1.3 Μικτή Μεθοδολογική Προσέγγιση και Τριγωνοποίηση	45
3.2 Συλλογή Δεδομένων	47
3.2.1 Επισκόπηση Πηγών Δεδομένων	47
3.2.2 Πρωτογενή Ποσοτικά Δεδομένα: Σύνολο Εντολών Παραγωγής.....	47
3.2.3 Πρωτογενή Ποιοτικά Δεδομένα: Ημιδομημένες Συνεντεύξεις.....	48
3.2.4 Δευτερογενή Εσωτερικά Δεδομένα.....	49
3.2.5 Δευτερογενή Βιβλιογραφικά Δεδομένα.....	50
3.3 Ανάλυση Δεδομένων	51
3.3.1 Ποσοτική Ανάλυση των Δεδομένων Παραγωγής.....	51
3.3.2 Θεματική Ανάλυση των Συνεντεύξεων.....	52

3.3.3 Ανάλυση Κενών (Gap Analysis).....	53
3.3.4 Σύνθεση Πλαισίου Ψηφιακής Ωρίμανσης.....	53
3.3.5 Εγκυρότητα, Αξιοπιστία και Δεοντολογικά Ζητήματα	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ	55
4.1 Προφίλ της Μονάδας και Δομή των Δεδομένων	55
4.1.1 Περιγραφή της Εξεταζόμενης Μονάδας	55
4.1.2 Δομή και Έκταση του Συνόλου Δεδομένων.....	56
4.1.3 Έλεγχος Ποιότητας των Δεδομένων	57
4.2 Περιγραφική Ανάλυση και Αξιοπιστία των Δεδομένων Βάσης (EE1)	58
4.2.1 Κατηγορίες Προϊόντος και Όγκοι Παραγωγής.....	59
4.2.2 Αξιοπιστία των Δεδομένων Βάσης: Προγραμματισμός έναντι Πραγματικότητας	60
4.3 Ψηφιακή Ορατότητα και Μεταβλητότητα ανά Παραγωγικό Πόρο (EE2).....	62
4.3.1 Απόκλιση Χρόνου ανά Παραγωγικό Πόρο	62
4.3.2 Μεταβλητότητα Ροής και Παραγωγικότητας.....	63
4.3.3 Διαχρονική και Εποχική Ανάλυση.....	64
4.3.4 Συσχετίσεις μεταξύ Μεταβλητών Απόδοσης	65
4.4 Διαχείριση Κινδύνου, Απωλειών και Ασφάλειας (EE3)	67
4.5 Οργανωτική και Διαχειριστική Διάσταση: Ευρήματα Συνεντεύξεων (EE4)	68
4.5.1 Τα Πέντε Θέματα της Ανάλυσης.....	69
4.5.2 Σύγκλιση Ποσοτικών και Ποιοτικών Ευρημάτων	70
4.6 Ανάλυση Κενών και Σύνθεση Πλαισίου Ωρίμανσης (EE5)	70
4.6.1 Οι Έξι Άξονες του Προτεινόμενου Πλαισίου	72
4.6.2 Σύνοψη των Ευρημάτων.....	73
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ	74

5.1 Η Αξιοπιστία των Δεδομένων Βάσης ως Προϋπόθεση Ωριμότητας (EE1)	74
5.2 Ψηφιακή Ορατότητα, Μεταβλητότητα και η Απόσταση από τον Πραγματικό Χρόνο (EE2)	75
5.3 Η Σύζευξη Χρόνου, Απωλειών και Ασφάλειας (EE3)	76
5.4 Η Οργανωτική Διάσταση: Δεδομένα χωρίς Κοινή Εικόνα (EE4).....	77
5.5 Το Προτεινόμενο Πλαίσιο Ωρίμανσης σε Αντιπαραβολή με τα Υφιστάμενα Μοντέλα (EE5)	78
5.6 Θεωρητική και Πρακτική Συνεισφορά της Μελέτης	79
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	81
6.1 Σύνοψη των Κύριων Ευρημάτων	81
6.2 Θεωρητική Συνεισφορά.....	82
6.3 Πρακτικές Προτάσεις προς τη Βιομηχανία.....	82
6.4 Περιορισμοί της Έρευνας	83
6.5 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα	84
6.6 Καταληκτικές Παρατηρήσεις	85
Βιβλιογραφικές Αναφορές	86

ΠΙΝΑΚΑΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1. Εξελικτική πορεία της διοίκησης ποιότητας από τον τελικό έλεγχο στο Quality 4.0. Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα βάσει Broday (2022), Dias et al. (2022) και Antony et al. (2022).	16
Εικόνα 2. Πενταξονικό πλαίσιο διαστάσεων του Quality 4.0 και η εσωτερική τους διασύνδεση. Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα βάσει Ranjith Kumar et al. (2022) και Antony et al. (2022).	32
Εικόνα 3. Διάγραμμα ροής του ερευνητικού σχεδιασμού: από τα ερευνητικά ερωτήματα στο τελικό πλαίσιο ωρίμανσης. Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα βάσει Yin (2018), Creswell και Plano Clark (2018) και Denzin (1978).	46
Εικόνα 4. Κατανομή της απόκλισης συνολικού χρόνου παραγωγής ($\Delta T\%$) μεταξύ πραγματικού και προγραμματισμένου χρόνου. Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα από τα δεδομένα παραγωγής ($n=1.000$).	61
Εικόνα 5. Κατανομή της απόκλισης συνολικού χρόνου παραγωγής ($\Delta T\%$) ανά παραγωγικό πόρο R1 έως R5. Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα από τα δεδομένα παραγωγής.	63
Εικόνα 6. Συντελεστής μεταβλητότητας ($CV\%$) της ροής και της παραγωγικότητας εργασίας ανά παραγωγικό πόρο. Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα από τα δεδομένα παραγωγής.	64
Εικόνα 7. Μηνιαία εξέλιξη του πλήθους εντολών παραγωγής και του μέσου throughput κατά το έτος 2025. Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα από τα δεδομένα παραγωγής.	65
Εικόνα 8. Σχέση μεταξύ ροής (throughput) και παραγωγικότητας εργασίας ανά εντολή (λογαριθμικοί άξονες). Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα από τα δεδομένα παραγωγής.	66
Εικόνα 9. Ραδιακό διάγραμμα ωρίμανσης: υφιστάμενη (as-is) έναντι επιθυμητής (to-be) κατάστασης ανά άξονα του προτεινόμενου πλαισίου. Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα.	71

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1. Συγκριτική αποτύπωση των χαρακτηριστικών της Διοίκησης Ολικής Ποιότητας (TQM) και του Quality 4.0.....	26
Πίνακας 2. Αντιστοίχιση τεχνολογιών Industry 4.0 με λειτουργίες διαχείρισης ασφάλειας και κινδύνου.	38
Πίνακας 3. Αντιστοίχιση ερευνητικών ερωτημάτων, πηγών δεδομένων και αναλυτικών μεθόδων.....	51
Πίνακας 4. Δομή του συνόλου δεδομένων των 1.108 εντολών παραγωγής ανά λειτουργική κατηγορία πεδίων.....	57
Πίνακας 5. Περιγραφικά στατιστικά των κύριων μεταβλητών παραγωγής (σύνολο εντολών).	59
Πίνακας 6. Συγκριτικά στατιστικά απόδοσης ανά κατηγορία προϊόντος (P-FIN έναντι P-SEMI).	60
Πίνακας 7. Κατανομή των εντολών παραγωγής ανά κατηγορία απόκλισης συνολικού χρόνου.	62
Πίνακας 8. Δείκτες απόδοσης και μεταβλητότητας ανά παραγωγικό πόρο.	63
Πίνακας 9. Συντελεστές συσχέτισης Pearson μεταξύ κύριων μεταβλητών απόδοσης.	66
Πίνακας 10. Βιβλίο κωδικοποίησης της θεματικής ανάλυσης των συνεντεύξεων (codebook).	68
Πίνακας 11. Μήτρα ωρίμανσης Quality 4.0: υφιστάμενη και επιθυμητή κατάσταση ανά άξονα.....	72
Πίνακας 12. Αντιστοίχιση των κύριων ευρημάτων με τη βιβλιογραφία και τη φύση της συνεισφοράς.....	79
Πίνακας 13. Προτεινόμενες ενέργειες παρέμβασης ανά άξονα ωρίμανσης.....	83

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Πλαίσιο και Σπουδαιότητα του Θέματος

Η Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση (Industry 4.0), όπως διατυπώθηκε αρχικά από την ομάδα εργασίας της γερμανικής κυβέρνησης (Kagermann et al., 2013) και διαδόθηκε διεθνώς ως κεντρικός άξονας του ψηφιακού μετασχηματισμού της οικονομίας (Schwab, 2017), έχει μεταβάλει ριζικά τη δομή, τις διαδικασίες και τις στρατηγικές προτεραιότητες των βιομηχανικών οργανισμών. Η σύζευξη κυβερνοφυσικών συστημάτων (Cyber-Physical Systems), Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), υπολογιστικού νέφους, τεχνητής νοημοσύνης και ανάλυσης μεγάλων δεδομένων (big data analytics) έχει δημιουργήσει νέες δυνατότητες παραγωγής αξίας, ενώ παράλληλα ανασυγκροτεί τις απαιτήσεις διαχείρισης ποιότητας και ασφάλειας στις βιομηχανικές διεργασίες (Ghobakhloo, 2020· Sony & Naik, 2020). Στο σύγχρονο αυτό πλαίσιο, η ποιότητα δεν περιγράφεται πλέον ως αυτόνομη λειτουργία τελικού ελέγχου, αλλά ως διασταυρούμενη ικανότητα του οργανισμού να μετατρέπει δεδομένα παραγωγής σε αποφάσεις (Antony et al., 2022).

Στο ίδιο πλαίσιο εδραιώνεται η έννοια του *Quality 4.0*, η οποία αναφέρεται στη συστηματική ενσωμάτωση των τεχνολογιών της Βιομηχανίας 4.0 στη Διοίκηση Ολικής Ποιότητας (Total Quality Management). Σύμφωνα με τη σύγχρονη βιβλιογραφία, το Quality 4.0 δεν συνιστά απλή τεχνολογική αναβάθμιση των παραδοσιακών εργαλείων διασφάλισης ποιότητας, αλλά ολιστικό υπόδειγμα διοίκησης που συνδέει τεχνολογία, ανθρώπινο παράγοντα, διαδικασίες και δεδομένα με στόχο τη βελτίωση της οργανωτικής απόδοσης (Dias et al., 2022· Liu et al., 2023). Η εξέλιξη αυτή αποτυπώνεται και στη συνεξέλιξη των διεθνών προτύπων διαχείρισης: το ISO 9001:2015 υιοθετεί την προσέγγιση βάσει διεργασιών και σκέψης κινδύνου (International Organization for Standardization [ISO], 2015), το ISO 45001:2018 ενσωματώνει την ασφάλεια και υγεία στην εργασία ως διοικητική λειτουργία (ISO, 2018b), ενώ το ISO 31000:2018 παρέχει το γενικό πλαίσιο διαχείρισης κινδύνου που τέμνει εγκάρσια ποιότητα και ασφάλεια (ISO, 2018a).

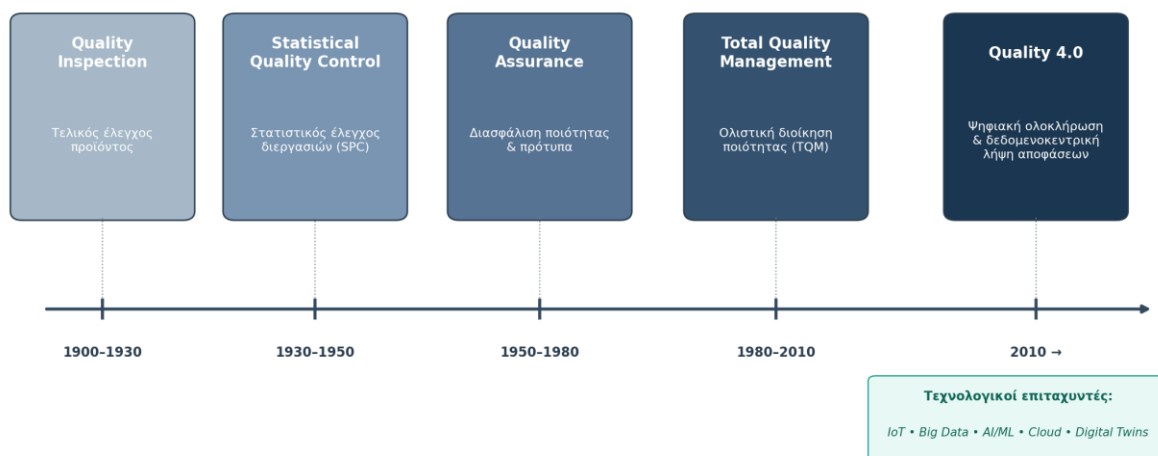
Η εφαρμοσμένη σπουδαιότητα του ζητήματος είναι σαφής: η ποιότητα και η ασφάλεια δεν αποτελούν ξεχωριστές διοικητικές λειτουργίες, αλλά αλληλένδετες διαστάσεις της

συνολικής βιομηχανικής απόδοσης (Fonseca et al., 2021· Komkowsky et al., 2023). Όπως επισημαίνουν οι Komkowsky et al. (2023), η σύζευξη της ψηφιακής διαχείρισης ποιότητας με τη διαχείριση ασφάλειας παραμένει υπό-αναπτυγμένη σε εφαρμοσμένα ερευνητικά πλαίσια, παρότι αποτελεί κρίσιμη προϋπόθεση για τη βιωσιμότητα και την ανθεκτικότητα των σύγχρονων παραγωγικών συστημάτων. Η στρατηγική σημασία του Quality 4.0 ενισχύεται περαιτέρω από το γεγονός ότι ο ψηφιακός μετασχηματισμός της βιομηχανίας συνδέεται άμεσα με στόχους βιωσιμότητας, εξοικονόμησης πόρων και μείωσης απωλειών στη ροή υλικών (Ghobakhloo, 2020), στοιχεία τα οποία αποκτούν ιδιαίτερη βαρύτητα για βιομηχανικούς κλάδους με αυξημένη εξάρτηση από φυσικούς πόρους και αυστηρές απαιτήσεις ασφάλειας, όπως ο κλάδος παραγωγής γεωργικών σκευασμάτων στον οποίο εντάσσεται η μελέτη περίπτωσης της παρούσας εργασίας.

1.2 Από τη Διοίκηση Ολικής Ποιότητας στο Quality 4.0

Η ιστορική εξέλιξη της ποιότητας ως διοικητικής λειτουργίας ακολουθεί μία διακριτή διαδρομή τεσσάρων διαδοχικών φάσεων: από τον τελικό έλεγχο (quality inspection) στις αρχές του 20ού αιώνα, στον στατιστικό έλεγχο ποιότητας (statistical quality control), στη διασφάλιση ποιότητας (quality assurance) και τελικά στη Διοίκηση Ολικής Ποιότητας από τη δεκαετία του 1980 και εξής (Broday, 2022· Liu et al., 2023). Η σύγχρονη μετάβαση στο Quality 4.0 συνιστά την πέμπτη ιστορική φάση και εδράζεται στην ψηφιακή ολοκλήρωση και στη δεδομενοκεντρική λήψη αποφάσεων (Dias et al., 2022). Η συνολική εξελικτική πορεία αποτυπώνεται σχηματικά στην Εικόνα 1.

Εξελικτική Πορεία της Διοίκησης Ποιότητας: από τον Έλεγχο στο Quality 4.0



Εικόνα 1. Εξελικτική πορεία της διοίκησης ποιότητας από τον τελικό έλεγχο στο Quality 4.0. Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα βάσει Broday (2022), Dias et al. (2022) και Antony et al. (2022).

Η μετάβαση αυτή δεν είναι ούτε γραμμική ούτε αμιγώς τεχνοκρατική. Σύμφωνα με τους Ranjith Kumar et al. (2022), η ωρίμανση Quality 4.0 απαιτεί ταυτόχρονη ανάπτυξη πέντε αλληλένδετων διαστάσεων: δεδομένων (data), τεχνολογίας (technology), διαδικασιών (process), ανθρώπων (people) και στρατηγικής (strategy). Οι Sony et al. (2021) προσθέτουν ότι η οργανωτική ετοιμότητα (readiness), η ηγεσία και η κουλτούρα συνεχούς βελτίωσης αποτελούν κρίσιμους παράγοντες επιτυχίας. Παράλληλα, η σύνδεση του Quality 4.0 με αναγνωρισμένα μοντέλα επιχειρηματικής αριστείας —όπως το EFQM 2020 (Fonseca et al., 2021)— καθιστά εμφανές ότι πρόκειται για ένα διεπιστημονικό πεδίο με σαφή στρατηγικό αντίκτυπο, του οποίου η μελέτη απαιτεί ισόρροπη ενσωμάτωση τεχνικών, οργανωτικών και ανθρωποκεντρικών παραμέτρων.

1.3 Ερευνητικό Πρόβλημα και Σκοπιμότητα της Έργασίας

Παρά τη ραγδαία ανάπτυξη της διεθνούς βιβλιογραφίας περί Quality 4.0, η πλειονότητα των πρόσφατων μελετών παραμένει σε θεωρητικό ή βιβλιομετρικό επίπεδο (Liu et al., 2023· Ferraz Junior & Gonçalves, 2025). Οι εμπειρικές αναλύσεις σε πραγματικά βιομηχανικά περιβάλλοντα, ιδίως αυτές που αξιοποιούν ποσοτικά δεδομένα παραγωγής σε επίπεδο εντολών εργασίας (work orders), παραμένουν περιορισμένες. Παράλληλα, η ολοκλήρωση

της ψηφιακής διαχείρισης ποιότητας με τη διαχείριση ασφάλειας και κινδύνου συνιστά ένα από τα πλέον υπό-διερευνημένα πεδία (Bousdekis et al., 2023· Komkowski et al., 2023).

Στο εφαρμοσμένο πεδίο, πολλοί οργανισμοί έχουν επενδύσει σε ώριμη ψηφιακή υποδομή (ERP, WMS, BI), ωστόσο η μετατροπή των καταγεγραμμένων δεδομένων σε αποφάσεις βελτίωσης παραμένει μερική (Antony et al., 2022· Sony et al., 2021). Το κενό μεταξύ ψηφιακής καταγραφής (digitization) και δεδομενοκεντρικής διοίκησης (data-driven management) αποτελεί έναν από τους πλέον κρίσιμους ανασταλτικούς παράγοντες ωρίμανσης Quality 4.0. Η παρούσα εργασία επιχειρεί να καλύψει αυτό το διπλό κενό: αφενός εμπειρικά, μέσω της ανάλυσης ενός πραγματικού συνόλου ποσοτικών δεδομένων παραγωγής 1.108 εντολών εργασίας του έτους 2025· αφετέρου θεωρητικά, γεφυρώνοντας τη διαχείριση ποιότητας με τη διαχείριση ασφάλειας και κινδύνου σε ένα ενοποιημένο πλαίσιο ωρίμανσης.

Η σκοπιμότητα της εργασίας ενισχύεται και από τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της επιλεγείσας μονάδας: μιας βιομηχανικής μονάδας παραγωγής γεωργικών προϊόντων η οποία βρίσκεται σε φάση ψηφιακής ωρίμανσης, διαθέτοντας ώριμο τεχνολογικό υπόβαθρο αλλά μερική μόνο μετατροπή των δεδομένων σε αποφάσεις. Πρόκειται για ένα προφίλ ιδιαίτερα αντιπροσωπευτικό της σύγχρονης ελληνικής και ευρωπαϊκής μεσαίας βιομηχανίας, η οποία βιώνει την ένταση μεταξύ διαθεσιμότητας δεδομένων και ικανότητας αξιοποίησής τους. Η εμπειρική τεκμηρίωση μέσω ενός τέτοιου περιβάλλοντος προσφέρει μεταφέρσιμα ευρήματα και πρακτικές κατευθύνσεις, ταυτόχρονα αναδεικνύοντας τις θεσμικές, οργανωτικές και τεχνολογικές προϋποθέσεις για την ώριμη εφαρμογή του πλαισίου Quality 4.0 (Sony et al., 2021· Ranjith Kumar et al., 2022).

1.4 Σκοπός, Στόχοι και Ερευνητικά Ερωτήματα

Σκοπός της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας είναι η διερεύνηση του τρόπου με τον οποίο τα ψηφιακά δεδομένα παραγωγής, τα πληροφοριακά συστήματα και τα εργαλεία οπτικοποίησης συμβάλλουν στη βελτίωση της διαχείρισης ποιότητας και ασφάλειας σε βιομηχανικές διεργασίες, υπό το πρίσμα του πλαισίου Quality 4.0. Από τον γενικό αυτό σκοπό απορρέει το κύριο ερευνητικό ερώτημα (ΕΕ0), το οποίο αναλύεται σε πέντε επιμέρους ερωτήματα: την αξιοπιστία των δεδομένων βάσης (ΕΕ1), την ψηφιακή ορατότητα της

παραγωγής (EE2), τη διαχείριση κινδύνου και ασφάλειας (EE3), την οργανωτική και διαχειριστική διάσταση (EE4) και τη σύνθεση πλαισίου ωρίμανσης Quality 4.0 (EE5).

Η εργασία θέτει τρεις διαβαθμισμένους στόχους. Ο πρώτος, θεωρητικού χαρακτήρα, αφορά τη συνθετική αποτύπωση της εξέλιξης από τη Διοίκηση Ολικής Ποιότητας στο Quality 4.0, με έμφαση στη σύζευξη του πλαισίου της Βιομηχανίας 4.0 με τα συστήματα διαχείρισης ποιότητας (ISO, 2015) και ασφάλειας (ISO, 2018b). Ο δεύτερος, εμπειρικού χαρακτήρα, αφορά την ποσοτική ανάλυση 1.108 εντολών παραγωγής έτους 2025 σε ανωνυμοποιημένη μορφή, με σκοπό τον προσδιορισμό αποκλίσεων, μεταβλητοτήτων και σημείων ανωριμότητας. Ο τρίτος, που συνιστά την κεντρική συμβολή της εργασίας, αφορά τη διαμόρφωση Πλαισίου Ψηφιακής Ωρίμανσης Quality 4.0 για βιομηχανικές διεργασίες, οργανωμένου σε έξι αλληλοτροφοδοτούμενους άξονες, και τη διατύπωση εφαρμόσιμων προτάσεων προς τη βιομηχανία.

1.5 Στοιχεία Πρωτοτυπίας και Δομή της Εργασίας

Η πρωτοτυπία της εργασίας εδράζεται σε τρεις διακριτές διαστάσεις. Πρώτον, εφαρμόζει το πλαίσιο Quality 4.0 σε πραγματικό βιομηχανικό περιβάλλον με ποσοτικά δεδομένα παραγωγής, σε αντίθεση με την πλειονότητα της σύγχρονης βιβλιογραφίας που παραμένει σε θεωρητικό επίπεδο (Liu et al., 2023· Ferraz Junior & Gonçalves, 2025). Δεύτερον, γεφυρώνει την ψηφιακή διαχείριση ποιότητας με τη διαχείριση ασφάλειας και κινδύνου, μία σύνδεση που, όπως επισημαίνουν οι Komkowsky et al. (2023), παραμένει υπό-διερευνημένη στη διεθνή βιβλιογραφία. Τρίτον, προτείνει συγκεκριμένο και εφαρμόσιμο πλαίσιο ωρίμανσης, βασισμένο σε εμπειρικά τεκμηριωμένα ευρήματα και ευθυγραμμισμένο με τις διεθνείς αρχές διαχείρισης κινδύνου (ISO, 2018a) και προληπτικής συντήρησης (Carvalho et al., 2019· Werbińska-Wojciechowska & Winiarska, 2023).

Η εργασία διαρθρώνεται σε έξι κεφάλαια. Το παρόν εισαγωγικό κεφάλαιο θέτει το πλαίσιο, το ερευνητικό πρόβλημα, τα ερωτήματα και τη συνεισφορά της μελέτης. Το Κεφάλαιο 2 παρουσιάζει τη βιβλιογραφική ανασκόπηση, διαρθρωμένη σε τέσσερις θεματικές ενότητες (από τη Διοίκηση Ολικής Ποιότητας στο Quality 4.0, ψηφιακός μετασχηματισμός και ποιότητα, ψηφιακή διαχείριση ασφάλειας και κινδύνου, ερευνητικά κενά). Το Κεφάλαιο 3 αναπτύσσει τη μεθοδολογία της εμβαθυμένης μελέτης περίπτωσης. Το Κεφάλαιο 4 αποτελεί

τον εμπειρικό πυρήνα της εργασίας, παρουσιάζοντας τα ποσοτικά και ποιοτικά ευρήματα από τη μελέτη περίπτωσης. Το Κεφάλαιο 5 συζητά τα αποτελέσματα σε αντιπαραβολή με τη διεθνή βιβλιογραφία και το Κεφάλαιο 6 διατυπώνει τα τελικά συμπεράσματα και τις προτάσεις προς τη βιομηχανία και τη μελλοντική έρευνα.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει συστηματικά τη διεθνή βιβλιογραφία που πλαισιώνει την έννοια του Quality 4.0, ξεκινώντας από την ιστορική εξέλιξη της Διοίκησης Ολικής Ποιότητας και την παράλληλη ανάδυση της Βιομηχανίας 4.0, και εμβαθύνοντας στις τεχνολογίες, στα πλαίσια ωρίμανσης και στη συσχέτιση της ψηφιακής διαχείρισης ποιότητας με τη διαχείριση ασφάλειας και κινδύνου. Η ανασκόπηση οργανώνεται σε τέσσερις θεματικές ενότητες (2.1–2.4) και ολοκληρώνεται με την οριοθέτηση των ερευνητικών κενών που τεκμηριώνουν τη συνεισφορά της παρούσας μελέτης. Οι πηγές προέρχονται κατά πλειονότητα από επιστημονικά περιοδικά της τελευταίας πενταετίας, ώστε να αντικατοπτρίζουν την τρέχουσα κατάσταση του πεδίου.

2.1 Από τη Διοίκηση Ολικής Ποιότητας στο Quality 4.0

2.1.1 Ιστορική Εξέλιξη της Διοίκησης Ποιότητας

Η διοίκηση ποιότητας ως πειθαρχημένο πεδίο διοικητικής επιστήμης δεν εμφανίζεται απότομα, αλλά αναπτύσσεται μέσα από διαδοχικά παραδείγματα, καθένα από τα οποία απαντούσε σε διαφορετικές προκλήσεις της παραγωγής της εποχής του. Στις αρχές του 20ού αιώνα, στη φάση της μαζικής βιομηχανοποίησης, η ποιότητα ταυτιζόταν με τον τελικό έλεγχο του προϊόντος (quality inspection), όπου εξειδικευμένοι ελεγκτές διαχώριζαν τα συμμορφούμενα από τα μη-συμμορφούμενα τεμάχια στο τέλος της παραγωγικής διαδικασίας (Garvin, 1988· Broday, 2022). Η προσέγγιση αυτή ήταν αντιδραστική, εκ των υστέρων και εξαιρετικά δαπανηρή, καθώς δεν παρενέβαινε στις αιτίες των αποκλίσεων.

Η σύνδεση της ποιότητας με τη στατιστική επιστήμη συντελέστηκε στις δεκαετίες του 1920 και 1930 με το έργο του Walter A. Shewhart στα εργαστήρια της Bell Telephone. Ο Shewhart εισήγαγε τις έννοιες του στατιστικού ελέγχου διεργασίας (Statistical Process Control, SPC) και των διαγραμμάτων ελέγχου (control charts), τοποθετώντας την ποιότητα στο επίπεδο της διεργασίας παρά του προϊόντος (Liu et al., 2023· Broday, 2022). Μετά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, οι W. Edwards Deming και Joseph M. Juran μετέφεραν αυτή τη φιλοσοφία στην Ιαπωνία, διαμορφώνοντας τις βάσεις μιας ολοκληρωμένης διοίκησης που έβλεπε την

ποιότητα ως ευθύνη της ηγεσίας και ως αποτέλεσμα συνεχούς βελτίωσης (Deming, 1986· Juran, 1989).

Στη δεκαετία του 1960, οι Armand Feigenbaum και Kaoru Ishikawa εισήγαγαν τις έννοιες του Total Quality Control (TQC) και της εμπλοκής όλων των τμημάτων του οργανισμού στη διασφάλιση της ποιότητας (Feigenbaum, 1991· Ishikawa, 1985). Παράλληλα, ο Philip B. Crosby τόνισε ότι «η ποιότητα είναι δωρεάν» (quality is free), εφόσον οι οργανισμοί επενδύσουν στην πρόληψη παρά στη διόρθωση των αποτυχιών (Crosby, 1979). Από αυτές τις παραδόσεις προέκυψε στη δεκαετία του 1980 η Διοίκηση Ολικής Ποιότητας (Total Quality Management, TQM) ως ολιστικό υπόδειγμα διοίκησης που ενσωματώνει τη φιλοσοφία της συνεχούς βελτίωσης (kaizen), τη συμμετοχή του ανθρώπινου παράγοντα, τη μέτρηση με δείκτες και τον προσανατολισμό προς τον πελάτη (Dias et al., 2022· Liu et al., 2023).

Η θεσμοθέτηση αυτής της φιλοσοφίας σε διεθνές επίπεδο πραγματοποιήθηκε με τη σειρά προτύπων ISO 9000, η οποία πρωτοδημοσιεύθηκε το 1987 και έχει υποστεί διαδοχικές αναθεωρήσεις (1994, 2000, 2008, 2015). Η αναθεώρηση του 2015 (ISO 9001:2015) εισήγαγε δύο σημαντικά στοιχεία τα οποία προοιωνίζουν τη μετάβαση στο Quality 4.0: την προσέγγιση βάσει διεργασιών (process approach) και τη σκέψη κινδύνου (risk-based thinking) ως θεμελιώδη αρχή σχεδιασμού του συστήματος διαχείρισης ποιότητας (International Organization for Standardization [ISO], 2015· Fonseca et al., 2021). Η ενσωμάτωση της σκέψης κινδύνου στο πυρήνα του συστήματος ποιότητας αποτελεί καίριο σημείο σύζευξης με τη διαχείριση ασφάλειας.

Πέρα από τις προαναφερθείσες προσωπικότητες, σημαντική συνεισφορά στη συστηματοποίηση του πεδίου είχε ο David A. Garvin (1988), ο οποίος εισήγαγε ένα ευρέως αναγνωρισμένο πλαίσιο οκτώ διαστάσεων της ποιότητας προϊόντος: επιδόσεις (performance), χαρακτηριστικά (features), αξιοπιστία (reliability), συμμόρφωση (conformance), διάρκεια ζωής (durability), συντηρησιμότητα (serviceability), αισθητική (aesthetics) και αντιληπτή ποιότητα (perceived quality). Το πλαίσιο αυτό παρείχε για πρώτη φορά συστηματική γλώσσα μέτρησης και σύγκρισης της ποιότητας πέρα από τη συμμόρφωση με τεχνικές προδιαγραφές, εισάγοντας την έννοια της πολυδιάστατης αντίληψης της ποιότητας από τον τελικό χρήστη. Παράλληλα, στον ευρωπαϊκό χώρο, η ίδρυση του European Foundation for Quality Management το 1988 και η ανάπτυξη του EFQM

Excellence Model προσέφεραν ένα ολιστικό μοντέλο επιχειρηματικής αριστείας που συνέδεσε την ποιότητα με ευρύτερες έννοιες όπως η ηγεσία, η στρατηγική, η διαχείριση πόρων και η κοινωνική ευθύνη (Fonseca et al., 2021). Η αναθεώρηση του μοντέλου το 2020 ενσωμάτωσε άμεσα και τη διάσταση του ψηφιακού μετασχηματισμού, λειτουργώντας ως γέφυρα προς το Quality 4.0.

2.1.2 Industry 4.0: Τεχνολογικό Πλαίσιο και Παραδειγματική Αλλαγή

Παράλληλα με την εξέλιξη της διοίκησης ποιότητας, στις πρώτες δύο δεκαετίες του 21ου αιώνα εκδηλώνεται η Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση, η οποία αναδιαμορφώνει ριζικά τον τρόπο παραγωγής, διανομής και κατανάλωσης. Ο όρος Industry 4.0 διατυπώθηκε αρχικά το 2011 στο πλαίσιο πρωτοβουλίας της γερμανικής κυβέρνησης και τυποποιήθηκε στην αναφορά της ομάδας εργασίας του Acatech (Kagermann et al., 2013). Στη συνέχεια διαδόθηκε διεθνώς ως αναλυτικό πλαίσιο του ψηφιακού μετασχηματισμού της βιομηχανίας (Schwab, 2017· Lasi et al., 2014).

Σύμφωνα με τους Xu et al. (2018), η Industry 4.0 χαρακτηρίζεται από τη σύζευξη εννέα ψηφιακών τεχνολογιών — Διαδικτύου των Πραγμάτων, ανάλυσης μεγάλων δεδομένων, υπολογιστικού νέφους, κυβερνοφυσικών συστημάτων, προσομοίωσης, αυτόνομων ρομπότ, προσθετικής κατασκευής, επαυξημένης πραγματικότητας και κυβερνοασφάλειας — οι οποίες συγκλίνουν σε μία ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική παραγωγής. Οι Lee et al. (2015) προτείνουν την αρχιτεκτονική 5C (Connection, Conversion, Cyber, Cognition, Configuration) ως αναφορικό μοντέλο εφαρμογής κυβερνοφυσικών συστημάτων στη βιομηχανική παραγωγή. Παράλληλα, οι Zhong et al. (2017) και οι Sony και Naik (2020) τονίζουν ότι η Industry 4.0 δεν αποτελεί απλώς τεχνολογική αναβάθμιση, αλλά συστημική παραδειγματική αλλαγή που ενοποιεί τον φυσικό, ψηφιακό και βιολογικό κόσμο.

Η σύνδεση της Industry 4.0 με τη διοίκηση ποιότητας υπήρξε ζητούμενο από τα πρώτα χρόνια ανάδειξης της έννοιας. Οι Park et al. (2017) διατύπωσαν την ανάγκη οικοδόμησης μιας νέας κουλτούρας διοίκησης ποιότητας στην εποχή της Τέταρτης Βιομηχανικής Επανάστασης, υπογραμμίζοντας ότι οι παραδοσιακές μέθοδοι TQM απαιτούν επανανοηματοδότηση. Με τη σειρά τους, οι Chiarini (2020) και οι Sader et al. (2019) διερεύνησαν συστηματικά τη σύνδεση μεταξύ TQM και Industry 4.0, τεκμηριώνοντας ότι οι

τεχνολογίες της Industry 4.0 αποτελούν κρίσιμους επιταχυντές για τη βελτίωση των πρακτικών διοίκησης ποιότητας.

Συμπληρωματικά προς τη συζήτηση των τεχνολογιών, οι Hermann et al. (2016) διατυπώνουν τέσσερις θεμελιώδεις σχεδιαστικές αρχές της Industry 4.0 που συμπυκνώνουν την παραδειγματική αλλαγή: διασυνδεσιμότητα (interconnection), διαφάνεια πληροφορίας (information transparency), αποκεντρωμένες αποφάσεις (decentralized decisions) και τεχνική υποστήριξη (technical assistance) προς τους εργαζομένους. Από αυτές, η διαφάνεια πληροφορίας — η οποία προϋποθέτει την ικανότητα των πληροφοριακών συστημάτων να παρέχουν στους χρήστες τα κατάλληλα δεδομένα στον κατάλληλο χρόνο για συγκεκριμένες αποφάσεις — αποτελεί τη γέφυρα μεταξύ της τεχνολογικής υποδομής και της δεδομενοκεντρικής διοίκησης ποιότητας. Η αρχή της αποκεντρωμένης λήψης αποφάσεων ευνοεί, αντιστοίχως, τη μετατόπιση της εξουσίας λήψης αποφάσεων ποιότητας από το ανώτατο διοικητικό επίπεδο προς τους εμπρόσθιους ρόλους που έχουν άμεση πρόσβαση στα δεδομένα παραγωγής (Ghobakhloo, 2020· Xu et al., 2018).

Η ωρίμανση της έννοιας Industry 4.0 σε ελαφρώς ώριμο διεθνές πλαίσιο τεκμηριώνεται και μέσω πλαισίων αναφοράς όπως το Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI 4.0), το οποίο διαρθρώνει το πεδίο σε τρεις άξονες: τα επίπεδα της αλυσίδας αξίας του προϊόντος, την ιεραρχία της παραγωγής (από φυσικό εξοπλισμό μέχρι σύνδεση με ευρύτερο οικοσύστημα) και τα επίπεδα ψηφιοποίησης (Kagermann et al., 2013· Sony & Naik, 2020). Η ύπαρξη τέτοιων πλαισίων αναδεικνύει ότι η Industry 4.0, παρότι ξεκίνησε ως πολιτική πρωτοβουλία, έχει εξελιχθεί σε δομημένο ερευνητικό αντικείμενο με τυποποιημένα εργαλεία ανάλυσης και αξιολόγησης.

2.1.3 Quality 4.0: Ορισμοί, Διαστάσεις και Χαρακτηριστικά

Από τη σύζευξη της TQM και της Industry 4.0 αναδύεται μια νέα παραδειγματική φάση: το Quality 4.0. Παρά τη ραγδαία ανάπτυξή της, η έννοια δεν έχει ακόμη τυποποιημένο ορισμό. Ο Dan Jacob, μέσω της εταιρείας ανάλυσης LNS Research, εισήγαγε το 2017 ένα από τα πρώτα συστηματικά πλαίσια Quality 4.0, αναγνωρίζοντας έντεκα διαστάσεις: data, analytics, connectivity, collaboration, app development, scalability, management systems, compliance,

culture, leadership και competency development (Jacob, 2017· Antony et al., 2022). Ωστόσο, στην ακαδημαϊκή βιβλιογραφία οι ορισμοί ποικίλλουν.

Οι Dias et al. (2022), σε μία από τις πλέον αναφερόμενες συστηματικές ανασκοπήσεις, ορίζουν το Quality 4.0 ως «τη ψηφιοποίηση των πρακτικών διοίκησης ολικής ποιότητας μέσω της ενσωμάτωσης τεχνολογιών της Βιομηχανίας 4.0, με στόχο την επίτευξη ανωτέρων επιπέδων ποιότητας προϊόντων, διεργασιών και επιχειρηματικής απόδοσης». Οι Sony et al. (2021), προσεγγίζοντας το θέμα από τη σκοπιά της οργανωτικής ετοιμότητας, ορίζουν το Quality 4.0 ως «το μετασχηματιστικό φαινόμενο της σύζευξης ψηφιακών τεχνολογιών με τη Διοίκηση Ολικής Ποιότητας, του οποίου η επιτυχία εξαρτάται από την οργανωτική προετοιμασία, την ηγεσία, την κουλτούρα και την ικανότητα διαχείρισης δεδομένων».

Οι Antony et al. (2022) εμβαθύνουν περαιτέρω εντοπίζοντας πέντε διαστάσεις απόδοσης του Quality 4.0 σε επίπεδο οργανωτικού αντίκτυπου: λειτουργική αποτελεσματικότητα (operational), στρατηγική προστιθέμενη αξία (strategic), ικανοποίηση πελάτη (customer), εμπλοκή εργαζομένων (employee) και βιωσιμότητα (sustainability). Οι Ranjith Kumar et al. (2022) προτείνουν εναλλακτικά ένα πενταγωνικό πλαίσιο εφαρμογής (data, technology, process, people, strategy), το οποίο έχει υιοθετηθεί ευρέως στη μετέπειτα βιβλιογραφία και θα αποτελέσει αναφορικό πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

Συναφή πλαίσια έχουν προταθεί από τους Sader et al. (2022), οι οποίοι σε συστηματική ανασκόπηση 102 άρθρων κατέγραψαν τα κύρια χαρακτηριστικά του Quality 4.0 (real-time monitoring, predictive analytics, digital twin για ποιότητα, automated quality control) και τις εφαρμογές του σε διαφορετικούς κλάδους. Οι Saihi et al. (2023), από τη μεριά τους, ανέδειξαν τη χρήση τεχνολογιών Industry 4.0 για τη βελτίωση επτά παραδοσιακών πρακτικών διοίκησης ποιότητας (στρατηγικός σχεδιασμός, εστίαση στον πελάτη, διαχείριση διεργασιών, μετρήσεις και ανάλυση, διοίκηση ανθρωπίνων πόρων, ηγεσία, συνεχής βελτίωση).

Πέρα από τους ορισμούς, η βιβλιογραφία συγκλίνει σε μια ευρύτερη παρατήρηση: το Quality 4.0 δεν είναι αμιγώς τεχνολογικό φαινόμενο. Όπως τονίζουν οι Liu et al. (2023) και οι Komkowski et al. (2023), η ωρίμανση Quality 4.0 εξαρτάται εξίσου από την ψηφιακή υποδομή και από την οργανωτική κουλτούρα συνεχούς βελτίωσης, την ηγεσία και την ικανότητα ερμηνείας των δεδομένων. Στο ίδιο πνεύμα, οι Ferraz Junior και Gonçalves (2025)

επισημαίνουν ότι η μετάβαση στο Quality 4.0 παρουσιάζει σαφή ωφέλη (βελτίωση δεικτών απόδοσης, μείωση κόστους κακής ποιότητας, βελτίωση εμπειρίας πελάτη), αλλά συνοδεύεται από προκλήσεις (πολυπλοκότητα ολοκλήρωσης, αντίσταση στην αλλαγή, ελλείψεις σε δεξιότητες).

Στην πράξη, η εφαρμογή του Quality 4.0 λαμβάνει συγκεκριμένες λειτουργικές μορφές. Παραδείγματα τυπικών εφαρμογών περιλαμβάνουν: τον αυτοματοποιημένο οπτικό έλεγχο ποιότητας με χρήση computer vision και deep learning για την ανίχνευση ελαττωμάτων προϊόντος (Saihi et al., 2023), τη δυναμική προσαρμογή των ορίων ελέγχου σε διαγράμματα SPC βάσει συμφραζομένων δεδομένων (Bousdekis et al., 2023), την αυτόματη αναγνώριση αιτιωδών παραγόντων ποιοτικών αποκλίσεων μέσω αναλυτικών τεχνικών root-cause analysis (Dias et al., 2022) και την προληπτική ειδοποίηση όταν παράμετροι διεργασιών τείνουν να ξεπεράσουν τα όρια προδιαγραφών. Όπως όμως επισημαίνουν οι Sader et al. (2022), ο βαθμός υιοθέτησης αυτών των εφαρμογών διαφέρει σημαντικά ανά κλάδο και ανά μέγεθος επιχείρησης, με τις μικρομεσαίες επιχειρήσεις να εμφανίζουν συστηματικά υστέρηση σε σχέση με τις μεγάλες πολυεθνικές.

Η σύγκλιση των παραπάνω ορισμών και πρακτικών οδηγεί σε μια κοινή κατανόηση του Quality 4.0 ως πολυδιάστατου φαινομένου που υπερβαίνει την απλή ψηφιοποίηση πρακτικών ποιότητας. Όπως υποστηρίζουν οι Ranjith Kumar et al. (2022), η ωριμότητα Quality 4.0 χαρακτηρίζεται από την ικανότητα του οργανισμού να ολοκληρώνει την οριζόντια ροή δεδομένων (από προμηθευτή προς πελάτη) με την κατακόρυφη ροή λήψης αποφάσεων (από στρατηγικό σε επιχειρησιακό επίπεδο). Αυτή η διπλή ολοκλήρωση αποτελεί κρίσιμο διαφοροποιητικό στοιχείο σε σχέση με την παραδοσιακή TQM και θα διαπερνά την ανάλυση της μελέτης περίπτωσης που ακολουθεί στο Κεφάλαιο 4.

Ο Πίνακας 1 συνοψίζει τις κύριες διαφορές μεταξύ της παραδοσιακής Διοίκησης Ολικής Ποιότητας και του Quality 4.0 σε επτά διαστάσεις σύγκρισης, αποτυπώνοντας τη φύση της παραδειγματικής αλλαγής.

Πίνακας 1. Συγκριτική αποτύπωση των χαρακτηριστικών της Διοίκησης Ολικής Ποιότητας (TQM) και του Quality 4.0.

Διάσταση σύγκρισης	TQM	Quality 4.0
Κύρια εστίαση	Διεργασία και προϊόν	Δεδομένα, διεργασία, προϊόν και σύστημα
Λήψη αποφάσεων	Εμπειρική και στατιστική	Δεδομενοκεντρική, σε πραγματικό χρόνο
Έλεγχος ποιότητας	Δειγματοληψία και SPC	Συνεχής παρακολούθηση με αισθητήρες και AI
Συντήρηση εξοπλισμού	Διορθωτική και προληπτική	Προβλεπτική (predictive) μέσω machine learning
Ανάλυση δεδομένων	Περιγραφική	Περιγραφική, διαγνωστική, προβλεπτική, προδιορίζουσα
Ολοκλήρωση συστημάτων	Τμηματική	Κατακόρυφη και οριζόντια ενοποίηση
Ρόλος ανθρώπινου παράγοντα	Κρίσιμος, με έμφαση στη συμμετοχή	Κρίσιμος, με έμφαση σε ψηφιακές δεξιότητες

Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα βάσει Dias et al. (2022), Liu et al. (2023), Antony et al. (2022) και Broday (2022).

2.2 Ψηφιακός Μετασχηματισμός και Διαχείριση Ποιότητας

2.2.1 Τεχνολογίες-Επιταχυντές του Ψηφιακού Μετασχηματισμού

Οι τεχνολογίες της Βιομηχανίας 4.0 αποτελούν τους κύριους επιταχυντές της μετάβασης προς το Quality 4.0. Αν και οι κατάλογοι αυτών των τεχνολογιών ποικίλλουν στη βιβλιογραφία, υπάρχει ευρεία συναίνεση γύρω από μια κρίσιμη ομάδα έξι τεχνολογιών: Διαδίκτυο των Πραγμάτων, ανάλυση μεγάλων δεδομένων, τεχνητή νοημοσύνη,

υπολογιστικό νέφος, ψηφιακά δίδυμα και κυβερνοφυσικά συστήματα (Bousdekis et al., 2023· Sader et al., 2022· Saihi et al., 2023).

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things, IoT) επιτρέπει τη συνεχή συλλογή δεδομένων από αισθητήρες, μηχανήματα και προϊόντα, δημιουργώντας τη δυνατότητα παρακολούθησης πραγματικού χρόνου των παραγωγικών διεργασιών (Xu et al., 2018· Hofmann & Rüsch, 2017). Η ανάλυση μεγάλων δεδομένων (big data analytics) μετατρέπει αυτές τις ροές σε χρήσιμες πληροφορίες μέσω περιγραφικής, διαγνωστικής, προβλεπτικής και προδιορίζουσας ανάλυσης (Chen et al., 2012· Bousdekis et al., 2023). Η τεχνητή νοημοσύνη και ιδίως η μηχανική μάθηση (machine learning) επιτρέπουν την αυτόματη αναγνώριση μοτίβων, την προβλεπτική συντήρηση και τη βελτιστοποίηση παραμέτρων ποιότητας (Lee et al., 2018· Carvalho et al., 2019).

Το υπολογιστικό νέφος (cloud computing) παρέχει την υποδομή για την αποθήκευση, την επεξεργασία και τη διαμοίραση των δεδομένων σε διαφορετικά τμήματα και τοποθεσίες του οργανισμού, υποστηρίζοντας την κλιμακωσιμότητα των ψηφιακών εφαρμογών (Xu et al., 2018). Το ψηφιακό δίδυμο (digital twin) αποτελεί μία από τις πλέον υποσχόμενες τεχνολογίες Quality 4.0, καθώς επιτρέπει την προσομοίωση των φυσικών διεργασιών σε ψηφιακό περιβάλλον και τη βελτιστοποίηση των παραμέτρων ποιότητας πριν την εφαρμογή τους στην πραγματική παραγωγή (Tao et al., 2018· Sader et al., 2022). Τέλος, τα κυβερνοφυσικά συστήματα (Cyber-Physical Systems, CPS) λειτουργούν ως αρχιτεκτονικό ομπρέλα-πλαίσιο, ενοποιώντας τις παραπάνω τεχνολογίες σε ολοκληρωμένα συστήματα παραγωγής (Lee et al., 2015· Zhong et al., 2017).

Πέρα από αυτές τις θεμελιώδεις τεχνολογίες, η σύγχρονη βιβλιογραφία αναδεικνύει ως κρίσιμη επίσης την προσθετική κατασκευή (additive manufacturing, 3D printing), η οποία επιτρέπει την παραγωγή προϊόντων σε μικρές παρτίδες και την ταχεία πρωτοτυποποίηση χωρίς συμβιβασμό στην ποιότητα (Xu et al., 2018· Zhong et al., 2017), αλλά και τα συνεργατικά ρομπότ (cobots) που λειτουργούν δίπλα στους εργαζομένους χωρίς φραγμούς ασφαλείας, μεταβάλλοντας τις παραδοσιακές αρχιτεκτονικές παραγωγής. Σύμφωνα με τους Sony και Naik (2020), η ολιστική υιοθέτηση αυτής της τεχνολογικής μήτρας απαιτεί συντονισμένη αναβάθμιση σε επίπεδα υλικού (hardware), λογισμικού (software) και

ανθρώπινου παράγοντα — γεγονός που εξηγεί τη συστηματικά αναφερόμενη υστέρηση των μεσαίων επιχειρήσεων σε σχέση με τις μεγάλες πολυεθνικές.

Μία από τις πιο πρόσφατες τεχνολογικές κατευθύνσεις που αφορούν ιδιαίτερα τη διαχείριση ποιότητας είναι το industrial AI (Lee et al., 2018). Σε αντίθεση με τη γενική τεχνητή νοημοσύνη, το industrial AI ενσωματώνει γνώση πεδίου (domain knowledge) βιομηχανικής μηχανικής στους αλγορίθμους μάθησης, παράγοντας πιο ερμηνεύσιμα και αξιόπιστα μοντέλα για συστήματα όπου η αποτυχία έχει σημαντικές συνέπειες σε επίπεδο ποιότητας ή ασφάλειας. Η ενσωμάτωση αυτών των ικανοτήτων στα συστήματα παραγωγής είναι ένα από τα πλέον υποσχόμενα ερευνητικά μέτωπα και αναμένεται να μετασχηματίσει τις πρακτικές αξιόπιστης τεχνικής διαχείρισης ποιότητας στην επόμενη δεκαετία.

2.2.2 Δεδομενοκεντρική Διαχείριση Ποιότητας

Η μετάβαση από την παραδοσιακή στην ψηφιακή διοίκηση ποιότητας περνά αναγκαστικά από την ωρίμανση των δεδομένων ως πρωτεύοντος πόρου. Όπως διατύπωσαν πρωτοπόρα οι Wang και Strong (1996), η ποιότητα δεδομένων (data quality) έχει τέσσερις βασικές διαστάσεις: εγγενή ποιότητα (intrinsic), συμφραζομένη (contextual), αναπαραστασιακή (representational) και προσβασιμότητα (accessibility). Αυτές οι διαστάσεις παραμένουν εξαιρετικά επίκαιρες στο Quality 4.0: τα δεδομένα παραγωγής που τηρούνται στα πληροφοριακά συστήματα οφείλουν να είναι ακριβή, πλήρη, σχετικά, ερμηνεύσιμα και προσβάσιμα από όλους τους εμπλεκόμενους ρόλους (Antony et al., 2022· Bousdekis et al., 2023).

Η βιβλιογραφία αναδεικνύει τρία διακριτά στάδια ψηφιακής ωρίμανσης στη διαχείριση ποιότητας. Το πρώτο, το οποίο οι Antony et al. (2022) αποκαλούν data foundation, αφορά τη συστηματική καταγραφή και αξιοπιστία των δεδομένων βάσης. Το δεύτερο, το real-time visibility, αφορά την οπτικοποίηση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο μέσω dashboards και KPIs, ώστε οι ρόλοι λήψης αποφάσεων να διαθέτουν αμεσότητα πληροφόρησης. Το τρίτο, το continuous improvement loop, αφορά την αξιοποίηση των δεδομένων για συστηματική βελτίωση των διεργασιών μέσω αναλυτικών τεχνικών μηχανικής μάθησης και επαναληπτικής βελτιστοποίησης (Sony et al., 2021· Sader et al., 2022).

Παρά τον πλούτο τεχνολογικών λύσεων, οι εμπειρικές μελέτες αναδεικνύουν ότι πολλοί οργανισμοί παραμένουν στάσιμοι στο πρώτο στάδιο. Η ψηφιακή καταγραφή υπάρχει, όμως η μετατροπή των δεδομένων σε αποφάσεις βελτίωσης παραμένει μερική (Liu et al., 2023· Ferraz Junior & Gonçalves, 2025). Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται σε συνδυασμό τεχνικών (κατακερματισμός συστημάτων, ποιότητα δεδομένων), οργανωτικών (ελλείψεις σε αναλυτικές δεξιότητες, αντίσταση στην αλλαγή) και στρατηγικών (ασαφές όραμα ψηφιακού μετασχηματισμού) παραγόντων (Sony & Naik, 2020· Komkowsky et al., 2023).

Στο πεδίο της διακυβέρνησης δεδομένων (data governance), η βιβλιογραφία τονίζει την ανάγκη συστηματικής διαχείρισης master data — δηλαδή των βασικών αναγνωριστικών δεδομένων (κωδικοί προϊόντων, παραγωγικοί πόροι, παράμετροι διεργασιών) που διατρέχουν όλα τα πληροφοριακά συστήματα. Όπως καταγράφουν οι Wang και Strong (1996), η κακή ποιότητα master data αποτελεί συχνά τη ρίζα προβλημάτων αξιοπιστίας στα downstream συστήματα ανάλυσης. Σε πλαίσιο Quality 4.0, η συστηματική συντήρηση των master data αποτελεί προϋπόθεση για κάθε προσπάθεια ψηφιακής ωρίμανσης, και ως εκ τούτου εντάσσεται οργανικά στον άξονα Data του προτεινόμενου πλαισίου (Antony et al., 2022).

Οι Saihi et al. (2023) επισημαίνουν επιπλέον ότι η μετάβαση σε προδιορίζουσα ανάλυση (prescriptive analytics) — δηλαδή σε αυτοματοποιημένες συστάσεις δράσεων από τα ίδια τα συστήματα — αποτελεί την πιο ώριμη και υπό-διερευνημένη φάση του Quality 4.0. Πολύ λίγες μελέτες έχουν τεκμηριώσει εμπειρικά την επιτυχή λειτουργία τέτοιων συστημάτων σε πραγματικές βιομηχανικές διεργασίες, και ακόμη λιγότερες έχουν εξετάσει τις οργανωτικές και ηθικές προκλήσεις της αυτοματοποιημένης λήψης αποφάσεων ποιότητας — ζητήματα που αφορούν τόσο τη λογοδοσία όσο και την εμπιστοσύνη του ανθρώπινου παράγοντα στα αλγοριθμικά συστήματα.

2.2.3 Ολοκλήρωση Πληροφοριακών Συστημάτων στην Παραγωγή

Στην εφαρμοσμένη πραγματικότητα της βιομηχανικής παραγωγής, ο ψηφιακός μετασχηματισμός εδραιώνεται μέσα από την ολοκλήρωση πολλαπλών πληροφοριακών συστημάτων. Τα κύρια στρώματα είναι το σύστημα Διαχείρισης Εταιρικών Πόρων (Enterprise Resource Planning, ERP), τα Συστήματα Εκτέλεσης Παραγωγής (Manufacturing Execution

Systems, MES), τα Συστήματα Διαχείρισης Αποθήκης (Warehouse Management Systems, WMS) και τα εργαλεία Επιχειρηματικής Ευφυΐας (Business Intelligence, BI) για την οπτικοποίηση δεδομένων (Hofmann & Rüsch, 2017· Bousdekis et al., 2023).

Οι Sader et al. (2022) εντοπίζουν τέσσερις τυπικές αρχιτεκτονικές ολοκλήρωσης: vertical integration (κατακόρυφη ενοποίηση εντός του οργανισμού), horizontal integration (οριζόντια ενοποίηση κατά μήκος της αλυσίδας αξίας), end-to-end engineering integration (συνέχεια από τον σχεδιασμό μέχρι την παράδοση) και integration through cloud platforms (διαμοιραζόμενες υποδομές). Στην πράξη, ωστόσο, οι περισσότερες μεσαίες βιομηχανικές μονάδες αντιμετωπίζουν δυσκολίες στην επίτευξη πλήρους κατακόρυφης ενοποίησης, λόγω ασυμβατότητας συστημάτων ή έλλειψης δομικών διεπαφών (Müller et al., 2018· Schumacher et al., 2016).

Η ένταξη της Επιχειρηματικής Ευφυΐας στο Quality 4.0 είναι ιδιαίτερα κρίσιμη, καθώς η οπτικοποίηση δεδομένων αποτελεί τη γέφυρα μεταξύ της καταγραφής και της λήψης αποφάσεων (Chen et al., 2012). Πλατφόρμες όπως Microsoft Power BI, Tableau ή Qlik υποστηρίζουν τη δημιουργία διαδραστικών dashboards για παρακολούθηση δεικτών ποιότητας σε πραγματικό χρόνο. Όπως επισημαίνουν οι Bousdekis et al. (2023), η αξία αυτών των εργαλείων δεν έγκειται στη τεχνική αρχιτεκτονική αλλά στην οργανωτική τους ενσωμάτωση στην καθημερινή λήψη αποφάσεων. Η διάκριση αυτή είναι κρίσιμη για την παρούσα εργασία, καθώς η μελέτη περίπτωσης διερευνά ακριβώς πώς εργαλεία όπως ERP, WMS και Power BI αξιοποιούνται στην πράξη από στελέχη διαφορετικών λειτουργικών περιοχών.

Σε λειτουργικό επίπεδο, η αρχιτεκτονική ISA-95 παρέχει διεθνώς αναγνωρισμένο αναφορικό πλαίσιο για την ολοκλήρωση των επιχειρηματικών και των επιχειρησιακών συστημάτων, ορίζοντας πέντε επίπεδα: φυσικός εξοπλισμός (Level 0), αισθητήρες και αυτοματισμοί (Level 1), έλεγχος διεργασιών (Level 2), λειτουργίες παραγωγής / MES (Level 3) και επιχειρηματικός προγραμματισμός / ERP (Level 4). Η ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ Level 3 και Level 4 αποτελεί κλασικό σημείο τριβής στις περισσότερες βιομηχανικές μονάδες, καθώς απαιτεί συμβατότητα κωδικοποιήσεων, χρονικού συγχρονισμού και κανόνων επιχειρηματικής λογικής (Bousdekis et al., 2023· Hofmann & Rüsch, 2017). Στην πράξη, πολλές μεσαίες

μονάδες αναπτύσσουν ενδιάμεσες ιδιοκατασκευή εφαρμογές για να γεφυρώσουν αυτή την απόσταση, ένα μοτίβο που εμφανίζεται και στη μελέτη περίπτωσης της παρούσας εργασίας.

2.2.4 Πλαίσια Ωρίμανσης Quality 4.0

Η ανάγκη συστηματικής αποτίμησης του βαθμού ωρίμανσης ενός οργανισμού στο Quality 4.0 έχει οδηγήσει στη δημιουργία πολλαπλών μοντέλων ωρίμανσης. Το πλαίσιο των Schumacher et al. (2016) αξιολογεί την ωριμότητα Industry 4.0 σε εννέα διαστάσεις (στρατηγική, ηγεσία, πελάτες, προϊόντα, λειτουργίες, κουλτούρα, άνθρωποι, διακυβέρνηση, τεχνολογία), παρέχοντας μια κλίμακα πέντε επιπέδων από ανώριμα (level 1) έως υπερ-ώριμα (level 5) οργανωτικά προφίλ. Οι Glogonac et al. (2020) εξειδικεύουν αυτό το πλαίσιο για συστήματα διαχείρισης ποιότητας, προτείνοντας ένα μοντέλο ωρίμανσης βασισμένο στο ISO 9004.

Στη βιβλιογραφία του Quality 4.0, οι Sony et al. (2021) διαμόρφωσαν ένα από τα πλέον αναφερόμενα πλαίσια οργανωτικής ετοιμότητας. Με βάση εμπειρική μελέτη σε διεθνείς οργανισμούς, εντόπισαν επτά παράγοντες ετοιμότητας: συμμετοχή ηγεσίας, στρατηγική Quality 4.0, ψηφιακή υποδομή, ικανότητες ανθρώπινου παράγοντα, κουλτούρα δεδομένων, οργανωτική δομή και διαχείριση αλλαγών. Παράλληλα, οι Antony et al. (2022) εστιάζουν στις διαστάσεις απόδοσης, προτείνοντας πέντε επιπέδων ωρίμανση από προ-ψηφιακό σε πλήρως ολοκληρωμένο Quality 4.0.

Πέραν των τυπικών μοντέλων ωρίμανσης, αρκετές εμπειρικές μελέτες έχουν αναδείξει χαρακτηριστικά μοτίβα ψηφιακής μετάβασης στις μεσαίες επιχειρήσεις. Οι Müller et al. (2018), σε μελέτη γερμανικών SMEs, εντοπίζουν τρία κυρίαρχα μοτίβα: (α) ψηφιακοποίηση εστιασμένη σε λειτουργική αποδοτικότητα (Industry 4.0 για παραγωγικότητα), (β) ψηφιακοποίηση εστιασμένη στον πελάτη (Industry 4.0 για διαφοροποίηση προϊόντος) και (γ) ψηφιακοποίηση επιχειρηματικού μοντέλου (Industry 4.0 για νέες ροές εσόδων). Η πλειονότητα των μεσαίων μονάδων εντάσσεται στο πρώτο μοτίβο, χωρίς συχνά να αξιοποιεί τις στρατηγικές δυνατότητες των τελευταίων δύο, γεγονός που τεκμηριώνει την ανάγκη ολοκληρωμένων πλαισίων ωρίμανσης τα οποία να καθοδηγούν τη μετάβαση σε ώριμα μοτίβα ψηφιοποίησης.

Συνθέτοντας τα παραπάνω πλαίσια, η παρούσα εργασία υιοθετεί ως αναφορικό σχήμα ωρίμανσης τις πέντε διαστάσεις των Ranjith Kumar et al. (2022) — data, technology, process, people, strategy — εμπλουτισμένες με τις διαστάσεις απόδοσης των Antony et al. (2022). Η Εικόνα 2 αποτυπώνει σχηματικά τις πέντε διαστάσεις και την εσωτερική τους αλληλεξάρτηση, η οποία αποτελεί κρίσιμο σημείο της μετέπειτα εμπειρικής ανάλυσης.

Διαστάσεις και Εσωτερική Διασύνδεση του Πλαισίου Quality 4.0



Εικόνα 2. Πενταξονικό πλαίσιο διαστάσεων του Quality 4.0 και η εσωτερική τους διασύνδεση. Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα βάσει Ranjith Kumar et al. (2022) και Antony et al. (2022).

Όπως καθίσταται εμφανές από την Εικόνα 2, καμία από τις πέντε διαστάσεις δεν λειτουργεί αυτοτελώς· η ωρίμανση σε μία διάσταση τροφοδοτεί και απαιτείται από τις υπόλοιπες. Για παράδειγμα, η τεχνολογική υποδομή χωρίς αξιόπιστα δεδομένα δεν παράγει αξία, ενώ η ισχυρή στρατηγική χωρίς ψηφιακά εξειδικευμένο ανθρώπινο δυναμικό αδυνατεί να μεταφραστεί σε πράξη. Αυτή η αρχή της αλληλεξάρτησης θα διαπερνά το προτεινόμενο πλαίσιο ωρίμανσης του Κεφαλαίου 4.

2.3 Ψηφιακή Διαχείριση Ασφάλειας και Κινδύνου

2.3.1 Βασικές Αρχές Διαχείρισης Βιομηχανικής Ασφάλειας

Η ασφάλεια στη βιομηχανική παραγωγή έχει διανύσει μια εξελικτική πορεία ανάλογη με αυτήν της ποιότητας. Ο James Reason (1997) θεμελίωσε τη σύγχρονη κατανόηση των οργανωτικών ατυχημάτων με το γνωστό «Swiss Cheese Model», σύμφωνα με το οποίο τα ατυχήματα δεν προκαλούνται από μεμονωμένα σφάλματα αλλά από τη σύμπτωση ενεργών αστοχιών και λανθανουσών συνθηκών μέσω «τρυπών» στα διαδοχικά στρώματα προστασίας του συστήματος. Η προσέγγιση αυτή έθεσε τις βάσεις για το πέρασμα από τη μηχανιστική στη συστημική κατανόηση της ασφάλειας.

Στη συνέχεια, ο Erik Hollnagel (2018) διαμόρφωσε τη διάκριση μεταξύ «Safety-I» (παραδοσιακή προσέγγιση, εστιασμένη στην αποτροπή αστοχιών) και «Safety-II» (σύγχρονη προσέγγιση, εστιασμένη στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας και της ικανότητας του συστήματος να λειτουργεί σε ποικίλες συνθήκες). Η Safety-II παρέχει το θεωρητικό υπόβαθρο για τη μετάβαση από αντιδραστικά σε προληπτικά και προβλεπτικά μοντέλα διαχείρισης ασφάλειας. Συναφή είναι η προσέγγιση των Patriarca et al. (2018), οι οποίοι μέσα από συστηματική ανασκόπηση του resilience engineering αναδεικνύουν τέσσερις κρίσιμες ικανότητες των ανθεκτικών συστημάτων: ανταπόκριση (respond), παρακολούθηση (monitor), αναμονή (anticipate) και μάθηση (learn). Ακριβώς αυτές οι ικανότητες ενδυναμώνονται σημαντικά από τις τεχνολογίες της Βιομηχανίας 4.0.

Συμπληρωματικά προς τη συστημική θεώρηση, η σύγχρονη διαχείριση κινδύνου ενσωματώνει τις αρχές της Normal Accident Theory, σύμφωνα με την οποία σε πολύπλοκα τεχνικά συστήματα με στενή ζεύξη μεταξύ τμημάτων, τα ατυχήματα είναι στατιστικά αναπόφευκτα, ανεξάρτητα από τις προσπάθειες αποτροπής τους. Η προσέγγιση αυτή τονίζει τη σημασία του δομικού (απο-)ζευγαριάσματος υποσυστημάτων ως στρατηγική μείωσης κινδύνου — αρχή που στο πλαίσιο της Industry 4.0 μεταφράζεται σε αρθρωτό σχεδιασμό λογισμικού, ισχυρή κυβερνοασφάλεια και διαθεσιμότητα εφεδρικών διαδρομών δεδομένων (Patriarca et al., 2018· Aven, 2016). Σε αυτό το πλαίσιο, η σκέψη κινδύνου των ISO 9001 και ISO 31000 συγκλίνει με τις σύγχρονες προσεγγίσεις resilience engineering, παρέχοντας

ολοκληρωμένο εννοιολογικό πλαίσιο για τη διαχείριση κινδύνου σε ψηφιακά διασυνδεδεμένα παραγωγικά συστήματα.

2.3.2 Θεσμικό Πλαίσιο: ISO 31000 και ISO 45001

Στο θεσμικό επίπεδο, η ολοκλήρωση της διαχείρισης ασφάλειας και κινδύνου έχει εδραιωθεί μέσα από δύο διεθνή πρότυπα. Το ISO 31000:2018 παρέχει το γενικό πλαίσιο και τις κατευθυντήριες οδηγίες διαχείρισης κινδύνου, εφαρμόσιμες σε κάθε τύπο οργανισμού (ISO, 2018a). Το ISO 45001:2018, αντίστοιχα, καθορίζει τις απαιτήσεις για ένα σύστημα διαχείρισης υγείας και ασφάλειας στην εργασία (Occupational Health and Safety Management System), αντικαθιστώντας το προηγούμενο OHSAS 18001 (ISO, 2018b).

Όπως επισημαίνουν οι Fonseca et al. (2021) και οι Komkowski et al. (2023), η σύζευξη των ISO 9001, ISO 14001 και ISO 45001 σε ενοποιημένο σύστημα διαχείρισης (Integrated Management System) διευκολύνεται από τη χρήση κοινής δομής υψηλού επιπέδου (Annex SL) και την υιοθέτηση της σκέψης κινδύνου ως κοινής αρχής. Οι Aven (2016) και οι Sony et al. (2021) τονίζουν ότι η σκέψη κινδύνου αποτελεί δομικό συνδετικό κρίκο μεταξύ ποιότητας, ασφάλειας και βιωσιμότητας στη σύγχρονη επιχειρηματική πραγματικότητα, και ως εκ τούτου συνιστά κατάλληλο σημείο αφετηρίας για μια ολοκληρωμένη ψηφιακή προσέγγιση.

2.3.3 Safety 4.0 και Διαχείριση Κινδύνου στην Ψηφιακή Εποχή

Παράλληλα με την έννοια του Quality 4.0, αναδύεται στη βιβλιογραφία η έννοια του «Safety 4.0», η οποία αναφέρεται στην αξιοποίηση των τεχνολογιών της Βιομηχανίας 4.0 για τη βελτίωση της διαχείρισης ασφάλειας και κινδύνου. Οι Badri et al. (2018), σε μία από τις πρώτες κριτικές αναλύσεις του θέματος, εξετάζουν τόσο τις ευκαιρίες (παρακολούθηση πραγματικού χρόνου, προβλεπτική ανάλυση κινδύνου, έξυπνα μέσα ατομικής προστασίας) όσο και τις νέες προκλήσεις (κυβερνοκίνδυνοι, εξάρτηση από αυτοματισμούς, ψυχοκοινωνικές επιπτώσεις της εντατικής ψηφιακής παρακολούθησης).

Οι Forcina και Falcone (2021), σε συστηματική ανασκόπηση 70 άρθρων, καταδεικνύουν ότι οι τεχνολογίες Industry 4.0 με τη μεγαλύτερη εφαρμογή στη διαχείριση ασφάλειας είναι το IoT (παρακολούθηση εργαζομένων και περιβαλλοντικών συνθηκών), η ανάλυση μεγάλων

δεδομένων (αναγνώριση προτύπων ατυχημάτων), η επαυξημένη πραγματικότητα (εκπαίδευση και υποστήριξη εργαζομένων) και τα ρομποτικά συστήματα (αντικατάσταση επικίνδυνων εργασιών). Αντίστοιχη ανάλυση παρέχουν οι Podgórski et al. (2017), εστιάζοντας στα έξυπνα μέσα ατομικής προστασίας (smart PPE) και στα συστήματα ambient intelligence.

Παράλληλα με τις δυνατότητες, οι τεχνολογίες της Βιομηχανίας 4.0 εισάγουν και νέους τύπους κινδύνου. Οι Sony και Naik (2020) εντοπίζουν ως κρίσιμη πρόκληση την κυβερνοασφάλεια των βιομηχανικών συστημάτων: η σύνδεση μηχανημάτων και αισθητήρων στο διαδίκτυο δημιουργεί νέες επιφάνειες επίθεσης, με δυνητικές συνέπειες όχι μόνο στη συνέχεια λειτουργίας αλλά και στην ασφάλεια του προσωπικού, στην περίπτωση που μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση οδηγεί σε επικίνδυνες ρυθμίσεις εξοπλισμού. Αντίστοιχα, οι Badri et al. (2018) εντοπίζουν ψυχοκοινωνικούς κινδύνους όπως άγχος από εντατική παρακολούθηση, αίσθηση επιτήρησης και μετατόπιση εξειδικευμένων εργασιών σε αλγορίθμους — ζητήματα που οφείλουν να αντιμετωπιστούν με κατάλληλη πολιτική ανθρωπίνου δυναμικού και διαφανείς πρακτικές διακυβέρνησης δεδομένων.

Στο πεδίο της προληπτικής συντήρησης (predictive maintenance), η βιβλιογραφία είναι ιδιαίτερα πλούσια. Η συστηματική ανασκόπηση των Carvalho et al. (2019) σε μελέτες μηχανικής μάθησης για προληπτική συντήρηση καταδεικνύει ότι τα δέντρα αποφάσεων, τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα και τα ensemble μοντέλα αποτελούν τις πιο διαδεδομένες αναλυτικές τεχνικές. Οι Werbińska-Wojciechowska και Winiarska (2023), σε νεότερη ανασκόπηση, καταγράφουν ότι η μετάβαση από συντήρηση βάσει χρόνου (time-based) σε συντήρηση βάσει κατάστασης (condition-based) και τελικά σε προβλεπτική συντήρηση μειώνει σημαντικά τους κινδύνους αστοχιών εξοπλισμού, βελτιώνοντας ταυτόχρονα την ασφάλεια του προσωπικού.

Οι Lee et al. (2018) τονίζουν επιπλέον ότι η αξία της προβλεπτικής συντήρησης δεν περιορίζεται στη μείωση μη-προγραμματισμένων διακοπών, αλλά εκτείνεται και στη μείωση επικίνδυνων καταστάσεων από αιφνίδιες αστοχίες εξοπλισμού. Σε πολλές βιομηχανικές διεργασίες — όπως η ανάμιξη χημικών ή η συσκευασία σε υψηλή πίεση — η αστοχία ενός κρίσιμου στοιχείου μπορεί να οδηγήσει σε διαρροή, έκρηξη ή έκθεση εργαζομένων σε επικίνδυνες ουσίες. Η προβλεπτική συντήρηση, στο μέτρο που επιτρέπει τον προληπτικό

σχεδιασμό αντικαταστάσεων, αποτελεί επομένως κοινό αγαθό ποιότητας και ασφάλειας — και ως εκ τούτου ένα από τα πιο σαφή σημεία σύζευξης των δύο πεδίων στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας.

2.3.4 Διαχείριση Ροής Υλικών, Χωροταξίας και Επιχειρησιακής Συνέχειας

Πέρα από τα ζητήματα προληπτικής συντήρησης, η διαχείριση κινδύνου σε επίπεδο ροής υλικών και χωροταξίας αποτελεί κρίσιμη διάσταση της βιομηχανικής ασφάλειας. Σύμφωνα με τους Hofmann και Rüsch (2017), η ολοκλήρωση συστημάτων WMS με τεχνολογίες IoT επιτρέπει την παρακολούθηση πραγματικού χρόνου των ροών πρώτων υλών και τελικών προϊόντων, μειώνοντας τους κινδύνους σύγχυσης παρτίδων, υπέρβασης ορίων αποθήκευσης και ακατάλληλης συσκευασίας — ζητήματα ιδιαίτερα κρίσιμα στον κλάδο των γεωργικών σκευασμάτων όπου εντάσσεται η παρούσα μελέτη περίπτωσης.

Οι Niciejewska και Idzikowski (2019), σε μελέτη επικεντρωμένη σε μικρομεσαίες επιχειρήσεις, υπογραμμίζουν ότι η συστηματική αναγνώριση κινδύνου (hazard identification) και η συστηματική παρακολούθηση των διορθωτικών ενεργειών αποτελούν τους κρίσιμους κρίκους ασφαλούς λειτουργίας — και ακριβώς εδώ συγκλίνουν οι αρχές των ISO 9001 και ISO 45001 με τις τεχνολογίες ψηφιακής καταγραφής και ανάλυσης. Σε επίπεδο επιχειρησιακής συνέχειας, η μετάβαση από αντιδραστικά σε προληπτικά μοντέλα διαχείρισης κινδύνου αποτελεί κεντρικό στοιχείο της αρχιτεκτονικής Safety 4.0 (Forcina & Falcone, 2021).

Στην περίπτωση της παρούσας μελέτης, η οποία αφορά μονάδα παραγωγής γεωργικών σκευασμάτων, η διαχείριση κινδύνου διαθέτει επιπρόσθετες ιδιαιτερότητες σε σχέση με τη γενική βιομηχανία. Οι κίνδυνοι περιλαμβάνουν χημική έκθεση εργαζομένων κατά τη ζύγιση και ανάμιξη συστατικών, διασταυρούμενη επιμόλυνση μεταξύ παρτίδων διαφορετικών δραστικών ουσιών, ακατάλληλη επισήμανση συσκευασιών (label mix-up) και πιθανές περιβαλλοντικές απορροές. Παρότι ο κλάδος δεν εμπίπτει αμιγώς στα πλαίσια HACCP που αφορούν τα τρόφιμα, βασίζεται σε αυστηρά διεθνή πρότυπα ταξινόμησης, σήμανσης και διαχείρισης επικίνδυνων χημικών ουσιών (όπως οι Ευρωπαϊκοί Κανονισμοί REACH και CLP). Η ψηφιακή καταγραφή των ροών υλικών και η αυτόματη επικύρωση μέσω συστημάτων WMS αποτελούν επομένως κρίσιμους ελέγχους ασφάλειας σε αυτό το πλαίσιο, και ο

ψηφιακός μετασχηματισμός της διαχείρισης ροής υλικών συνιστά ταυτόχρονη βελτίωση ποιότητας και ασφάλειας.

2.3.5 Σύζευξη Διαχείρισης Ποιότητας και Ασφάλειας

Πέρα από τις ξεχωριστές εξελίξεις, η βιβλιογραφία τονίζει την ανάγκη ενοποίησης της διαχείρισης ποιότητας και ασφάλειας σε ολοκληρωμένα πλαίσια. Όπως διατυπώνουν οι Komkowsky et al. (2023), η μέθοδος Six Sigma — με τη φιλοσοφία μείωσης της μεταβλητότητας — εφαρμόζεται εξίσου επιτυχώς τόσο σε ζητήματα ποιότητας προϊόντος όσο και σε ζητήματα ασφάλειας διεργασιών. Αντίστοιχα, οι Fonseca et al. (2021) προτείνουν την ενοποιημένη διαχείριση κινδύνου ως κοινό σημείο συνάρθρωσης ποιότητας, ασφάλειας και περιβαλλοντικής διαχείρισης στο πλαίσιο του EFQM 2020.

Παρότι η εμπειρική βιβλιογραφία σχετικά με την ολοκληρωμένη ψηφιακή διαχείριση ποιότητας και ασφάλειας στο πλαίσιο του Quality 4.0 παραμένει περιορισμένη (Komkowsky et al., 2023· Bousdekis et al., 2023), η σύγκλιση είναι θεωρητικά σαφής: και οι δύο λειτουργίες βασίζονται στην αξιόπιστη καταγραφή δεδομένων, στην πραγματικού χρόνου παρακολούθηση και στην αναλυτική αξιοποίηση των δεδομένων για προληπτική παρέμβαση. Ο Πίνακας 2.2 συνοψίζει τις κύριες αντιστοιχίσεις τεχνολογιών Industry 4.0 με λειτουργίες ασφάλειας και διαχείρισης κινδύνου, αποτελώντας αναλυτικό πλαίσιο για την μετέπειτα ανάλυση του ΕΕ3.

Σε επίπεδο μεθοδολογικών εργαλείων, η Failure Mode and Effects Analysis (FMEA), η Hazard and Operability Study (HAZOP) και η ανάλυση δέντρου σφάλματος (Fault Tree Analysis) αποτελούν διαδεδομένες τεχνικές που εφαρμόζονται τόσο σε ζητήματα ποιότητας όσο και σε ζητήματα ασφάλειας. Στην ψηφιακή εποχή, αυτές οι τεχνικές εμπλουτίζονται με ποσοτικά δεδομένα από τις ροές παραγωγής, οδηγώντας σε δυναμικές, ζωντανές αναλύσεις κινδύνου που ενημερώνονται σε πραγματικό χρόνο βάσει της κατάστασης των διεργασιών (Aven, 2016· Bousdekis et al., 2023). Η μετάβαση αυτή από στατικές σε δυναμικές αναλύσεις κινδύνου συνιστά την πιο πρόσφατη και υποσχόμενη εξέλιξη στη σύζευξη των δύο πεδίων, και αναμένεται να μετασχηματίσει σημαντικά τις πρακτικές διαχείρισης ποιότητας και ασφάλειας στις βιομηχανικές διεργασίες της επόμενης δεκαετίας.

Πίνακας 2. Αντιστοίχιση τεχνολογιών Industry 4.0 με λειτουργίες διαχείρισης ασφάλειας και κινδύνου.

Τεχνολογία Industry 4.0	Εφαρμογή στη Διαχείριση Ασφάλειας / Κινδύνου	Κύριες πηγές
IoT (αισθητήρες, wearables)	Παρακολούθηση εργαζομένων και περιβαλλοντικών συνθηκών (θερμοκρασία, αέρια, θόρυβος) σε πραγματικό χρόνο	Badri et al. (2018)· Podgórski et al. (2017)
Big Data Analytics	Αναγνώριση μοτίβων ατυχημάτων και near-miss events· διαχρονική ανάλυση δεικτών ασφάλειας	Forcina & Falcone (2021)
AI / Machine Learning	Προβλεπτική συντήρηση εξοπλισμού· πρώιμη ανίχνευση επικίνδυνων συμπεριφορών	Carvalho et al. (2019)· Lee et al. (2018)
Digital Twin	Προσομοίωση επικίνδυνων διεργασιών χωρίς ρίσκο· δοκιμή σεναρίων χωρίς διακοπή παραγωγής	Tao et al. (2018)· Sader et al. (2022)
Augmented Reality (AR)	Εκπαίδευση ασφάλειας με εμπύθιση· υποστήριξη εργαζομένων σε επικίνδυνους χώρους	Badri et al. (2018)· Forcina & Falcone (2021)
Smart PPE	Έξυπνα μέσα ατομικής προστασίας με αισθητήρες υγείας και γεωγραφικής τοποθεσίας	Podgórski et al. (2017)
Cloud platforms	Ενοποιημένη παρακολούθηση κινδύνων σε πολλαπλές εγκαταστάσεις· κοινή τράπεζα δεδομένων ατυχημάτων	Hofmann & Rüsch (2017)· Bousdekis et al. (2023)

Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα βάσει της βιβλιογραφίας που αναφέρεται στη στήλη «Κύριες πηγές».

2.4 Ερευνητικά Κενά

Η συστηματική ανασκόπηση της παραπάνω βιβλιογραφίας αναδεικνύει τέσσερα διακριτά ερευνητικά κενά, καθένα από τα οποία τεκμηριώνει τη συνεισφορά της παρούσας μεταπτυχιακής εργασίας στο διεθνές πεδίο του Quality 4.0.

2.4.1 Κενό Εμπειρικής Τεκμηρίωσης

Οι περισσότερες πρόσφατες μελέτες Quality 4.0 παραμένουν σε θεωρητικό ή βιβλιομετρικό επίπεδο (Liu et al., 2023· Ferraz Junior & Gonçalves, 2025). Όπως καταγράφουν οι Sader et al. (2022), από 102 άρθρα της βιβλιογραφικής τους ανασκόπησης, μόλις ένα μειονοτικό ποσοστό περιλάμβανε εμπειρική ανάλυση σε πραγματικό βιομηχανικό περιβάλλον με χρήση ποσοτικών δεδομένων παραγωγής σε επίπεδο εντολών εργασίας. Η ίδια παρατήρηση διατυπώνεται από τους Saihi et al. (2023), οι οποίοι σημειώνουν ότι η εμπειρική τεκμηρίωση μέσω case studies με ποσοτικά παραγωγικά δεδομένα παραμένει ένα από τα μεγαλύτερα κενά του πεδίου. Η παρούσα εργασία, με την ανάλυση 1.108 εντολών παραγωγής έτους 2025 σε ανωνυμοποιημένη μορφή, τοποθετείται ευθέως σε αυτήν την υπό-αναπτυγμένη κατηγορία εμπειρικών μελετών.

Η εμπειρική υστέρηση δεν είναι τυχαία· αποδίδεται σε συνδυασμό παραγόντων: τη δυσκολία πρόσβασης σε αξιόπιστα παραγωγικά δεδομένα, την ευαισθησία των επιχειρήσεων προς ζητήματα εμπιστευτικότητας, και την έλλειψη μεθοδολογικών οδηγιών για την επεξεργασία αυτών των δεδομένων με τρόπο που να σέβεται την εμπορική ευαισθησία αλλά να διατηρεί επιστημονική αυστηρότητα. Η παρούσα εργασία αντιμετωπίζει αυτές τις προκλήσεις μέσω αυστηρού πρωτοκόλλου ανωνυμοποίησης (κωδικοποιημένα προϊόντα P-FIN/P-SEMI, παραγωγικοί πόροι R1–R5, normalized κόστη), δίνοντας έτσι ένα πρακτικό παράδειγμα για μελλοντικές εμπειρικές μελέτες του πεδίου.

2.4.2 Υπό-Αναπτυγμένη Σύνδεση Ποιότητας με Ασφάλεια

Οι Komkowski et al. (2023), σε συστηματική ανασκόπηση άρθρων που συνδέουν τη Βιομηχανία 4.0 με μεθοδολογίες λειτουργικής αριστείας, εντοπίζουν ότι η μεγάλη πλειονότητα της βιβλιογραφίας αντιμετωπίζει τη διαχείριση ποιότητας και τη διαχείριση ασφάλειας ως ξεχωριστά πεδία, παρά τη θεσμική τους σύγκλιση μέσω του Annex SL και τη λειτουργική τους αλληλεξάρτηση στις διεργασίες παραγωγής. Αντίστοιχη ανάγκη διατυπώνεται και από τους Bousdekis et al. (2023), οι οποίοι τονίζουν ότι η ολοκληρωμένη αξιοποίηση δεδομένων ποιότητας και ασφάλειας αποτελεί μία από τις πιο υποσχόμενες αλλά υπό-διερευνημένες κατευθύνσεις της επόμενης δεκαετίας.

Παράλληλα, η εμφάνιση της έννοιας Safety 4.0 (Badri et al., 2018· Forcina & Falcone, 2021) έχει εξελιχθεί σε μεγάλο βαθμό παράλληλα προς την έννοια Quality 4.0, χωρίς ουσιαστική διεπιστημονική σύνθεση των δύο πεδίων. Η παρούσα εργασία γεφυρώνει συστηματικά αυτή τη διάκριση, ενσωματώνοντας τη διάσταση ασφάλειας και κινδύνου στο προτεινόμενο πλαίσιο ωρίμανσης Quality 4.0 (EE3) και προτείνοντας κοινούς δείκτες (όπως το product loss και η συντήρηση εξοπλισμού) ως σημεία ταυτόχρονης παρακολούθησης ποιότητας και ασφάλειας.

2.4.3 Ασθενής Εστίαση στο Πλαίσιο της Μεσαίας Ευρωπαϊκής Βιομηχανίας

Σύμφωνα με τους Müller et al. (2018) και τους Sony et al. (2021), η βιβλιογραφία Quality 4.0 και Industry 4.0 παραμένει σε σημαντικό βαθμό προσανατολισμένη σε μεγάλες πολυεθνικές επιχειρήσεις, ενώ η εφαρμοσμένη πραγματικότητα των μικρομεσαίων ευρωπαϊκών παραγωγικών μονάδων διερευνάται περιορισμένα. Οι Müller et al. (2018) μάλιστα δείχνουν ότι οι μεσαίες επιχειρήσεις παρουσιάζουν διακριτό προφίλ ψηφιακής μετάβασης, χαρακτηριζόμενο από περιορισμένους πόρους, υβριδικά μοντέλα ψηφιοποίησης και υψηλή εξάρτηση από βασικά στελέχη.

Η εστίαση της παρούσας μελέτης σε μία μεσαία βιομηχανική μονάδα παραγωγής γεωργικών σκευασμάτων, ευρισκόμενη σε φάση ψηφιακής ωρίμανσης, συμπληρώνει αυτό το κενό με μεταφέρσιμα ευρήματα και πρακτικές κατευθύνσεις προσαρμοσμένες στις προκλήσεις του ευρωπαϊκού μεσαίου παραγωγικού οικοσυστήματος. Η μονάδα διαθέτει ώριμη ψηφιακή υποδομή (ERP, WMS, BI) χωρίς να έχει επιτύχει πλήρη δεδομενοκεντρική διοίκηση — προφίλ που είναι ιδιαίτερα αντιπροσωπευτικό της σύγχρονης ελληνικής και ευρωπαϊκής μεσαίας βιομηχανίας.

2.4.4 Έλλειψη Εφαρμόσιμων Πλαισίων Ωρίμανσης

Παρά την ύπαρξη θεωρητικών πλαισίων (Sony et al., 2021· Antony et al., 2022· Ranjith Kumar et al., 2022), η μετάφρασή τους σε εφαρμόσιμα εργαλεία αξιολόγησης και βελτίωσης παραμένει περιορισμένη. Όπως επισημαίνουν οι Saihi et al. (2023), τα υφιστάμενα πλαίσια ωρίμανσης παρουσιάζουν συχνά αφηρημένο χαρακτήρα και δεν συνοδεύονται από

συγκεκριμένους δείκτες αυτο-αξιολόγησης ούτε από βήματα μετάβασης από το τρέχον (as-is) στο επιθυμητό (to-be) επίπεδο ωρίμανσης.

Η παρούσα εργασία επιχειρεί να καλύψει αυτό το κενό προτείνοντας πλαίσιο ψηφιακής ωρίμανσης Quality 4.0 με έξι αλληλοτροφοδοτούμενους άξονες (data foundation, real-time visibility, material flow and spatial control, decision support and KPIs, organizational alignment, continuous improvement loop), εφαρμόσιμο σε επίπεδο μεσαίας βιομηχανικής μονάδας και υποστηριζόμενο από συγκεκριμένους ποσοτικούς και ποιοτικούς δείκτες αξιολόγησης. Η συνεισφορά αυτή κινείται προς την κατεύθυνση των αιτημάτων των Glogonac et al. (2020), οι οποίοι ζητούν εφαρμόσιμες μετρήσεις ωρίμανσης βασισμένες σε διεθνώς αναγνωρισμένα πρότυπα όπως το ISO 9004. Ταυτόχρονα, το προτεινόμενο πλαίσιο διαφοροποιείται από προηγούμενα μοντέλα στο ότι ενσωματώνει ρητά τη διάσταση ασφάλειας και κινδύνου (μέσω του άξονα material flow and spatial control), γεφυρώνοντας έτσι το παραδοσιακό διαχωρισμό μεταξύ Quality 4.0 και Safety 4.0.

2.4.5 Μεθοδολογικό Κενό: Έλλειψη Μικτών Προσεγγίσεων

Επιπρόσθετα προς τα παραπάνω, μία μεθοδολογική παρατήρηση συμπληρώνει την επισκόπηση των κενών. Όπως καταγράφεται από τους Bousdekis et al. (2023) και Saihi et al. (2023), η πλειονότητα των εμπειρικών μελετών Quality 4.0 βασίζεται είτε σε αμιγώς ποσοτικές προσεγγίσεις (επεξεργασία δεδομένων χωρίς οργανωτικό πλαίσιο) είτε σε αμιγώς ποιοτικές (συνεντεύξεις και case studies χωρίς ποσοτική τεκμηρίωση). Οι μικτές μεθοδολογικές προσεγγίσεις (mixed-methods), οι οποίες διασφαλίζουν τη διαμεθοδική τριγωνοποίηση και ενισχύουν την εγκυρότητα των ευρημάτων, παραμένουν σχετικά σπάνιες στο πεδίο του Quality 4.0.

Η παρούσα εργασία υιοθετεί ρητά μικτή προσέγγιση, συνδυάζοντας ποσοτική ανάλυση 1.108 εντολών παραγωγής με τέσσερις ημιδομημένες συνεντεύξεις στελεχών διαφορετικών λειτουργικών περιοχών. Η μεθοδολογική αυτή επιλογή επιτρέπει τη διασταύρωση των ποσοτικών ευρημάτων (π.χ. αποκλίσεων planned vs issued, μεταβλητοτήτων ανά παραγωγικό πόρο) με τις οργανωτικές τους ερμηνείες (π.χ. ποιοι ρόλοι συμμετέχουν στη λήψη αποφάσεων, ποιοι ψηφιακοί κανάλες χρησιμοποιούνται), ενισχύοντας έτσι τη μεθοδολογική στιβαρότητα του πεδίου και τη γενικευσιμότητα των ευρημάτων.

2.4.6 Σύνοψη και Διασύνδεση με την Παρούσα Έρευνα

Συνοψίζοντας, η συστηματική επισκόπηση της σύγχρονης βιβλιογραφίας αναδεικνύει ότι το Quality 4.0 αποτελεί ένα ταχέως εξελισσόμενο διεπιστημονικό πεδίο, χαρακτηριζόμενο από αυξανόμενη εννοιολογική ωριμότητα στο θεωρητικό επίπεδο, αλλά και από σημαντικά ερευνητικά κενά στο εμπειρικό επίπεδο. Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία τοποθετείται ακριβώς στη γραμμή σύζευξης αυτών των κενών, προσφέροντας: (α) εμπειρική τεκμηρίωση μέσω ποσοτικής ανάλυσης πραγματικού dataset 1.108 εντολών παραγωγής, (β) ενσωμάτωση της διάστασης ασφάλειας και κινδύνου στο πλαίσιο Quality 4.0 μέσω κοινών δεικτών και κοινής μεθοδολογίας, (γ) εστίαση στο μεσαίο ευρωπαϊκό βιομηχανικό περιβάλλον με χρήση συγκεκριμένης μελέτης περίπτωσης από τον κλάδο γεωργικών σκευασμάτων, (δ) διαμόρφωση συγκεκριμένου, εφαρμόσιμου πλαισίου ωρίμανσης με έξι άξονες και τέλος (ε) υιοθέτηση μικτής μεθοδολογικής προσέγγισης. Η μεθοδολογική προσέγγιση που θα οδηγήσει στην επίτευξη αυτών των στόχων παρουσιάζεται αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3. ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει αναλυτικά τη μεθοδολογική προσέγγιση της εργασίας. Η διάρθρωση ακολουθεί τη συμβατική τριάδα ερευνητικός σχεδιασμός – συλλογή δεδομένων – ανάλυση δεδομένων (Saunders et al., 2019), εμπλουτισμένη με τις απαραίτητες αναφορές σε δεοντολογικά ζητήματα και κριτήρια εγκυρότητας. Στόχος του κεφαλαίου είναι αφενός να τεκμηριωθούν με βιβλιογραφική αυστηρότητα οι μεθοδολογικές επιλογές, αφετέρου να αποτυπωθεί με διαφάνεια η αλυσίδα στοιχείων (chain of evidence) που οδηγεί από τα ερευνητικά ερωτήματα στα ευρήματα της μελέτης περίπτωσης.

3.1 Ερευνητικός Σχεδιασμός

3.1.1 Επιστημολογικό Πλαίσιο και Φιλοσοφία Έρευνας

Η εργασία υιοθετεί τη ρεαλιστική-πραγματιστική (pragmatist) επιστημολογική στάση, σύμφωνα με την οποία η φύση του ερευνητικού ερωτήματος — και όχι κάποια εκ των προτέρων φιλοσοφική δέσμευση — προσδιορίζει τις μεθοδολογικές επιλογές (Saunders et al., 2019· Tashakkori & Teddlie, 2010). Ο πραγματισμός νομιμοποιεί ως πλήρως συμβατή την παράλληλη χρήση ποσοτικών και ποιοτικών δεδομένων στην ίδια μελέτη, εφόσον αυτά τροφοδοτούν συμπληρωματικά τις απαντήσεις σε ένα κοινό ερευνητικό ερώτημα. Η επιλογή αυτή ταιριάζει στο αντικείμενο της εργασίας: το ερώτημα ΕΕΟ διερευνά μια διαδικασία μετασχηματισμού που είναι ταυτόχρονα ποσοτικά μετρήσιμη (δείκτες παραγωγής, αποκλίσεις, μεταβλητότητες) και ποιοτικά κατανοητή (οργανωτικές πρακτικές, ρόλοι, διαμεσολαβήσεις).

Η πραγματιστική θεμελίωση συνδυάζεται με ένα ερμηνευτικό υπόβαθρο για το ποιοτικό σκέλος της έρευνας (Bryman, 2016), καθώς η κατανόηση των οργανωτικών μηχανισμών που ευθύνονται για τις παρατηρούμενες αποκλίσεις απαιτεί ερμηνεία των αντιλήψεων και των πρακτικών των στελεχών. Παράλληλα, το ποσοτικό σκέλος ακολουθεί θετικιστική λογική σε επίπεδο επεξεργασίας δεδομένων, με τη χρήση κλασικών στατιστικών εργαλείων περιγραφικής και επαγωγικής ανάλυσης (Field, 2018). Η σύζευξη των δύο επιπέδων κάτω

από την πραγματιστική ομπρέλα είναι ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά των σύγχρονων μελετών Quality 4.0 σε εφαρμοσμένο επίπεδο (Sony et al., 2021· Bousdekis et al., 2023).

Η συμβατική αντίθεση μεταξύ θετικισμού και ερμηνευτισμού, η οποία κατά καιρούς εκλαμβάνεται ως αμοιβαία αποκλειόμενη, στην πραγματιστική προσέγγιση αντιμετωπίζεται ως ψευδής διχοτομία (Bryman, 2016· Tashakkori & Teddlie, 2010). Η διοίκηση επιχειρήσεων ως ερευνητικό πεδίο αξιοποιεί παραγωγικά και τους δύο πόλους: μετρά αντικειμενικά μεγέθη παραγωγής (θετικιστική παράδοση) και συγχρόνως αναγνωρίζει ότι οι οργανωτικές πραγματικότητες κατασκευάζονται κοινωνικά μέσα από καθημερινές πρακτικές, ρόλους και σχέσεις (ερμηνευτική παράδοση). Η πραγματιστική θέση επιτρέπει τη συνεκτική σύζευξη των δύο σε ενιαίο ερευνητικό σχεδιασμό, με κριτήριο τη χρησιμότητα των ευρημάτων για την απάντηση του ερευνητικού ερωτήματος και όχι την προηγούμενη φιλοσοφική δέσμευση.

3.1.2 Στρατηγική Έρευνας: Embedded Single Case Study

Η εργασία υιοθετεί ως κύρια ερευνητική στρατηγική την εμβαθυμένη μελέτη περίπτωσης (single embedded case study), ακολουθώντας τον μεθοδολογικό σχεδιασμό του Yin (2018) και την παράδοση που εδραίωσε η Eisenhardt (1989). Η επιλογή της στρατηγικής αυτής τεκμηριώνεται από τρία στοιχεία. Πρώτον, η φύση του ερευνητικού ερωτήματος επικεντρώνεται σε ερωτήματα τύπου «πώς» και «γιατί» — ερωτήματα για τα οποία η μελέτη περίπτωσης αναγνωρίζεται ως η πλέον κατάλληλη μέθοδος (Yin, 2018). Δεύτερον, η εργασία εξετάζει ένα σύγχρονο φαινόμενο (ψηφιακή ωρίμανση Quality 4.0) εντός του πραγματικού του πλαισίου, χωρίς δυνατότητα ή σκοπιμότητα ελέγχου των μεταβλητών — ένα ακόμη κριτήριο που ευνοεί την case study προσέγγιση. Τρίτον, η συγκεκριμένη επιλογή ευθυγραμμίζεται με την πλειονότητα των πρόσφατων μελετών Quality 4.0 σε εφαρμοσμένα περιβάλλοντα (Sony et al., 2021· Bousdekis et al., 2023).

Η μελέτη χαρακτηρίζεται ως «embedded» (εμβαθυμένη με πολλαπλές υπο-μονάδες ανάλυσης), διότι αναλύει τρεις διακριτές υπο-μονάδες εντός της ίδιας επιχείρησης: (α) τα ποσοτικά δεδομένα παραγωγής, (β) τις απόψεις των στελεχών από τέσσερις διαφορετικές λειτουργικές περιοχές, και (γ) τα υφιστάμενα ψηφιακά εργαλεία και διαδικασίες. Σύμφωνα με τον Yin (2018), η embedded case study προσφέρει μεγαλύτερη αναλυτική ισχύ από τη

holistic single case, καθώς επιτρέπει την εξέταση συγκεκριμένων μηχανισμών μέσα στο ευρύτερο οργανωτικό πλαίσιο και ενισχύει την αναλυτική γενικευσιμότητα των ευρημάτων. Η επιλογή μίας μόνο περίπτωσης (single case), αντί πολλαπλών (multiple cases), τεκμηριώνεται από τη φύση της μελέτης και τους δεοντολογικούς περιορισμούς πρόσβασης σε ευαίσθητα παραγωγικά δεδομένα. Όπως υποστηρίζει ο Yin (2018), η single case προσέγγιση είναι κατάλληλη όταν η περίπτωση είναι αντιπροσωπευτική ή τυπική, αποκαλυπτική, ή χρησιμοποιείται για βαθιά εμπειρική διερεύνηση ενός σύγχρονου φαινομένου. Η εξεταζόμενη βιομηχανική μονάδα, με ώριμη ψηφιακή υποδομή αλλά μερική μόνο μετάβαση σε δεδομενοκεντρική διοίκηση, αποτελεί τυπική περίπτωση της σύγχρονης ελληνικής και ευρωπαϊκής μεσαίας βιομηχανίας — και ως εκ τούτου, τα ευρήματα έχουν αυξημένη αξία αναλυτικής γενίκευσης (Eisenhardt, 1989· Yin, 2018).

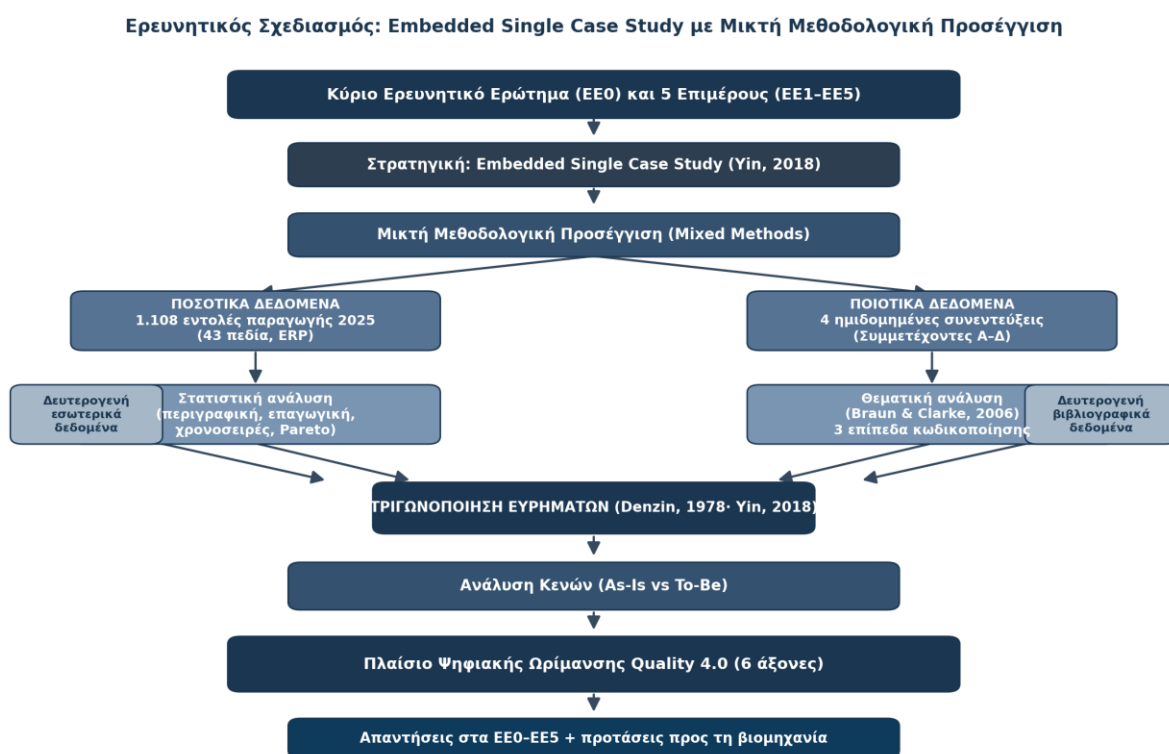
Η επιλογή της συγκεκριμένης μονάδας αποτέλεσε αντικείμενο σταθμισμένης απόφασης. Σύμφωνα με τους Eisenhardt και Graebner (2007), η επιλογή case studies σε ποιοτική έρευνα δεν στηρίζεται σε στατιστική, αλλά σε θεωρητική δειγματοληψία: η περίπτωση επιλέγεται διότι αναμένεται να φωτίσει συγκεκριμένα ερευνητικά ερωτήματα και να αναδείξει αναλυτικά ενδιαφέροντα μοτίβα. Στην παρούσα εργασία, η εξεταζόμενη μονάδα πληροί τρία κριτήρια θεωρητικής δειγματοληψίας: (α) διαθέτει ώριμη ψηφιακή υποδομή (ERP, WMS, BI, ιδιοκατασκευή εφαρμογή παρακολούθησης εντολών παραγωγής), η οποία επιτρέπει ουσιαστική μελέτη του φαινομένου Quality 4.0· (β) βρίσκεται σε ενεργή φάση μετάβασης από καταγραφή σε αξιοποίηση δεδομένων, που αποτελεί το θεωρητικά κρίσιμο σημείο της μελέτης· και (γ) επιτρέπει πρόσβαση τόσο σε ποσοτικά δεδομένα παραγωγής (1.108 εντολές με 43 πεδία) όσο και σε στελέχη με αυξημένη συμμετοχή στις διεργασίες λήψης αποφάσεων. Η δεοντολογική προϋπόθεση πρόσβασης τεκμηριώνεται μέσω εμπιστευτικής συμφωνίας ανωνυμοποίησης που τεκμηριώνεται στη συνέχεια του κεφαλαίου.

3.1.3 Μικτή Μεθοδολογική Προσέγγιση και Τριγωνοποίηση

Η εργασία υιοθετεί μικτή μεθοδολογική προσέγγιση (mixed-methods design) τύπου παράλληλης σύγκλισης (convergent parallel design), σύμφωνα με την τυπολογία των Creswell και Plano Clark (2018). Στη συγκεκριμένη προσέγγιση, ποσοτικά και ποιοτικά δεδομένα συλλέγονται και αναλύονται παράλληλα και ανεξάρτητα, και τα ευρήματα

συγκλίνουν στο στάδιο της ερμηνείας. Η επιλογή αυτή ευνοεί τη μεθοδολογική τριγωνοποίηση, δηλαδή τη χρήση πολλαπλών μεθόδων για την εξέταση του ίδιου φαινομένου, με σκοπό την ενίσχυση της εγκυρότητας των ευρημάτων (Denzin, 1978· Yin, 2018).

Πέρα από τη μεθοδολογική τριγωνοποίηση, η εργασία αξιοποιεί επίσης την τριγωνοποίηση πηγών δεδομένων (data source triangulation), διασταυρώνοντας πληροφορίες από τέσσερις ανεξάρτητες πηγές (ποσοτικά δεδομένα παραγωγής, συνεντεύξεις, εσωτερικά έγγραφα, βιβλιογραφία), και την τριγωνοποίηση θεωριών (theory triangulation), αξιοποιώντας πολλαπλά αναφορικά πλαίσια (Sony et al., 2021· Antony et al., 2022· Ranjith Kumar et al., 2022) για την ερμηνεία των ευρημάτων (Patton, 2015). Η εικόνα 3 αποτυπώνει τη συνολική αρχιτεκτονική του ερευνητικού σχεδιασμού.



Εικόνα 3. Διάγραμμα ροής του ερευνητικού σχεδιασμού: από τα ερευνητικά ερωτήματα στο τελικό πλαίσιο ωρίμανσης. Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα βάσει Yin (2018), Creswell και Plano Clark (2018) και Denzin (1978).

3.2 Συλλογή Δεδομένων

3.2.1 Επισκόπηση Πηγών Δεδομένων

Η εμπειρική ανάλυση τροφοδοτείται από τέσσερις ανεξάρτητες αλλά συμπληρωματικές πηγές δεδομένων, οι οποίες έχουν σχεδιαστεί ώστε να καλύπτουν τόσο την «αντικειμενική» (ποσοτικά μετρήσιμη) όσο και την «υποκειμενική» (ερμηνευτικά κατανοητή) διάσταση του ερευνητικού αντικειμένου. Δύο από τις πηγές είναι πρωτογενείς (ποσοτικά δεδομένα παραγωγής και ποιοτικά δεδομένα συνεντεύξεων), ενώ δύο είναι δευτερογενείς (εσωτερικά οργανωτικά έγγραφα και βιβλιογραφικά δεδομένα). Η συνδυασμένη χρήση τους ενισχύει τη μεθοδολογική στιβαρότητα και την εγκυρότητα των συμπερασμάτων (Yin, 2018· Patton, 2015).

Η συλλογή των δεδομένων διενεργήθηκε κατά τη διάρκεια του πρώτου εξαμήνου του 2026, χρονικό διάστημα που επιτρέπει την πλήρη κάλυψη του ημερολογιακού έτους 2025 και την επεξεργασία των δεδομένων μετά την οριστικοποίηση των αποτελεσμάτων παραγωγής. Η ακολουθία συλλογής ήταν: (1) εξαγωγή και προεπεξεργασία του dataset των εντολών παραγωγής από το ERP, (2) μελέτη των εσωτερικών εγγράφων και χαρτογράφηση των ψηφιακών συστημάτων, (3) διεξαγωγή των ημιδομημένων συνεντεύξεων με τους τέσσερις συμμετέχοντες, (4) συστηματική βιβλιογραφική αναζήτηση και επικαιροποίηση της θεωρητικής βάσης. Η σειρά αυτή δεν είναι τυχαία: επιτρέπει την προοδευτική εμβάθυνση στο ερευνητικό αντικείμενο, ώστε οι συνεντεύξεις να διεξάγονται με ήδη ωριμασμένη κατανόηση του ποσοτικού πλαισίου, και η βιβλιογραφική επανεξέταση να καθοδηγείται από τις εμπειρικά αναδυόμενες ερωτήσεις.

3.2.2 Πρωτογενή Ποσοτικά Δεδομένα: Σύνολο Εντολών Παραγωγής

Η κύρια ποσοτική πηγή της εργασίας αποτελεί σύνολο 1.108 εντολών παραγωγής (Work Orders) που εξάγονται από το ERP της εξεταζόμενης μονάδας για το ημερολογιακό έτος 2025 σε μορφή Excel. Κάθε εγγραφή περιλαμβάνει 43 πεδία δεδομένων, οργανωμένα σε έξι λειτουργικές κατηγορίες: (α) ταυτοποιητικά πεδία (κωδικός εγγράφου, κωδικός είδους, περιγραφή, παραγωγικός πόρος), (β) χρονικά πεδία (Start/Delivery date, Production Time

Planned/Issued, Cleaning Time Planned/Issued), (γ) πεδία ποσοτήτων (Planned Quantity, Completed Quantity, Product Loss σε μονάδες και ποσοστό), (δ) πεδία ανθρώπινου παράγοντα (Workers Planned/Issued, Total Man-Hours Planned/Issued), (ε) πεδία απόδοσης (Throughput, Labour Productivity, Total Production Time Deviation %) και (στ) πεδία κόστους (Unit Price, Unit Cost, Unit Labor Cost, Unit Material Cost, Material-to-Labor Cost Ratio).

Η ποιότητα του dataset αξιολογείται πριν από κάθε ανάλυση μέσω συστηματικού ελέγχου: αναγνώριση τιμών εκτός εύρους (out-of-range), εντοπισμός κενών εγγραφών, διασταύρωση συνέπειας μεταξύ σχετιζόμενων πεδίων (π.χ. Total Production Time = Production Time + Cleaning Time) και επικύρωση τυχαία επιλεγμένων εγγραφών έναντι των αρχικών αρχείων ERP. Η διαδικασία αυτή ευθυγραμμίζεται με τις αρχές ποιότητας δεδομένων που έχουν εδραιωθεί στη βιβλιογραφία (Wang & Strong, 1996) και αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την επιστημονική στιβαρότητα της επόμενης ανάλυσης.

3.2.3 Πρωτογενή Ποιοτικά Δεδομένα: Ημιδομημένες Συνεντεύξεις

Παράλληλα με τα ποσοτικά δεδομένα, διενεργήθηκαν τέσσερις ημιδομημένες συνεντεύξεις με στελέχη της επιχείρησης που καλύπτουν διαφορετικές λειτουργικές περιοχές: τον Συμμετέχοντα Α (Προγραμματισμός Παραγωγής), τον Συμμετέχοντα Β (Διοίκηση), τον Συμμετέχοντα Γ (Επίβλεψη Παραγωγής) και τον Συμμετέχοντα Δ (Διαχείριση Ποιότητας). Η επιλογή των τεσσάρων ρόλων δεν είναι τυχαία: καλύπτει ολόκληρη τη ροή λήψης αποφάσεων από τον σχεδιασμό μέχρι τον έλεγχο, και επιτρέπει την αποτύπωση των διαφορετικών οπτικών στα ίδια ερωτήματα — ζητούμενο που συνιστά την «οπτική πλουραλιστικότητα» που εξυπηρετεί η μέθοδος (Patton, 2015· Miles et al., 2014).

Το μέγεθος του δείγματος (n=4) τεκμηριώνεται από την αρχή του ποιοτικού κορεσμού (qualitative saturation), σύμφωνα με την οποία οι συνεντεύξεις σταματούν όταν παύουν να αναδύονται νέα θέματα από επιπρόσθετους ερωτηθέντες (Saunders et al., 2019). Σε μελέτες περίπτωσης που αξιοποιούν παράλληλα ποσοτικά δεδομένα — όπως η παρούσα — μικρά αλλά στρατηγικά επιλεγμένα δείγματα 4–6 στελεχών θεωρούνται επαρκή για τη συγκάλυψη της οργανωτικής πολυφωνίας, εφόσον καλύπτουν τις βασικές λειτουργικές περιοχές (Eisenhardt, 1989· Yin, 2018).

Η δομή των συνεντεύξεων ακολουθεί τους πέντε άξονες ανάλυσης του Briefing Pack: αξιοπιστία δεδομένων, ορατότητα παραγωγής, ροή υλικών και χωροταξία, συντονισμός και ρόλοι, συνεχής βελτίωση. Κάθε συνέντευξη διαρκεί περίπου 60 λεπτά, διεξάγεται διά ζώσης ή μέσω βιντεοκλήσης, καταγράφεται μαγνητοφωνικά με τη ρητή συγκατάθεση των συμμετεχόντων και απομαγνητοφωνείται κατά λέξη. Η ταυτότητα των ερωτηθέντων ανωνυμοποιείται ήδη κατά τη φάση της απομαγνητοφώνησης μέσω της απόδοσης κωδικών Α/Β/Γ/Δ, σε ευθυγράμμιση με τις βέλτιστες πρακτικές δεοντολογικής έρευνας (Patton, 2015). Το πρωτόκολλο συνεντεύξεων είναι ημιδομημένο και διαρθρώνεται σε πέντε θεματικές ενότητες που αντιστοιχούν στους άξονες ανάλυσης. Κάθε ενότητα περιλαμβάνει τρεις έως πέντε ανοιχτές ερωτήσεις (open-ended questions), συμπληρωμένες από διευκρινιστικές επί τόπου ερωτήσεις (probes) που αναδύονται από τις απαντήσεις του συμμετέχοντα (Patton, 2015). Ενδεικτικές ερωτήσεις περιλαμβάνουν: «Πώς λαμβάνετε σήμερα αποφάσεις προγραμματισμού παραγωγής με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα;», «Ποιες αποκλίσεις μεταξύ προγραμματισμένου και πραγματικού χρόνου παραγωγής παρατηρείτε πιο συχνά και πώς τις ερμηνεύετε;», «Ποια ψηφιακά εργαλεία χρησιμοποιείτε καθημερινά και ποια θεωρείτε ότι θα έπρεπε να αξιοποιούνται περισσότερο;», «Πού εντοπίζετε ότι υπάρχουν τα μεγαλύτερα περιθώρια ψηφιακής βελτίωσης στην τρέχουσα ροή εργασίας σας;». Η ροή των ερωτήσεων προσαρμόζεται ευέλικτα στις απαντήσεις, ακολουθώντας τις αρχές του responsive interviewing (Rubin & Rubin, 2012), ώστε να αναδειχθούν με φυσικό τρόπο οι σημαντικές πτυχές που τονίζει κάθε ερωτηθείς, χωρίς όμως να χάνεται η συγκρισιμότητα μεταξύ των συνεντεύξεων.

3.2.4 Δευτερογενή Εσωτερικά Δεδομένα

Πέραν των πρωτογενών πηγών, η εργασία αξιοποιεί δευτερογενή εσωτερικά δεδομένα προερχόμενα από: οργανωτικά διαγράμματα, περιγραφές των ψηφιακών συστημάτων (ERP, WMS, BI, ιδιοκατασκευή εφαρμογή), τυποποιημένες διαδικασίες και εσωτερικούς οδηγούς ποιότητας. Αυτά τα έγγραφα αποτελούν την τεκμηρίωση των επίσημων διαδικασιών της επιχείρησης και χρησιμοποιούνται για τη διασταύρωση των στοιχείων που προκύπτουν από τα ποσοτικά δεδομένα και τις συνεντεύξεις. Η ανάλυσή τους ακολουθεί απλή τεχνική

document analysis (Bowen, 2009), με συστηματική καταγραφή σε δομημένο πίνακα αντιστοίχισης διαδικασία–ψηφιακό σύστημα–εμπλεκόμενος ρόλος.

3.2.5 Δευτερογενή Βιβλιογραφικά Δεδομένα

Η βιβλιογραφική επισκόπηση που τροφοδότησε τα Κεφάλαια 1 και 2 ακολούθησε δομημένη μεθοδολογία αναζήτησης, σύμφωνη με τις αρχές της συστηματικής ανασκόπησης σε διοικητικές επιστήμες (Tranfield et al., 2003· Snyder, 2019). Οι αναζητήσεις πραγματοποιήθηκαν στις βάσεις Scopus, Web of Science και Google Scholar, για την περίοδο 2019–2026, με βασικές λέξεις-κλειδιά: «Quality 4.0», «Industry 4.0 quality management», «digital quality management», «Safety 4.0», «predictive maintenance» και συναφείς συνδυασμούς. Τα κριτήρια ένταξης περιελάμβαναν: δημοσιεύσεις σε ακαδημαϊκά περιοδικά με κριτές, αγγλόφωνη ή ελληνική γλώσσα, και άμεση σχέση με το θέμα. Τα κριτήρια αποκλεισμού περιελάμβαναν: μη ακαδημαϊκές πηγές (π.χ. εμπορικά λευκά βιβλία), δημοσιεύσεις χωρίς κριτές, εργασίες χωρίς πλήρες κείμενο. Επιπρόσθετα, αξιοποιήθηκαν διεθνή πρότυπα του Διεθνούς Οργανισμού Τυποποίησης (ISO 9001, ISO 31000, ISO 45001) ως αναφορικές πηγές.

Η αρχική αναζήτηση παρήγαγε σημαντικό αριθμό αποτελεσμάτων, τα οποία στη συνέχεια διηθήθηκαν διαδοχικά: αρχικά μέσω τίτλου και περίληψης (screening), εν συνεχεία μέσω πλήρους ανάγνωσης (eligibility check) και τελικά μέσω αξιολόγησης συνάφειας με τα ερευνητικά ερωτήματα. Η ποιότητα των πηγών αξιολογήθηκε με βάση τη φήμη του περιοδικού (δείκτες αναφοράς όπως Q1–Q4 και impact factor), τη μεθοδολογική αυστηρότητα και τη χρονική εγγύτητα, με σαφή προτίμηση σε δημοσιεύσεις της τελευταίας πενταετίας. Συμπληρωματικές πηγές εντοπίστηκαν μέσω backward και forward snowballing — δηλαδή μέσω εξέτασης των βιβλιογραφικών αναφορών των ήδη εντοπισμένων κειμένων (backward) και των επόμενων κειμένων που τα παραπέμπουν (forward) — ακολουθώντας τις αρχές που διατυπώνει ο Wohlin (2014) για την επαναληψιμότητα της συστηματικής βιβλιογραφικής διερεύνησης.

3.3 Ανάλυση Δεδομένων

Για την ανάλυση των δεδομένων εφαρμόζονται τέσσερις συμπληρωματικές αναλυτικές τεχνικές, η καθεμία προσαρμοσμένη στη φύση της αντίστοιχης πηγής δεδομένων. Ο Πίνακας 3 συνοψίζει την αντιστοίχιση των ερευνητικών ερωτημάτων με τις πηγές δεδομένων και τις αναλυτικές μεθόδους που εφαρμόζονται για την απάντησή τους.

Πίνακας 3. Αντιστοίχιση ερευνητικών ερωτημάτων, πηγών δεδομένων και αναλυτικών μεθόδων.

ΕΕ	Περιεχόμενο ερωτήματος	Πηγές δεδομένων	Αναλυτικές μέθοδοι
ΕΕ1	Αξιοπιστία δεδομένων βάσης	Ποσοτικά WO + συνεντεύξεις	Στατιστική (planned vs issued)· θεματική ανάλυση
ΕΕ2	Ψηφιακή ορατότητα παραγωγής	Ποσοτικά WO + εσωτερικά έγγραφα + συνεντεύξεις	Στατιστική (throughput, productivity)· document analysis
ΕΕ3	Διαχείριση κινδύνου / ασφάλειας	Ποσοτικά WO (product loss) + συνεντεύξεις + βιβλιογραφία	Στατιστική (απώλειες)· θεματική ανάλυση
ΕΕ4	Οργανωτική / διαχειριστική διάσταση	Συνεντεύξεις + εσωτερικά έγγραφα	Θεματική ανάλυση· document analysis
ΕΕ5	Πλαίσιο ωρίμανσης Quality 4.0	Όλες οι πηγές	Ανάλυση κενών· σύνθεση πλαισίου

Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα βάσει του πλαισίου ανάλυσης που τεκμηριώνεται στις §3.2 και §3.3.

3.3.1 Ποσοτική Ανάλυση των Δεδομένων Παραγωγής

Η ποσοτική ανάλυση εφαρμόζεται επί του dataset των 1.108 εντολών παραγωγής και ακολουθεί την κλασική προσέγγιση Exploratory Data Analysis του Tukey (1977), διαρθρωμένη σε τέσσερις διαδοχικές φάσεις. Στην πρώτη φάση (περιγραφική ανάλυση) υπολογίζονται μέτρα κεντρικής τάσης (μέσος όρος, διάμεσος) και διασποράς (τυπική απόκλιση, ποσοστημόρια 25/50/75) ανά κατηγορία προϊόντος (P-FIN, P-SEMI) και ανά

παραγωγικό πόρο (R1–R5). Στη δεύτερη φάση (συγκριτική ανάλυση) ελέγχεται η απόκλιση μεταξύ προγραμματισμένων και πραγματικών μεγεθών (planned vs issued) μέσω του δείκτη $\Delta P\% = (\text{Issued} - \text{Planned}) / \text{Planned} \times 100$, με συγκεντρωτική αποτύπωση σε boxplots, ιστογράμματα και Pareto charts. Στην τρίτη φάση (ανάλυση συσχέτισης) εφαρμόζονται συντελεστές Pearson και Spearman για την εξέταση των σχέσεων μεταξύ μεταβλητών απόδοσης (Field, 2018). Στην τέταρτη φάση (διαχρονική ανάλυση) χρησιμοποιούνται γραμμικά διαγράμματα μηνιαίας εξέλιξης και control charts τύπου $\bar{X}$ -R για τον εντοπισμό τάσεων και απότομων μεταβολών.

Η υπολογιστική υλοποίηση πραγματοποιείται σε γλώσσα Python με τις βιβλιοθήκες pandas, scipy και matplotlib για στατιστική επεξεργασία και οπτικοποίηση, ενώ τα αποτελέσματα διασταυρώνονται με ελέγχους σε Microsoft Excel για βασικά μεγέθη. Η επιλογή της Python αντί άλλων εργαλείων (π.χ. SPSS, R) αιτιολογείται από τη διαφάνεια του κώδικα, την επαναληψιμότητα των αναλύσεων και τη συμβατότητα με σύγχρονες πρακτικές ανοιχτής επιστήμης (Saihi et al., 2023). Όλες οι παρουσιαζόμενες τιμές κόστους κανονικοποιούνται με βάση 100 (indexed values), σύμφωνα με το πρωτόκολλο ανωνυμοποίησης που τεκμηριώνεται στη συνέχεια.

3.3.2 Θεματική Ανάλυση των Συνεντεύξεων

Η ανάλυση των απομαγνητοφωνημένων συνεντεύξεων εφαρμόζει τη μεθοδολογία θεματικής ανάλυσης (thematic analysis) των Braun και Clarke (2006), η οποία αποτελεί την πλέον διαδεδομένη μέθοδο ποιοτικής ανάλυσης σε διοικητικές μελέτες περίπτωσης. Η μέθοδος διαρθρώνεται σε έξι διαδοχικές φάσεις: (1) εξοικείωση με τα δεδομένα μέσω επαναλαμβανόμενης ανάγνωσης, (2) παραγωγή αρχικών κωδικών (initial codes), (3) αναζήτηση θεμάτων από τη συσχέτιση κωδικών, (4) επανεξέταση των θεμάτων ως προς την εσωτερική συνοχή και την εξωτερική διαφοροποίηση, (5) ορισμός και ονοματοδοσία των θεμάτων και (6) σύνθεση της τελικής αναφοράς με αντιπροσωπευτικά αποσπάσματα.

Η κωδικοποίηση πραγματοποιείται σε τρία επίπεδα, σύμφωνα με την παράδοση της Grounded Theory (Charmaz, 2014· Miles et al., 2014): (α) open coding, όπου εντοπίζονται κωδικοί που αναδύονται απευθείας από τα δεδομένα, (β) axial coding, όπου οι κωδικοί ομαδοποιούνται σε ευρύτερες κατηγορίες και αναδεικνύονται οι σχέσεις μεταξύ τους και (γ)

selective coding, όπου επιλέγονται τα κύρια θέματα που οργανώνουν την αφήγηση. Η όλη διαδικασία τεκμηριώνεται σε δομημένο codebook (Πίνακας Π4.8 στο Κεφάλαιο 4), το οποίο περιλαμβάνει τους κωδικούς, τους ορισμούς τους και αντιπροσωπευτικά αποσπάσματα, με αναγνώριση των ερωτηθέντων μόνο μέσω των κωδικών Α/Β/Γ/Δ.

Η αξιοπιστία της κωδικοποίησης (coding reliability) ενισχύεται μέσω επαναληπτικής αναθεώρησης σε τουλάχιστον δύο γύρους με διάστημα τουλάχιστον δύο εβδομάδων (intra-rater reliability), σύμφωνα με τις συστάσεις των Miles et al. (2014). Τα ποιοτικά θέματα οργανώνονται στους πέντε άξονες ανάλυσης του briefing pack, επιτρέποντας τη συστηματική σύζευξη με τα ποσοτικά ευρήματα κατά τη φάση της τριγωνοποίησης.

3.3.3 Ανάλυση Κενών (Gap Analysis)

Η ανάλυση κενών (gap analysis) εφαρμόζεται για τη συστηματική σύγκριση της υφιστάμενης κατάστασης (as-is) με το ώριμο στάδιο (to-be) όπως αυτό ορίζεται στα αναφορικά πλαίσια των Sony et al. (2021) και των Antony et al. (2022). Η διαδικασία περιλαμβάνει τρία βήματα: (α) αποτύπωση της υφιστάμενης κατάστασης σε καθεμία από τις πέντε διαστάσεις του αναφορικού πλαισίου (data, technology, process, people, strategy), με βάση τα ποσοτικά και ποιοτικά ευρήματα, (β) προσδιορισμό του επιθυμητού επιπέδου ωρίμανσης σε κλίμακα Likert 1–5 ανά διάσταση, και (γ) υπολογισμό του κενού (gap) ανά διάσταση. Το αποτέλεσμα αποτυπώνεται σε ραδιακό διάγραμμα (radar chart) και σε μήτρα ωρίμανσης (maturity matrix) στο Κεφάλαιο 4.

3.3.4 Σύνθεση Πλαισίου Ψηφιακής Ωρίμανσης

Η τελική σύνθεση του προτεινόμενου πλαισίου ωρίμανσης Quality 4.0 ακολουθεί την τεχνική abductive reasoning (Eisenhardt, 1989), η οποία συνδυάζει εμπειρικά ευρήματα με υφιστάμενες θεωρητικές κατασκευές για τη διαμόρφωση νέων αναλυτικών εργαλείων. Ειδικότερα, τα ποσοτικά και ποιοτικά ευρήματα της μελέτης περίπτωσης χαρτογραφούνται έναντι των πέντε διαστάσεων των Ranjith Kumar et al. (2022) και των διαστάσεων απόδοσης των Antony et al. (2022), και από τη χαρτογράφηση αυτή προκύπτουν οι έξι άξονες του

προτεινόμενου πλαισίου (data foundation, real-time visibility, material flow and spatial control, decision support and KPIs, organizational alignment, continuous improvement loop).

3.3.5 Εγκυρότητα, Αξιοπιστία και Δεοντολογικά Ζητήματα

Η εγκυρότητα και η αξιοπιστία της έρευνας εξασφαλίζονται μέσω πολλαπλών μηχανισμών. Σύμφωνα με τη συμβατική τυπολογία του Yin (2018), τέσσερις διαστάσεις εγκυρότητας λαμβάνονται υπόψη: (α) construct validity, η οποία ενισχύεται μέσω τριγωνοποίησης πολλαπλών πηγών δεδομένων και διατήρησης αλυσίδας στοιχείων (chain of evidence), (β) internal validity, η οποία ενισχύεται μέσω αντιπαραβολής εναλλακτικών ερμηνειών (pattern matching), (γ) external validity (αναλυτική γενικευσιμότητα), η οποία επιτυγχάνεται μέσω σύνδεσης των ευρημάτων με υπάρχοντα θεωρητικά πλαίσια και (δ) reliability, η οποία ενισχύεται μέσω της πλήρους τεκμηρίωσης των διαδικασιών και της δημιουργίας ενός case study database με όλα τα ενδιαμέσως τεκμήρια. Παράλληλα, τα κριτήρια trustworthiness των Lincoln και Guba (1985) — credibility, transferability, dependability, confirmability — εφαρμόζονται στο ποιοτικό σκέλος της έρευνας.

Σε επίπεδο δεοντολογίας, η εργασία ακολουθεί αυστηρό πρωτόκολλο εμπιστευτικότητας. Όλα τα στοιχεία της επιχείρησης (επωνυμία, εμπορικά brands, πελάτες, πραγματικοί κωδικοί προϊόντων, εμπορικά ευαίσθητες ποσότητες, ονόματα στελεχών) παρουσιάζονται αποκλειστικά σε ανωνυμοποιημένη και συγκεντρωτική μορφή. Συγκεκριμένα, τα τελικά προϊόντα αναφέρονται λειτουργικά ως «P-FIN», τα ημιέτοιμα ως «P-SEMI», οι παραγωγικοί πόροι ως «R1–R5» χωρίς αναφορά σε συγκεκριμένες γραμμές, και όλα τα κόστη παρουσιάζονται σε normalized μορφή (με βάση 100). Οι συμμετέχοντες στις συνεντεύξεις αναφέρονται με κωδικούς Α–Δ. Η συμμετοχή στις συνεντεύξεις στηρίχθηκε σε ενημερωμένη συγκατάθεση (informed consent), με ρητή δυνατότητα αποχώρησης από την έρευνα οποιαδήποτε στιγμή. Σχετική δήλωση εμπιστευτικότητας τοποθετείται στην αρχή του Κεφαλαίου 4, σύμφωνα με τις βέλτιστες πρακτικές δεοντολογίας στην ποιοτική έρευνα (Patton, 2015· Bryman, 2016).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΤΗΣ ΜΕΛΕΤΗΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗΣ

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζουμε τα εμπειρικά ευρήματα της μελέτης περίπτωσης, τα οποία συγκροτούν τον αναλυτικό πυρήνα της εργασίας. Η διάρθρωση ακολουθεί τη λογική των ερευνητικών ερωτημάτων: αφού περιγράψουμε το προφίλ της μονάδας και τη δομή των δεδομένων, εξετάζουμε διαδοχικά την αξιοπιστία των δεδομένων βάσης (EE1), την ψηφιακή ορατότητα και τη μεταβλητότητα της παραγωγής (EE2), τη διάσταση κινδύνου, απωλειών και ασφάλειας (EE3) και την οργανωτική και διαχειριστική διάσταση όπως αναδεικνύεται από τις συνεντεύξεις (EE4). Το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την ανάλυση κενών και τη σύνθεση του προτεινόμενου πλαισίου ψηφιακής ωρίμανσης (EE5). Σε όλη την έκταση της ανάλυσης διατηρούμε την αλυσίδα στοιχείων από τα ερευνητικά ερωτήματα προς τα ευρήματα, σύμφωνα με τον μεθοδολογικό σχεδιασμό του προηγούμενου κεφαλαίου (Yin, 2018).

Δήλωση εμπιστευτικότητας. Σύμφωνα με το δεοντολογικό πρωτόκολλο της παραγράφου 3.3.5, όλα τα στοιχεία της επιχείρησης παρουσιάζονται σε ανωνυμοποιημένη και συγκεντρωτική μορφή. Τα τελικά προϊόντα αναφέρονται ως P-FIN, τα ημιέτοιμα ως P-SEMI, οι παραγωγικοί πόροι ομαδοποιούνται σε πέντε λειτουργικές κατηγορίες R1 έως R5 και όλες οι τιμές κόστους εκφράζονται σε κανονικοποιημένη μορφή με βάση 100. Οι τέσσερις συμμετέχοντες στις συνεντεύξεις αναφέρονται με τους κωδικούς Α έως Δ. Καμία πληροφορία που θα μπορούσε να ταυτοποιήσει την επιχείρηση, τους πελάτες ή τα στελέχη της δεν περιλαμβάνεται στην παρουσίαση.

4.1 Προφίλ της Μονάδας και Δομή των Δεδομένων

4.1.1 Περιγραφή της Εξεταζόμενης Μονάδας

Η εξεταζόμενη μονάδα δραστηριοποιείται στον κλάδο παραγωγής γεωργικών σκευασμάτων, παράγοντας τόσο τελικά συσκευασμένα προϊόντα φυτοπροστασίας όσο και ημιέτοιμα διαλύματα δραστικών ουσιών που τροφοδοτούν επόμενα στάδια συσκευασίας. Πρόκειται για μεσαία βιομηχανική μονάδα με ώριμη ψηφιακή υποδομή, η οποία περιλαμβάνει σύστημα διαχείρισης εταιρικών πόρων (ERP), σύστημα διαχείρισης αποθήκης (WMS), εργαλεία επιχειρηματικής ευφυΐας (BI) και μια ιδιοκατασκευή εφαρμογή παρακολούθησης

των εντολών παραγωγής. Το προφίλ αυτό, με ισχυρή ψηφιακή καταγραφή αλλά μερική μόνο μετατροπή των δεδομένων σε αποφάσεις βελτίωσης, είναι ιδιαίτερα αντιπροσωπευτικό της σύγχρονης ελληνικής και ευρωπαϊκής μεσαίας βιομηχανίας (Müller et al., 2018· Sony et al., 2021).

Η παραγωγική διαδικασία οργανώνεται σε δύο βασικά στάδια. Στο πρώτο, η ανάμιξη και η σύνθεση των δραστικών ουσιών πραγματοποιούνται σε δεξαμενές και αναμικτήρες, παράγοντας ημιέτοιμα διαλύματα. Στο δεύτερο, η συσκευασία και ο εμφιαλισμός των τελικών προϊόντων διενεργούνται σε γραμμές συσκευασίας διαφορετικής δυναμικότητας. Η διάκριση αυτή είναι κρίσιμη για την ερμηνεία των ευρημάτων, καθώς τα δύο στάδια εμφανίζουν θεμελιωδώς διαφορετική δομή κόστους, μεταβλητότητας και κινδύνου, όπως θα αναδείξουμε στη συνέχεια.

4.1.2 Δομή και Έκταση του Συνόλου Δεδομένων

Το πρωτογενές ποσοτικό υλικό αποτελείται από 1.108 εντολές παραγωγής (Work Orders) του ημερολογιακού έτους 2025, καθεμία από τις οποίες περιγράφεται από 43 πεδία δεδομένων. Τα πεδία οργανώνονται σε έξι λειτουργικές κατηγορίες, οι οποίες αποτυπώνονται στον Πίνακα 4 μαζί με ενδεικτικά πεδία και τον ρόλο τους στην ανάλυση. Η δομή αυτή καλύπτει ολόκληρο τον κύκλο μιας εντολής παραγωγής, από την ταυτοποίηση και τον χρονικό προγραμματισμό έως την απόδοση, τις απώλειες και το κόστος, επιτρέποντας πολυδιάστατη ανάλυση της παραγωγικής επίδοσης.

Πίνακας 4. Δομή του συνόλου δεδομένων των 1.108 εντολών παραγωγής ανά λειτουργική κατηγορία πεδίων.

Κατηγορία πεδίων	Ενδεικτικά πεδία	Ρόλος στην ανάλυση
Ταυτοποιητικά	Κωδικός εγγράφου, κωδικός είδους, περιγραφή, παραγωγικός πόρος	Ομαδοποίηση ανά προϊόν και πόρο
Χρονικά	Start/Delivery date, Production και Cleaning Time (Planned/Issued)	Ανάλυση αποκλίσεων χρόνου
Ποσότητες	Planned Quantity, Completed Quantity, Product Loss (U και %)	Ανάλυση απωλειών και πληρότητας
Ανθρώπινος παράγοντας	Workers (Planned/Issued), Total Man-Hours (Planned/Issued)	Ανάλυση εργατικής απασχόλησης
Απόδοση	Throughput, Labour Productivity, Total Time Deviation %	Δείκτες παραγωγικότητας
Κόστος	Unit Price/Cost, Unit Labor/Material Cost, Material-to-Labor Ratio	Ανάλυση δομής κόστους (κανονικοποιημένη)

Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα από το σύνολο δεδομένων εντολών παραγωγής έτους 2025.

Από τις 1.108 εντολές, οι 743 (67,1%) αφορούν τελικά προϊόντα (P-FIN) και οι 365 (32,9%) ημιέτοιμα διαλύματα (P-SEMI). Η αναλογία αυτή αντικατοπτρίζει τη φύση της μονάδας ως κατά κύριο λόγο μονάδας συσκευασίας τελικών προϊόντων, με σημαντικό όμως όγκο εσωτερικής παραγωγής ημιετοιμών που τροφοδοτεί τη ροή.

4.1.3 Έλεγχος Ποιότητας των Δεδομένων

Πριν από κάθε ανάλυση εφαρμόσαμε συστηματικό έλεγχο ποιότητας των δεδομένων, σύμφωνα με τις διαστάσεις που έχει εδραιώσει η βιβλιογραφία της ποιότητας δεδομένων (Wang & Strong, 1996). Ελέγξαμε τη συνέπεια μεταξύ σχετιζόμενων πεδίων (για παράδειγμα, ότι ο συνολικός χρόνος παραγωγής ισούται με το άθροισμα χρόνου παραγωγής και χρόνου

καθαρισμού), εντοπίσαμε εγγραφές με ελλείπουσες ή μη υπολογίσιμες τιμές σε σύνθετους δείκτες και διασταυρώσαμε τυχαία επιλεγμένες εγγραφές με τα αρχικά αρχεία του ERP. Η ανάλυση των αποκλίσεων χρόνου διενεργείται επί 1.000 εντολών για τις οποίες υπήρχαν πλήρη και υπολογίσιμα χρονικά δεδομένα, ενώ η ανάλυση της παραγωγικότητας επί 987 εντολών. Ο εντοπισμός 108 εγγραφών με μη υπολογίσιμο δείκτη απόκλισης χρόνου συνιστά αυτό καθαυτό ένα πρώτο εμπειρικό εύρημα ανωριμότητας στον άξονα της αξιοπιστίας των δεδομένων βάσης, στο οποίο επανερχόμαστε στην παράγραφο 4.2.

4.2 Περιγραφική Ανάλυση και Αξιοπιστία των Δεδομένων Βάσης (ΕΕ1)

Η περιγραφική ανάλυση των κύριων μεταβλητών παραγωγής συνοψίζεται στον Πίνακα 5. Το πρώτο και πλέον εμφανές εύρημα είναι η εξαιρετικά υψηλή ετερογένεια του παραγωγικού μείγματος: η προγραμματισμένη ποσότητα παρουσιάζει μέση τιμή 3.924 μονάδων αλλά διάμεσο μόλις 1.200 μονάδων, με συντελεστή μεταβλητότητας 137,8%. Η μεγάλη απόσταση μεταξύ μέσου όρου και διαμέσου υποδεικνύει έντονα ασύμμετρη κατανομή, με λίγες εντολές πολύ μεγάλου όγκου να συνυπάρχουν με πλήθος εντολών μικρού όγκου, μοτίβο τυπικό μονάδων που εξυπηρετούν ταυτόχρονα μαζική και κατά παραγγελία παραγωγή.

Πίνακας 5. Περιγραφικά στατιστικά των κύριων μεταβλητών παραγωγής (σύνολο εντολών).

Μεταβλητή	N	Μέσος	Διάμεσος	Τυπ. απόκλ.	CV%
Προγραμματισμένη ποσότητα (U) (τεμάχια)	1.108	3.924	1.200	5.407	137,8
Ολοκληρωμένη ποσότητα (U) (τεμάχια)	1.108	3.909	1.200	5.400	138,1
Απόκλιση χρόνου ΔΤ%	1.000	2,5	7,1	18,8	—
Throughput (U/min)	1.000	9,65	4,96	17,04	176,6
Παραγωγικότητα (U/Man-Hour)	987	425,8	134,0	1.015,2	238,4
Απώλεια προϊόντος (%)	1.108	-0,26	0,00	10,32	—

Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα από το σύνολο δεδομένων εντολών παραγωγής έτους 2025.

4.2.1 Κατηγορίες Προϊόντος και Όγκοι Παραγωγής

Η ανάλυση ανά κατηγορία προϊόντος, που παρουσιάζεται στον Πίνακα 6, αποκαλύπτει δύο σαφώς διακριτά παραγωγικά καθεστώτα. Τα ημιέτοιμα (P-SEMI) παράγονται σε μεγάλες, σχετικά ομοιογενείς παρτίδες, με μέση προγραμματισμένη ποσότητα 9.288 μονάδων και χαμηλό συντελεστή μεταβλητότητας όγκου (62,8%), ενώ τα τελικά προϊόντα (P-FIN) παράγονται σε μικρότερες και πολύ πιο μεταβλητές παρτίδες (μέσος όρος 1.288 μονάδων, CV 186,9%). Η διαφορά αυτή είναι αναμενόμενη: η ανάμιξη γίνεται σε μεγάλες παρτίδες δραστικής ουσίας, οι οποίες στη συνέχεια κατατέμνονται σε πολλαπλές μικρότερες συσκευασίες τελικού προϊόντος.

Πίνακας 6. Συγκριτικά στατιστικά απόδοσης ανά κατηγορία προϊόντος (P-FIN έναντι P-SEMI).

Δείκτης	P-FIN (n=743)	P-SEMI (n=365)	Παρατήρηση
Μέση προγραμμ. ποσότητα (U)	1.288	9.288	Μεγάλες παρτίδες ημιετοιμών
CV προγραμμ. ποσότητας (%)	186,9	62,8	Υψηλή ετερογένεια τελικών
Μέση απόκλιση χρόνου ΔΤ%	-1,1	+9,97	Συστηματική υπέρβαση ημιετοιμών
Μέσο throughput (U/min)	4,31	20,85	Υψηλότερη ροή στην ανάμιξη
Μέση παραγωγικότητα (U/Mh)	108,3	1.084,7	Εντάσεως εργασίας η συσκευασία

Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα από το σύνολο δεδομένων εντολών παραγωγής έτους 2025.

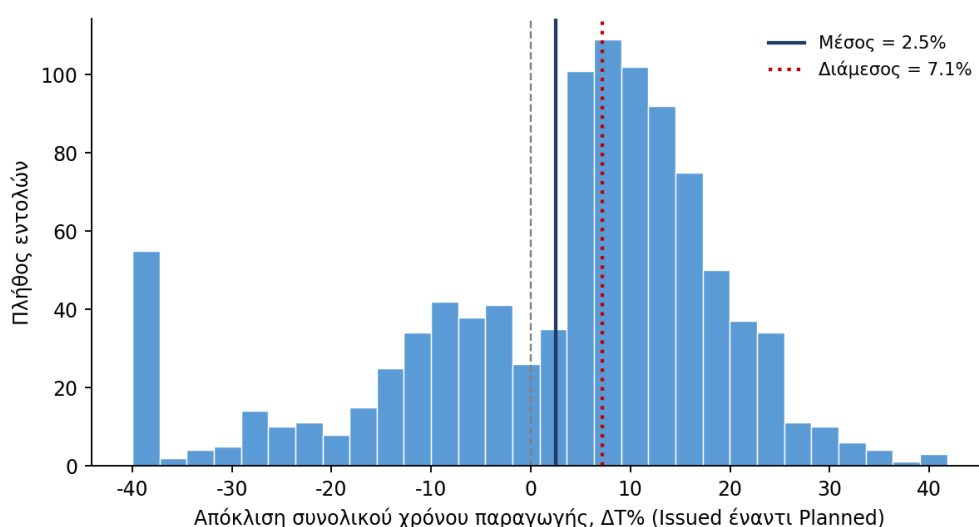
Το εύρημα αυτό έχει άμεσες συνέπειες για τη διαχείριση ποιότητας: τα δύο στάδια απαιτούν διαφορετικά συστήματα ελέγχου και διαφορετικούς δείκτες παρακολούθησης, και η αντιμετώπισή τους με ενιαία λογική προγραμματισμού, όπως παρατηρήσαμε στην πράξη, αποτελεί πηγή συστηματικών αποκλίσεων.

4.2.2 Αξιοπιστία των Δεδομένων Βάσης: Προγραμματισμός έναντι Πραγματικότητας

Το κεντρικό ερώτημα του ΕΕ1 αφορά την αξιοπιστία των δεδομένων βάσης, την οποία λειτουργικοποιούμε ως τον βαθμό σύγκλισης μεταξύ προγραμματισμένων και πραγματικών χρόνων παραγωγής. Η κατανομή του δείκτη απόκλισης συνολικού χρόνου παραγωγής (ΔΤ%) παρουσιάζεται στην Εικόνα 4. Η κατανομή είναι μετατοπισμένη προς τα δεξιά, με μέση απόκλιση +2,5% και διάμεσο +7,1%, υποδεικνύοντας ότι στις περισσότερες εντολές ο

πραγματικός χρόνος υπερβαίνει τον προγραμματισμένο. Η συστηματική αυτή μετατόπιση συνιστά ένδειξη αισιόδοξης μεροληψίας (optimism bias) στον χρονικό προγραμματισμό, φαινόμενο που υπονομεύει την αξιοπιστία της δεδομενοκεντρικής λήψης αποφάσεων. Αρνητικές τιμές αντιστοιχούν σε ταχύτερη παραγωγή από το αναμενόμενο, ενώ θετικές σε βραδύτερη.

Εικόνα 4. Κατανομή της απόκλισης συνολικού χρόνου παραγωγής ($\Delta T\%$) μεταξύ πραγματικού και προγραμματισμένου χρόνου. Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα από τα δεδομένα παραγωγής ($n=1.000$).



Για να ποσοτικοποιήσουμε την έκταση του φαινομένου, ταξινομήσαμε τις εντολές σε τέσσερις κατηγορίες απόκλισης, όπως φαίνεται στον Πίνακα 7. Μόλις το 15,5% των εντολών εμπίπτει στη ζώνη ικανοποιητικής ευθυγράμμισης (απόκλιση μεταξύ -5% και +5%), ενώ το 58,5% εμφανίζει υπέρβαση του προγραμματισμένου χρόνου και ένα μη αμελητέο 9,9% παρουσιάζει ακραία υπέρβαση άνω του 20%. Η εικόνα αυτή τεκμηριώνει ποσοτικά την υστέρηση της μονάδας στον άξονα της αξιοπιστίας των δεδομένων βάσης και επιβεβαιώνει τη βιβλιογραφική παρατήρηση ότι η ψηφιακή καταγραφή δεν συνεπάγεται από μόνη της δεδομενοκεντρική ωριμότητα (Antony et al., 2022· Liu et al., 2023).

Πίνακας 7. Κατανομή των εντολών παραγωγής ανά κατηγορία απόκλισης συνολικού χρόνου.

Κατηγορία απόκλισης	Εύρος ΔΤ%	Πλήθος	Ποσοστό
Υπο-εκτέλεση	< -5%	260	26,0%
Ικανοποιητική ευθυγράμμιση	-5% έως +5%	155	15,5%
Υπέρβαση	+5% έως +20%	486	48,6%
Ακραία υπέρβαση	> +20%	99	9,9%

Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα από τα δεδομένα παραγωγής (n=1.000 εντολές με πλήρη χρονικά δεδομένα).

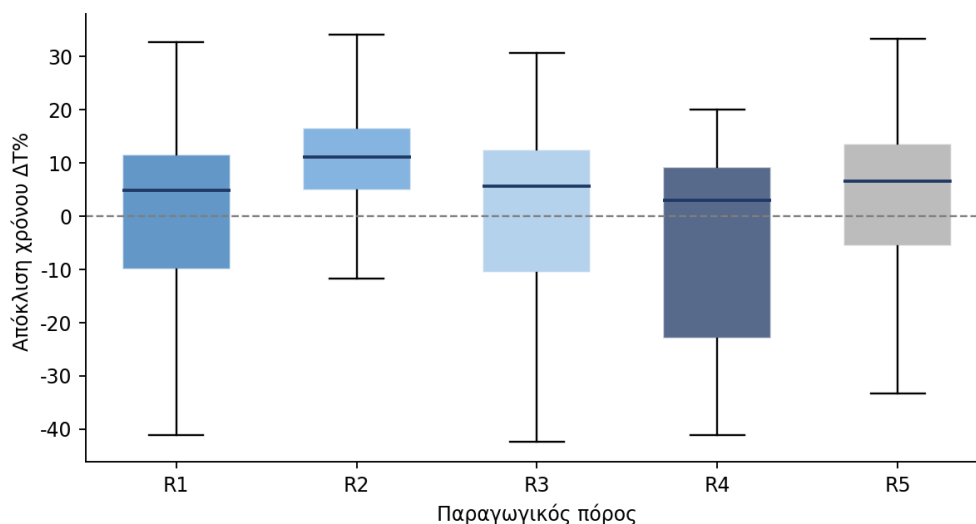
4.3 Ψηφιακή Ορατότητα και Μεταβλητότητα ανά Παραγωγικό Πόρο (EE2)

Το EE2 διερευνά την ικανότητα της μονάδας να καθιστά ορατή και διαχειρίσιμη τη μεταβλητότητα της παραγωγής μέσω των ψηφιακών της εργαλείων. Για τον σκοπό αυτό αναλύουμε τις διαφοροποιήσεις απόδοσης μεταξύ των πέντε παραγωγικών πόρων (R1 έως R5), όπου R1 αντιστοιχεί στην κύρια γραμμή συσκευασίας, R2 στις δεξαμενές ανάμιξης και σύνθεσης, R3 στις δευτερεύουσες γραμμές συσκευασίας, R4 σε ειδικές και βοηθητικές εργασίες και R5 στον χειρισμό χύδην προϊόντων.

4.3.1 Απόκλιση Χρόνου ανά Παραγωγικό Πόρο

Η Εικόνα 5 αποτυπώνει την κατανομή της απόκλισης χρόνου ανά παραγωγικό πόρο. Ο πόρος R2, που αντιστοιχεί στις δεξαμενές ανάμιξης, εμφανίζει συστηματική και έντονη υπέρβαση του προγραμματισμένου χρόνου, με μέση απόκλιση +9,97% και διάμεσο +11,1%. Αντίθετα, οι γραμμές συσκευασίας R1 και R3 εμφανίζουν αποκλίσεις πλησιέστερα στο μηδέν κατά μέσο όρο, αλλά με σημαντικά μεγαλύτερη διασπορά γύρω από αυτόν. Η συστηματική υπέρβαση στην ανάμιξη παραπέμπει σε υποεκτίμηση των χρόνων προετοιμασίας και καθαρισμού, ζήτημα ιδιαίτερα κρίσιμο στον κλάδο των γεωργικών σκευασμάτων όπου η αποφυγή διασταυρούμενης επιμόλυνσης μεταξύ δραστικών ουσιών επιβάλλει εκτεταμένες διαδικασίες καθαρισμού (Niciejewska & Idzikowski, 2019).

Εικόνα 5. Κατανομή της απόκλισης συνολικού χρόνου παραγωγής ($\Delta T\%$) ανά παραγωγικό πόρο R1 έως R5. Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα από τα δεδομένα παραγωγής.



Πίνακας 8. Δείκτες απόδοσης και μεταβλητότητας ανά παραγωγικό πόρο.

Πόρος	N	Μέση απόκλιση $\Delta T\%$	Μέσο throughput	CV throughput %	CV LP %
R1 (κύρια συσκ.)	448	-1,8	4,64	146,4	124,0
R2 (ανάμιξη)	318	+9,97	21,07	118,1	143,9
R3 (δευτ. συσκ.)	116	-2,1	4,69	105,4	105,6
R4 (ειδικές)	119	-6,4	7,33	177,7	93,7
R5 (χύδην)	107	+4,3	2,33	341,1	340,3

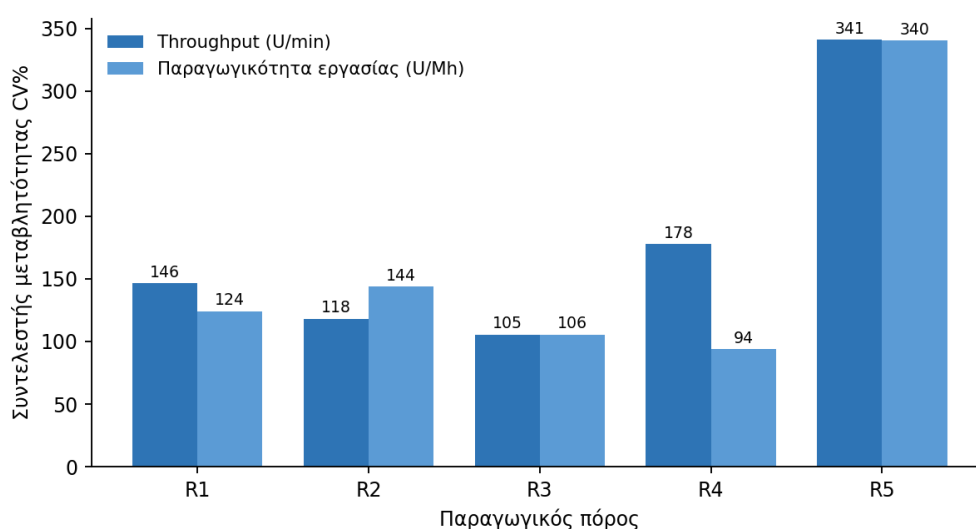
Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα από τα δεδομένα παραγωγής έτους 2025.

4.3.2 Μεταβλητότητα Ροής και Παραγωγικότητας

Η Εικόνα 6 συγκρίνει τους συντελεστές μεταβλητότητας (CV%) της ροής (throughput) και της παραγωγικότητας εργασίας ανά πόρο. Ο συντελεστής μεταβλητότητας αποτελεί καθιερωμένο, ανεξάρτητο της κλίμακας μέτρο της σταθερότητας μιας διεργασίας: όσο

υψηλότερος είναι, τόσο λιγότερο προβλέψιμη και ελεγχόμενη είναι η διεργασία (Montgomery, 2013). Ο πόρος R5 (χειρισμός χύδην) εμφανίζει ακραία μεταβλητότητα, με CV throughput 341% και CV παραγωγικότητας 340%, που τον καθιστούν τον λιγότερο σταθερό πόρο της μονάδας. Αντίθετα, οι δευτερεύουσες γραμμές συσκευασίας R3 εμφανίζουν τη χαμηλότερη μεταβλητότητα (περίπου 105% και στους δύο δείκτες), λειτουργώντας ως ο πλέον προβλέψιμος πόρος.

Εικόνα 6. Συντελεστής μεταβλητότητας (CV%) της ροής και της παραγωγικότητας εργασίας ανά παραγωγικό πόρο. Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα από τα δεδομένα παραγωγής.



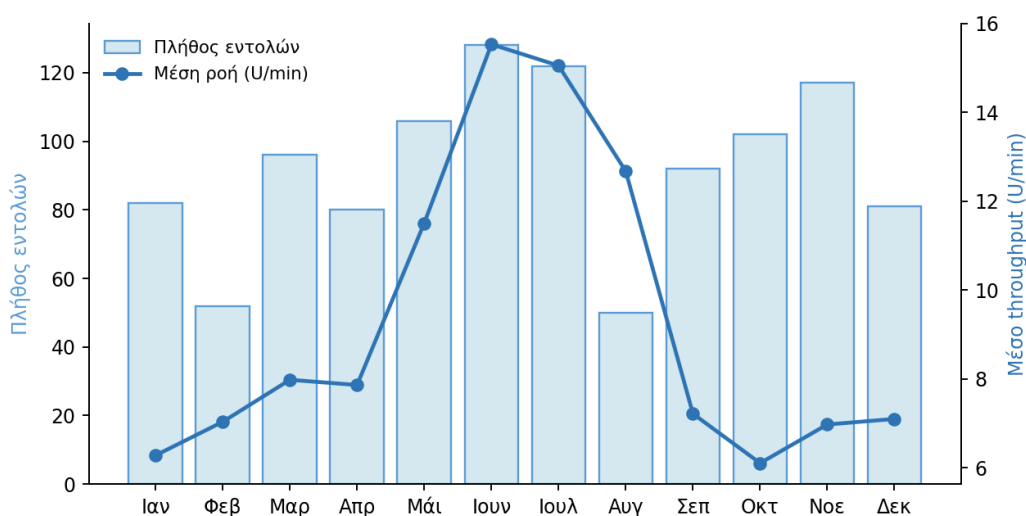
Η συστηματικά υψηλή μεταβλητότητα σε όλους τους πόρους, με τιμές CV που υπερβαίνουν κατά κανόνα το 100%, αποτελεί ισχυρή ένδειξη ότι η μονάδα δεν έχει ακόμη μεταβεί σε καθεστώς στατιστικού ελέγχου της διεργασίας. Στη γλώσσα της φιλοσοφίας Six Sigma, η μείωση αυτής της μεταβλητότητας αποτελεί προαπαιτούμενο τόσο για τη βελτίωση της ποιότητας όσο και για τη μείωση των κινδύνων ασφάλειας (Komkowsky et al., 2023). Η ψηφιακή υποδομή της μονάδας καταγράφει τη μεταβλητότητα, αλλά δεν την μετατρέπει σε σύστημα ορίων ελέγχου και προειδοποιήσεων, γεγονός που τεκμηριώνει την υστέρηση στον άξονα της ψηφιακής ορατότητας.

4.3.3 Διαχρονική και Εποχική Ανάλυση

Η Εικόνα 7 αποτυπώνει τη μηνιαία εξέλιξη του όγκου των εντολών και του μέσου throughput κατά το έτος 2025. Διακρίνεται σαφές εποχικό μοτίβο: ο όγκος των εντολών και η μέση ροή

κορυφώνονται κατά τους θερινούς μήνες, με αιχμή τον Ιούνιο (128 εντολές, μέσο throughput 15,5 U/min) και τον Ιούλιο (122 εντολές, 15,1 U/min), ενώ υποχωρούν αισθητά το φθινόπωρο, με ελάχιστο τον Οκτώβριο (6,1 U/min). Το μοτίβο αυτό είναι συνεπές με τον αγροτικό κύκλο, καθώς η ζήτηση φυτοπροστατευτικών σκευασμάτων εντείνεται κατά την καλλιεργητική περίοδο.

Εικόνα 7. Μηνιαία εξέλιξη του πλήθους εντολών παραγωγής και του μέσου throughput κατά το έτος 2025. Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα από τα δεδομένα παραγωγής.



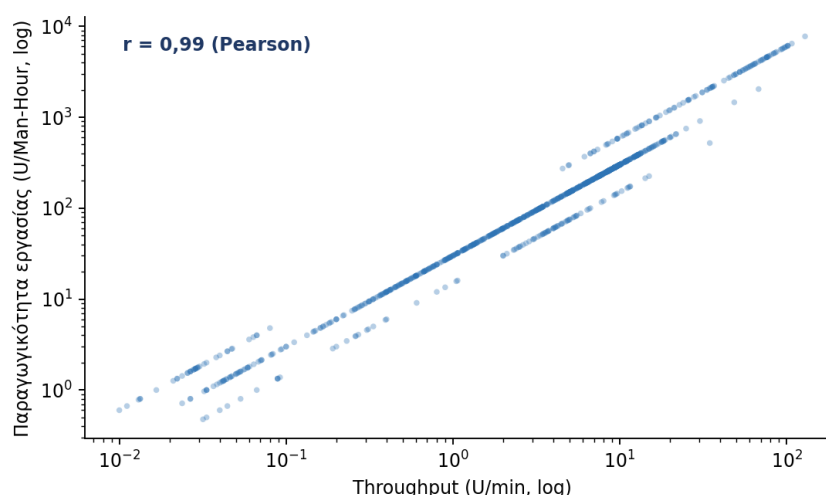
Η εποχικότητα αυτή έχει διαχειριστική σημασία: η συγκέντρωση μεγάλου όγκου παραγωγής σε στενό χρονικό παράθυρο αυξάνει την πίεση στους πόρους και, ενδεχομένως, συμβάλλει στις παρατηρούμενες αποκλίσεις χρόνου κατά τους μήνες αιχμής. Ένα ώριμο σύστημα Quality 4.0 θα αξιοποιούσε προγνωστικά αυτή την προβλέψιμη εποχικότητα για τον προληπτικό προγραμματισμό πόρων και συντήρησης, μετατρέποντας ένα ιστορικό μοτίβο σε εργαλείο προληπτικής απόφασης.

4.3.4 Συσχετίσεις μεταξύ Μεταβλητών Απόδοσης

Η ανάλυση συσχέτισης, που συνοψίζεται στον Πίνακα 9, αναδεικνύει τις εσωτερικές σχέσεις των μεταβλητών απόδοσης. Η σχεδόν τέλεια συσχέτιση μεταξύ προγραμματισμένης και ολοκληρωμένης ποσότητας ($r=1,00$) επιβεβαιώνει ότι η μονάδα παράγει αξιόπιστα τις ζητούμενες ποσότητες, δηλαδή η απόκλιση εντοπίζεται στον χρόνο και όχι στην ποσότητα. Η

πολύ ισχυρή συσχέτιση throughput και παραγωγικότητας εργασίας ($r=0,99$) αντικατοπτρίζει τη δομική τους εξάρτηση και αποτυπώνεται στην Εικόνα 8.

Εικόνα 8. Σχέση μεταξύ ροής (throughput) και παραγωγικότητας εργασίας ανά εντολή (λογαριθμικοί άξονες). Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα από τα δεδομένα παραγωγής.



Πίνακας 9. Συντελεστές συσχέτισης Pearson μεταξύ κύριων μεταβλητών απόδοσης.

Ζεύγος μεταβλητών		r	Ερμηνεία
Προγραμμ. ολοκληρωμένης ποσότητας	έναντι	1,00	Τέλεια συσχέτιση (αξιοπιστία ποσότητας)
Throughput παραγωγικότητας	έναντι	0,99	Πολύ ισχυρή θετική (δομική εξάρτηση)
Προγραμμ. ποσότητα απόκλισης χρόνου	έναντι	0,25	Ασθενής θετική (Cohen, 1988)
Εργαζόμενοι έναντι throughput		-0,38	Μέτρια αρνητική (σύνθετες εργασίες)

Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα από τα δεδομένα παραγωγής. Ερμηνεία μεγέθους κατά Cohen (1988).

Ιδιαίτερο ερμηνευτικό ενδιαφέρον παρουσιάζουν δύο πιο αδύναμες σχέσεις. Η ασθενής θετική συσχέτιση μεταξύ προγραμματισμένης ποσότητας και απόκλισης χρόνου ($r=0,25$) υποδηλώνει ότι οι μεγαλύτερες παρτίδες τείνουν να συνοδεύονται από ελαφρώς μεγαλύτερες υπερβάσεις χρόνου, ενώ η μέτρια αρνητική συσχέτιση μεταξύ αριθμού

εργαζομένων και ροής ($r=-0,38$) υποδεικνύει ότι περισσότεροι εργαζόμενοι ανατίθενται σε πιο σύνθετες και βραδύτερες εργασίες. Σύμφωνα με τα συμβατικά όρια ερμηνείας του μεγέθους επίδρασης (Cohen, 1988), οι σχέσεις αυτές είναι μεν στατιστικά υπαρκτές αλλά πρακτικά μέτριας ισχύος, και ως εκ τούτου χρήζουν περαιτέρω ποιοτικής διερεύνησης μέσω των συνεντεύξεων.

4.4 Διαχείριση Κινδύνου, Απωλειών και Ασφάλειας (EE3)

Το EE3 εστιάζει στη διάσταση κινδύνου και ασφάλειας, την οποία προσεγγίζουμε ποσοτικά μέσω της ανάλυσης των απωλειών προϊόντος (product loss) και ερμηνευτικά μέσω της σύνδεσής τους με τις ιδιαιτερότητες του κλάδου. Από τις 1.108 εντολές, οι 80 (7,2%) εμφανίζουν θετική απώλεια προϊόντος, ενώ 179 (16,2%) εμφανίζουν αρνητική απώλεια, δηλαδή ολοκληρωμένη ποσότητα μεγαλύτερη της προγραμματισμένης. Ο μέσος δείκτης απώλειας είναι ελαφρώς αρνητικός (-0,26%), γεγονός που υποδηλώνει συνολικά μια τάση ελαφράς υπερπαραγωγής έναντι του προγραμματισμού.

Η συνολική ετήσια καθαρή απόκλιση ποσότητας ανέρχεται σε περίπου 16.200 μονάδες, ένα μέγεθος που, αν και μικρό ως ποσοστό, αποκτά ιδιαίτερη σημασία στον συγκεκριμένο κλάδο. Στα γεωργικά σκευάσματα, κάθε απόκλιση ποσότητας δεν συνιστά απλώς οικονομική απώλεια αλλά και δυνητικό ζήτημα ασφάλειας και συμμόρφωσης, καθώς συνδέεται με τη διαχείριση επικίνδυνων χημικών ουσιών, την ορθή επισήμανση των συσκευασιών και την αποφυγή διασταυρούμενης επιμόλυνσης μεταξύ δραστικών ουσιών. Η ψηφιακή καταγραφή και η αυτόματη επικύρωση των ροών υλικών μέσω του WMS αποτελούν επομένως ταυτόχρονα ελέγχους ποιότητας και ελέγχους ασφάλειας (Hofmann & Rüsch, 2017· Forcina & Falcone, 2021).

Η εμπειρική σύνδεση της απόκλισης χρόνου με τη διάσταση της ασφάλειας προκύπτει από την παρατήρηση ότι ο πόρος με τη συστηματικότερη υπέρβαση χρόνου (R^2 , ανάμιξη) είναι ακριβώς ο πόρος με τη μεγαλύτερη έκθεση σε χημικούς κινδύνους κατά τη ζύγιση και ανάμιξη συστατικών. Η υποεκτίμηση των χρόνων στον πόρο αυτό υποδηλώνει πίεση χρόνου σε ένα στάδιο όπου η σπουδή συνεπάγεται αυξημένο κίνδυνο σφαλμάτων και ατυχημάτων. Η μετάβαση από αντιδραστική σε προβλεπτική συντήρηση και η συστηματική παρακολούθηση των χρόνων καθαρισμού, αρχές που θεμελιώνει η προσέγγιση της ολικής

παραγωγικής συντήρησης (Nakajima, 1988), αποτελούν, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, κοινό αγαθό ποιότητας και ασφάλειας (Carvalho et al., 2019· Badri et al., 2018), και ως εκ τούτου εντάσσονται οργανικά στο προτεινόμενο πλαίσιο ωρίμανσης.

Συνολικά, τα ευρήματα του ΕΕ3 τεκμηριώνουν εμπειρικά τη θεωρητική σύζευξη ποιότητας και ασφάλειας: οι ίδιοι δείκτες (απώλεια προϊόντος, απόκλιση χρόνου, μεταβλητότητα πόρου) λειτουργούν ταυτόχρονα ως δείκτες ποιότητας και ως πρώιμες ενδείξεις κινδύνου, επιβεβαιώνοντας ότι η γεφύρωση Quality 4.0 και Safety 4.0 δεν είναι μόνο θεωρητικά επιθυμητή αλλά και εμπειρικά εφικτή μέσα από κοινή δεδομενική βάση.

4.5 Οργανωτική και Διαχειριστική Διάσταση: Ευρήματα Συνεντεύξεων (ΕΕ4)

Το ΕΕ4 διερευνά τους οργανωτικούς μηχανισμούς που ερμηνεύουν τα ποσοτικά ευρήματα. Η θεματική ανάλυση των τεσσάρων ημιδομημένων συνεντεύξεων, σύμφωνα με τη μεθοδολογία των Braun και Clarke (2006), οδήγησε στην ανάδειξη πέντε κύριων θεμάτων, τα οποία αντιστοιχούν στους πέντε άξονες ανάλυσης του πρωτοκόλλου. Ο Πίνακας 10 συνοψίζει το βιβλίο κωδικοποίησης (codebook), παρουσιάζοντας τους κωδικούς, τη συχνότητα εμφάνισης ανά συμμετέχοντα και ενδεικτικά ανωνυμοποιημένα αποσπάσματα.

Πίνακας 10. Βιβλίο κωδικοποίησης της θεματικής ανάλυσης των συνεντεύξεων (codebook).

Θέμα	Ορισμός κωδικού	Συμμετέχοντες	Ενδεικτικό απόσπασμα
Αξιοπιστία δεδομένων	Εμπιστοσύνη στους προγραμματισμένους χρόνους	A, B, Δ	“Οι χρόνοι στο σύστημα είναι περισσότερο ευχές παρά προβλέψεις” (A)
Ορατότητα παραγωγής	Πρόσβαση σε δεδομένα πραγματικού χρόνου	A, Γ	“Βλέπω την κατάσταση μόνο όταν τελειώσει η βάρδια” (Γ)

Θέμα	Ορισμός κωδικού	Συμμετέχοντες	Ενδεικτικό απόσπασμα
Ροή υλικών και χώρος	Διαχείριση παρτίδων και αποφυγή επιμόλυνσης	Γ, Δ	“Ο καθαρισμός τρώει χρόνο που κανείς δεν μετράει σωστά” (Δ)
Συντονισμός και ρόλοι	Κατανομή αποφάσεων μεταξύ τμημάτων	Α, Β, Γ	“Κάθε τμήμα κοιτάζει τον δικό του πίνακα” (Β)
Συνεχής βελτίωση	Αξιοποίηση δεδομένων για βελτίωση	Β, Δ	“Έχουμε τα δεδομένα, αλλά δεν προλαβαίνουμε να τα διαβάσουμε” (Δ)

Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα από τις απομαγνητοφωνημένες συνεντεύξεις. Οι συμμετέχοντες αναφέρονται ανωνυμοποιημένα ως Α έως Δ.

4.5.1 Τα Πέντε Θέματα της Ανάλυσης

Το πρώτο θέμα, η αξιοπιστία των δεδομένων, αναδείχθηκε ως κοινός τόπος ανησυχίας. Οι συμμετέχοντες Α, Β και Δ ανέφεραν ότι οι προγραμματισμένοι χρόνοι αντικατοπτρίζουν περισσότερο μια ιστορική παραδοχή παρά μια ενημερωμένη πρόβλεψη, γεγονός που ερμηνεύει εμπειρικά τη συστηματική υπέρβαση χρόνου που εντοπίσαμε ποσοτικά στην παράγραφο 4.2. Το δεύτερο θέμα, η ορατότητα της παραγωγής, ανέδειξε ότι η πληροφόρηση παρέχεται κατά κανόνα εκ των υστέρων, σε επίπεδο βάρδιας ή ημέρας, και όχι σε πραγματικό χρόνο, περιορίζοντας τη δυνατότητα έγκαιρης παρέμβασης.

Το τρίτο θέμα, η ροή υλικών και ο χώρος, συνδέθηκε άμεσα με τη διάσταση της ασφάλειας: οι συμμετέχοντες Γ και Δ τόνισαν τη σημασία και ταυτόχρονα την υποτίμηση των χρόνων καθαρισμού μεταξύ παρτίδων, επιβεβαιώνοντας την ποσοτική ένδειξη υπέρβασης στον πόρο R2. Το τέταρτο θέμα, ο συντονισμός και οι ρόλοι, αποκάλυψε έναν κατακερματισμό

της πληροφόρησης, με κάθε τμήμα να αξιοποιεί τον δικό του πίνακα δεικτών χωρίς κοινή εικόνα, μοτίβο που η βιβλιογραφία αναγνωρίζει ως κύριο εμπόδιο της κατακόρυφης ολοκλήρωσης (Bousdekis et al., 2023). Το πέμπτο θέμα, η συνεχής βελτίωση, συνόψισε το κεντρικό παράδοξο της μονάδας: η ύπαρξη πλούσιων δεδομένων συνυπάρχει με την έλλειψη χρόνου και δεξιοτήτων για τη μετατροπή τους σε αποφάσεις (Sony et al., 2021).

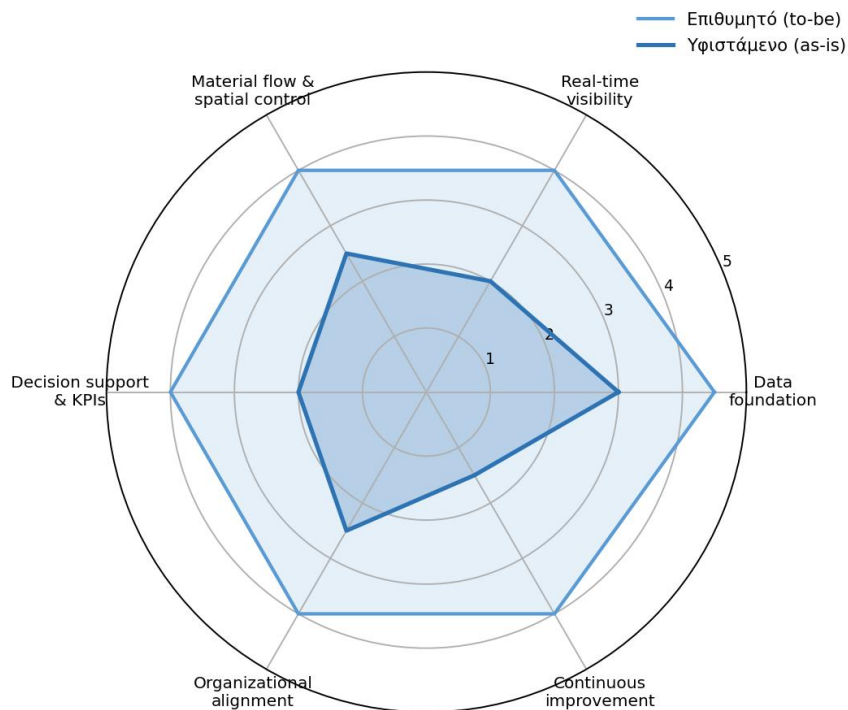
4.5.2 Σύγκλιση Ποσοτικών και Ποιοτικών Ευρημάτων

Η τριγωνοποίηση των δύο ρευμάτων δεδομένων αναδεικνύει αξιοσημείωτη σύγκλιση. Η ποσοτικά τεκμηριωμένη συστηματική υπέρβαση χρόνου (παράγραφος 4.2) ερμηνεύεται από την ποιοτικά διαπιστωμένη έλλειψη εμπιστοσύνης στους προγραμματισμένους χρόνους. Η υψηλή μεταβλητότητα ανά πόρο (παράγραφος 4.3) αντιστοιχίζεται με την απουσία ορατότητας πραγματικού χρόνου. Η σύνδεση απωλειών και ασφάλειας (παράγραφος 4.4) επιβεβαιώνεται από την έμφαση των στελεχών στους υποτιμημένους χρόνους καθαρισμού. Η σύγκλιση αυτή, σύμφωνα με τις αρχές της μεθοδολογικής τριγωνοποίησης (Denzin, 1978· Yin, 2018), ενισχύει σημαντικά την εγκυρότητα των συμπερασμάτων και τεκμηριώνει ότι τα ποσοτικά μοτίβα δεν είναι στατιστικά τεχνουργήματα αλλά εκφράσεις πραγματικών οργανωτικών μηχανισμών.

4.6 Ανάλυση Κενών και Σύνθεση Πλαισίου Ωρίμανσης (EE5)

Το EE5 συνθέτει τα προηγούμενα ευρήματα σε ένα εφαρμόσιμο πλαίσιο ψηφιακής ωρίμανσης. Η ανάλυση κενών αποτυπώνει την υφιστάμενη κατάσταση (as-is) έναντι του επιθυμητού επιπέδου ωρίμανσης (to-be) σε κλίμακα Likert 1 έως 5, κατά μήκος έξι αξόνων που προέκυψαν από τη χαρτογράφηση των ευρημάτων έναντι των διαστάσεων των αναφορικών πλαισίων (Ranjith Kumar et al., 2022· Antony et al., 2022). Η Εικόνα 9 παρουσιάζει το αποτέλεσμα σε ραδιακό διάγραμμα και ο Πίνακας 11 σε αναλυτική μήτρα ωρίμανσης.

Εικόνα 9. Ραδιακό διάγραμμα ωρίμανσης: υφιστάμενη (as-is) έναντι επιθυμητής (to-be) κατάστασης ανά άξονα του προτεινόμενου πλαισίου. Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα.



Πίνακας 11. Μήτρα ωρίμανσης Quality 4.0: υφιστάμενη και επιθυμητή κατάσταση ανά άξονα.

Άξονας πλαισίου	As-is	To-be	Κενό	Κύριο εμπειρικό τεκμήριο
Data foundation	3,0	4,5	1,5	108 μη υπολογίσιμες εγγραφές
Real-time visibility	2,0	4,0	2,0	Πληροφόρηση εκ των υστέρων (Γ)
Material flow & spatial control	2,5	4,0	1,5	Υποτιμημένοι χρόνοι καθαρισμού R2
Decision support & KPIs	2,0	4,0	2,0	58,5% υπέρβαση χρόνου
Organizational alignment	2,5	4,0	1,5	Κατακερματισμένη πληροφόρηση (Β)
Continuous improvement loop	1,5	4,0	2,5	Δεδομένα χωρίς αξιοποίηση (Δ)

Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα από τη σύνθεση ποσοτικών και ποιοτικών ευρημάτων.

4.6.1 Οι Έξι Άξονες του Προτεινόμενου Πλαισίου

Από τη χαρτογράφηση προκύπτει ότι τα μεγαλύτερα κενά εντοπίζονται στους άξονες της συνεχούς βελτίωσης (κενό 2,5), της υποστήριξης αποφάσεων και των δεικτών, καθώς και της ορατότητας πραγματικού χρόνου (κενό 2,0 αντίστοιχα). Οι άξονες αυτοί συγκροτούν την κρίσιμη διαδρομή της ψηφιακής ωρίμανσης της μονάδας. Αντίθετα, ο άξονας των δεδομένων βάσης (data foundation) εμφανίζει το μικρότερο κενό, επιβεβαιώνοντας ότι η μονάδα διαθέτει ισχυρή ψηφιακή υποδομή καταγραφής αλλά υστερεί στη μετατροπή της σε αξία.

Το προτεινόμενο πλαίσιο ψηφιακής ωρίμανσης Quality 4.0 οργανώνεται σε έξι αλληλοτροφοδοτούμενους άξονες. Ο πρώτος, data foundation, αφορά τη συστηματική διασφάλιση της αξιοπιστίας και πληρότητας των δεδομένων βάσης. Ο δεύτερος, real-time visibility, αφορά την οπτικοποίηση των δεικτών σε πραγματικό χρόνο. Ο τρίτος, material flow

and spatial control, ενσωματώνει ρητά τη διάσταση ασφάλειας μέσω της παρακολούθησης ροών υλικών και χρόνων καθαρισμού. Ο τέταρτος, decision support and KPIs, αφορά τη μετατροπή των δεδομένων σε δείκτες και όρια ελέγχου. Ο πέμπτος, organizational alignment, αφορά την κοινή εικόνα και τον συντονισμό των ρόλων. Ο έκτος, continuous improvement loop, κλείνει τον κύκλο μετατρέποντας τα δεδομένα σε συστηματική βελτίωση. Η αλληλεξάρτηση των αξόνων, όπως τεκμηριώθηκε θεωρητικά στο Κεφάλαιο 2, επιβεβαιώνεται εμπειρικά: η ανωριμότητα στη συνεχή βελτίωση πηγάζει άμεσα από την υστέρηση στην ορατότητα και στην υποστήριξη αποφάσεων.

4.6.2 Σύνοψη των Ευρημάτων

Συνοψίζοντας, η μελέτη περίπτωσης ανέδειξε μια μονάδα με ώριμη ψηφιακή υποδομή αλλά μερική μόνο δεδομενοκεντρική ωριμότητα. Τα ποσοτικά ευρήματα τεκμηρίωσαν συστηματική υπέρβαση των προγραμματισμένων χρόνων, υψηλή μεταβλητότητα ανά παραγωγικό πόρο, σαφές εποχικό μοτίβο και ισχυρές εσωτερικές συσχετίσεις των δεικτών απόδοσης. Τα ποιοτικά ευρήματα ερμήνευσαν τα μοτίβα αυτά μέσα από την έλλειψη εμπιστοσύνης στα δεδομένα, την απουσία ορατότητας πραγματικού χρόνου και τον κατακερματισμό της πληροφόρησης. Η σύζευξη ποιότητας και ασφάλειας τεκμηριώθηκε εμπειρικά μέσω κοινών δεικτών, και η ανάλυση κενών κατέληξε σε ένα συγκεκριμένο πλαίσιο έξι αξόνων. Τα ευρήματα αυτά συζητώνται κριτικά σε αντιπαράβολή με τη διεθνή βιβλιογραφία στο επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5. ΣΥΖΗΤΗΣΗ

Στο παρόν κεφάλαιο συζητούμε τα εμπειρικά ευρήματα της μελέτης περίπτωσης σε αντιπαραβολή με τη διεθνή βιβλιογραφία, με στόχο να ερμηνεύσουμε τη σημασία τους και να εντοπίσουμε τα σημεία στα οποία επιβεβαιώνουν, εμπλουτίζουν ή προβληματίζουν την υπάρχουσα γνώση. Η διάρθρωση ακολουθεί και πάλι τη λογική των πέντε ερευνητικών ερωτημάτων, ώστε να διατηρηθεί η αλυσίδα στοιχείων από τα ερωτήματα προς τα ευρήματα και από εκεί προς τη θεωρητική τους ανάγνωση. Στη συνέχεια συνθέτουμε τα επιμέρους σημεία σε μια ενιαία ανάγνωση της ωριμότητας της μονάδας και αποτυπώνουμε τη θεωρητική και πρακτική συνεισφορά της εργασίας. Επισημαίνουμε εξ αρχής ότι η συζήτηση παραμένει εντός των ορίων μιας εμβαθυμένης μελέτης περίπτωσης, οπότε τα συμπεράσματα έχουν χαρακτήρα αναλυτικής και όχι στατιστικής γενίκευσης (Yin, 2018).

5.1 Η Αξιοπιστία των Δεδομένων Βάσης ως Προϋπόθεση Ωριμότητας (EE1)

Το κεντρικό εύρημα του πρώτου ερευνητικού ερωτήματος, ο εντοπισμός 108 εντολών παραγωγής με μη υπολογίσιμο δείκτη απόκλισης χρόνου επί συνόλου 1.108, δηλαδή ποσοστού της τάξης του 9,7%, αποκτά την πλήρη σημασία του υπό το πρίσμα της βιβλιογραφίας της ποιότητας δεδομένων. Οι Wang και Strong (1996) είχαν θεμελιώσει την έννοια της ποιότητας δεδομένων ως πολυδιάστατο κατασκεύασμα, στο οποίο η πληρότητα και η εσωτερική συνέπεια αποτελούν διακριτές και κρίσιμες διαστάσεις. Το ποσοστό μη υπολογισιμότητας που παρατηρήσαμε δεν συνιστά απλώς τεχνικό σφάλμα καταχώρισης, αλλά δείκτη ότι η ψηφιακή υποδομή της μονάδας καταγράφει χωρίς ταυτόχρονα να επικυρώνει, ένα μοτίβο που η σύγχρονη βιβλιογραφία του Quality 4.0 αναγνωρίζει ως συχνό σημείο αποτυχίας.

Η παρατήρηση αυτή ευθυγραμμίζεται με την κριτική θέση των Antony και συνεργατών (2022), οι οποίοι υποστηρίζουν ότι η μετάβαση στο Quality 4.0 δεν είναι ζήτημα συσσώρευσης δεδομένων αλλά ζήτημα αξιοποιήσιμης ποιότητάς τους. Με ανάλογο τρόπο, οι Liu και συνεργάτες (2023) τονίζουν ότι η ψηφιοποίηση της καταγραφής χωρίς αντίστοιχη εδραίωση μηχανισμών διακυβέρνησης δεδομένων παράγει την ψευδαίσθηση της ωριμότητας. Το εύρημά μας προσφέρει εμπειρική τεκμηρίωση σε αυτή τη θέση: η

εξεταζόμενη μονάδα διαθέτει πλούσια ψηφιακή υποδομή, εντούτοις η αξιοπιστία των δεδομένων βάσης παραμένει το πρώτο και θεμελιωδέστερο κενό ωριμότητας. Η διαπίστωση ενισχύει επίσης την παρατήρηση των Sony και συνεργατών (2021) ότι τα οργανωσιακά και ανθρώπινα αίτια, και όχι η τεχνολογική έλλειψη, βρίσκονται συχνά στη ρίζα της χαμηλής ποιότητας δεδομένων.

5.2 Ψηφιακή Ορατότητα, Μεταβλητότητα και η Απόσταση από τον Πραγματικό Χρόνο (EE2)

Τα ευρήματα του δεύτερου ερευνητικού ερωτήματος αναδεικνύουν μια μονάδα που διαθέτει εκτενή ιστορική ορατότητα αλλά υστερεί στην ορατότητα πραγματικού χρόνου. Η συστηματική υπέρβαση του προγραμματισμένου χρόνου στον πόρο ανάμιξης R2, με μέση απόκλιση της τάξης του 9,97% και διάμεσο 11,1%, σε συνδυασμό με την πολύ υψηλή μεταβλητότητα της απόδοσης στις γραμμές συσκευασίας, υποδηλώνει ότι οι αποκλίσεις γίνονται αντιληπτές εκ των υστέρων και όχι κατά τη διάρκεια της παραγωγής. Η ερμηνεία αυτή συνομιλεί άμεσα με τη βιβλιογραφία των κυβερνοφυσικών συστημάτων και του ψηφιακού διδύμου, η οποία τοποθετεί την ανάδραση πραγματικού χρόνου στον πυρήνα της παραγωγικής ευφυΐας (Lee et al., 2015· Tao et al., 2018). Η μονάδα, με τους όρους αυτής της βιβλιογραφίας, λειτουργεί ακόμη σε καθεστώς περιγραφικής και όχι προγνωστικής αναλυτικής.

Η διάκριση αυτή είναι κομβική για το πλαίσιο του Quality 4.0. Οι Bousdekis και συνεργάτες (2023) περιγράφουν την προγνωστική και κανονιστική αναλυτική ως το επόμενο στάδιο ωρίμανσης πέρα από την απλή καταγραφή, ενώ οι Zhong και συνεργάτες (2017) συνδέουν την ευφυή παραγωγή με την ικανότητα μετατροπής των δεδομένων ροής σε αποφάσεις σε πραγματικό χρόνο. Η εμπειρική μας παρατήρηση ότι η σχεδόν τέλεια συσχέτιση μεταξύ προγραμματισμένης και ολοκληρωμένης ποσότητας, με συντελεστή που προσεγγίζει τη μονάδα, συνυπάρχει με σημαντική απόκλιση στον χρόνο και όχι στην ποσότητα, αποκαλύπτει ότι ο πραγματικός φορέας αβεβαιότητας στη μονάδα είναι η χρονική και όχι η ποσοτική διάσταση. Πρόκειται για εύρημα με πρακτική αξία, διότι κατευθύνει την προσοχή

της ψηφιακής ορατότητας προς τους χρόνους και τις καθυστερήσεις και όχι προς τους όγκους, στους οποίους η μονάδα είναι ήδη αξιόπιστη.

Η διαφοροποίηση των δύο παραγωγικών καθεστώτων ενισχύει περαιτέρω αυτή την ανάγνωση. Τα ημιέτοιμα παράγονται σε μεγάλες και σχετικά ομοιογενείς παρτίδες, ενώ τα τελικά προϊόντα σε μικρότερες και εξαιρετικά μεταβλητές, με συντελεστή μεταβλητότητας όγκου που υπερβαίνει το 186%. Η συνύπαρξη μαζικής και κατά παραγγελία παραγωγής στην ίδια μονάδα είναι ακριβώς το είδος της σύνθετης λειτουργικής πραγματικότητας που, κατά τους Müller και συνεργάτες (2018), καθιστά την υιοθέτηση ψηφιακών εργαλείων ταυτόχρονα αναγκαία και δύσκολη για τις μεσαίες επιχειρήσεις.

5.3 Η Σύζευξη Χρόνου, Απωλειών και Ασφάλειας (EE3)

Το τρίτο ερευνητικό ερώτημα παρήγαγε ένα από τα θεωρητικά πιο ενδιαφέροντα ευρήματα της εργασίας: η σύμπτωση του πόρου με τη συστηματικότερη υπέρβαση χρόνου, της ανάμιξης R2, με τον πόρο της μεγαλύτερης έκθεσης σε χημικούς κινδύνους. Η εμπειρική αυτή σύζευξη επιτρέπει να διαβαστεί η πίεση χρόνου όχι ως αμιγώς παραγωγικό ζήτημα αλλά ως παράγοντα κινδύνου ασφάλειας. Η ανάγνωση αυτή θεμελιώνεται στη σύγχρονη θεωρία ασφάλειας, η οποία έχει μετατοπιστεί από την εστίαση στο μεμονωμένο σφάλμα προς την κατανόηση των συστημικών και οργανωτικών συνθηκών που παράγουν κίνδυνο (Reason, 1997· Hollnagel, 2018). Η υποεκτίμηση των χρόνων καθαρισμού μεταξύ παρτίδων, που τεκμηριώθηκε τόσο ποσοτικά όσο και μέσα από τα λόγια των συμμετεχόντων, αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα λανθάνουσας συνθήκης κατά την έννοια του Reason (1997).

Η σύζευξη ποιότητας και ασφάλειας που παρατηρήσαμε ευθυγραμμίζεται με την κατεύθυνση των διεθνών προτύπων, τα οποία αντιμετωπίζουν τη διαχείριση κινδύνου ως ενιαία οργανωτική ικανότητα διατρέχουσα τόσο την ποιότητα όσο και την επαγγελματική υγεία και ασφάλεια (International Organization for Standardization, 2018a, 2018b). Στον κλάδο των γεωργικών σκευασμάτων ειδικότερα, όπου η αποφυγή διασταυρούμενης επιμόλυνσης δραστικών ουσιών είναι κρίσιμη, οι Niciejewska και Idzikowski (2019) έχουν τεκμηριώσει τη στενή σχέση μεταξύ της οργάνωσης της εργασίας και του επιπέδου κινδύνου. Το εύρημά μας προσθέτει σε αυτή τη γραμμή μια ποσοτική γέφυρα: δείχνει πώς ένας δείκτης παραγωγικής επίδοσης, η απόκλιση χρόνου, μπορεί να λειτουργήσει ως έμμεσος

προάγγελος κινδύνου ασφάλειας, ιδέα συμβατή με τη λογική των προδραστικών δεικτών ασφάλειας.

Η ερμηνεία αυτή προσδίδει επιπλέον αξία στη διασύνδεση ποιότητας και συντήρησης. Η μετάβαση από αντιδραστική σε προβλεπτική συντήρηση, την οποία θεμελιώνει η προσέγγιση της ολικής παραγωγικής συντήρησης (Nakajima, 1988) και επανεξετάζει η σύγχρονη βιβλιογραφία της προγνωστικής συντήρησης (Carvalho et al., 2019), δεν αφορά μόνο τη διαθεσιμότητα του εξοπλισμού αλλά και τη μείωση των συνθηκών πίεσης που γεννούν κίνδυνο. Έτσι, η ένταξη της παρακολούθησης των χρόνων καθαρισμού στο προτεινόμενο πλαίσιο ωρίμανσης δικαιολογείται όχι μόνο παραγωγικά αλλά και ως μέτρο ασφάλειας, επιβεβαιώνοντας τη θέση των Badri και συνεργατών (2018) ότι η ασφάλεια οφείλει να ενσωματώνεται οργανικά στον ψηφιακό μετασχηματισμό και όχι να αντιμετωπίζεται ως μεταγενέστερη προσθήκη.

5.4 Η Οργανωτική Διάσταση: Δεδομένα χωρίς Κοινή Εικόνα (EE4)

Η θεματική ανάλυση των συνεντεύξεων ανέδειξε ως κυρίαρχο οργανωτικό μοτίβο τον κατακερματισμό της πληροφόρησης, με κάθε τμήμα να αξιοποιεί τον δικό του πίνακα δεικτών χωρίς κοινή εικόνα της παραγωγής. Το εύρημα αυτό τοποθετείται στον πυρήνα της συζήτησης για τα κρίσιμα οργανωσιακά αίτια επιτυχίας ή αποτυχίας του Quality 4.0. Οι Sony και συνεργάτες (2021), μελετώντας τα κίνητρα και τα εμπόδια υιοθέτησης, αναγνωρίζουν τον οργανωτικό συντονισμό και την κοινή κατανόηση ως καθοριστικούς παράγοντες, ενώ οι Sony και Naik (2020) εντάσσουν την κοινωνικοτεχνική ευθυγράμμιση στους κρίσιμους παράγοντες της επιτυχούς εφαρμογής. Το παράδοξο που αποκαλύψαμε, η συνύπαρξη πλούσιων δεδομένων με έλλειψη χρόνου και δεξιοτήτων για τη μετατροπή τους σε αποφάσεις, αποτελεί εμπειρική επιβεβαίωση αυτής της κοινωνικοτεχνικής ανάγνωσης.

Η διαπίστωση συνομιλεί επίσης με τη συστηματική επισκόπηση των Komkowsky και συνεργατών (2023), οι οποίοι τονίζουν ότι η ενοποίηση των ροών πληροφόρησης και η οριζόντια ολοκλήρωση παραμένουν τα δυσκολότερα στοιχεία της μετάβασης, καθώς απαιτούν αλλαγή κουλτούρας και όχι μόνο τεχνολογική επένδυση. Στο πλαίσιο αυτό, η μονάδα μας αποτελεί χαρακτηριστική περίπτωση επιχείρησης που έχει ολοκληρώσει το τεχνολογικό σκέλος της ψηφιοποίησης αλλά υπολείπεται στο οργανωτικό. Η ανάγνωση αυτή

ενισχύει τη θέση ότι η ωριμότητα Quality 4.0 είναι πρωτίστως οργανωσιακό και δευτερευόντως τεχνολογικό επίτευγμα, θέση που διατρέχει το σύνολο της σύγχρονης βιβλιογραφίας του πεδίου (Antony et al., 2022· Chiarini, 2020).

5.5 Το Προτεινόμενο Πλαίσιο Ωρίμανσης σε Αντιπαραβολή με τα Υφιστάμενα Μοντέλα (EE5)

Το πέμπτο ερευνητικό ερώτημα συνέθεσε τα προηγούμενα ευρήματα σε ένα πλαίσιο ωρίμανσης έξι αξόνων. Η αντιπαραβολή του με τα καθιερωμένα μοντέλα ωρίμανσης αναδεικνύει τόσο τη συμβατότητα όσο και τη διαφοροποιητική του συνεισφορά. Τα γενικά μοντέλα ωρίμανσης της Βιομηχανίας 4.0, όπως αυτό των Schumacher και συνεργατών (2016), και τα μοντέλα ωρίμανσης ποιότητας που στηρίζονται στο πρότυπο ISO 9004 (Glogonac et al., 2020), προσφέρουν ολοκληρωμένες αλλά γενικές διαστάσεις. Το προτεινόμενο πλαίσιο διαφοροποιείται ως προς δύο σημεία: αφενός αντλεί τους άξονές του επαγωγικά από τα εμπειρικά ευρήματα μιας συγκεκριμένης μονάδας, αφετέρου ενσωματώνει ρητά τη διάσταση της ασφάλειας μέσω του άξονα της ροής υλικών και του χώρου, στοιχείο που τα γενικά μοντέλα ποιότητας συνήθως αφήνουν υπόρρητο.

Η σύνδεση του πλαισίου με τις πρόσφατες επισκοπήσεις του Quality 4.0 ενισχύει την εγκυρότητά του. Οι Ranjith Kumar και συνεργάτες (2022) και οι Saihi και συνεργάτες (2023) έχουν χαρτογραφήσει τις βασικές διαστάσεις του πεδίου, ενώ οι Dias και συνεργάτες (2022) αποτυπώνουν τις επιδράσεις του ψηφιακού μετασχηματισμού στην ποιότητα. Οι έξι άξονες του πλαισίου μας αντιστοιχίζονται σε αναγνωρισμένες διαστάσεις αυτής της βιβλιογραφίας, χωρίς ωστόσο να αναπαράγουν απλώς ένα γενικό μοντέλο: η ιεράρχηση που προκύπτει από τα δεδομένα, με τη θεμελίωση των δεδομένων ως πρωταρχικό κενό και τη συνεχή βελτίωση ως τελικό ζητούμενο, αποτελεί τη συγκεκριμένη εμπειρική συνεισφορά της μελέτης. Ο Πίνακας 12 συνοψίζει την αντιστοίχιση κάθε ευρήματος με τη σχετική βιβλιογραφία και τη φύση της συνεισφοράς.

Πίνακας 12. Αντιστοίχιση των κύριων ευρημάτων με τη βιβλιογραφία και τη φύση της συνεισφοράς.

Ερευνητικό ερώτημα	Κύριο εύρημα	Σχετική βιβλιογραφία	Φύση συνεισφοράς
EE1	9,7% μη υπολογίσιμες εγγραφές, κενό αξιοπιστίας δεδομένων	Wang & Strong (1996)· Antony et al. (2022)	Εμπειρική επιβεβαίωση
EE2	Συστηματική υπέρβαση χρόνου R2, απουσία ορατότητας πραγματικού χρόνου	Lee et al. (2015)· Bousdekis et al. (2023)	Εμπειρική επιβεβαίωση
EE3	Σύμπτωση πίεσης χρόνου και έκθεσης σε κίνδυνο	Reason (1997)· Hollnagel (2018)· Badri et al. (2018)	Εμπλουτισμός, ποσοτική γέφυρα
EE4	Κατακερματισμός πληροφόρησης χωρίς κοινή εικόνα	Sony et al. (2021)· Komkowski et al. (2023)	Εμπειρική επιβεβαίωση
EE5	Πλαίσιο έξι αξόνων με ρητή ένταξη ασφάλειας	Schumacher et al. (2016)· Ranjith Kumar et al. (2022)	Διαφοροποιητική σύνθεση

Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα από τη σύνθεση των ευρημάτων του Κεφαλαίου 4.

5.6 Θεωρητική και Πρακτική Συνεισφορά της Μελέτης

Η συνολική ανάγνωση των ευρημάτων επιτρέπει να αποτιμήσουμε τη διττή συνεισφορά της εργασίας. Σε θεωρητικό επίπεδο, η μελέτη συνδέει τρία πεδία που συνήθως εξετάζονται χωριστά: την ποιότητα δεδομένων, την ψηφιακή ορατότητα της παραγωγής και τη διαχείριση ασφάλειας. Η εμπειρική σύζευξη της απόκλισης χρόνου με την έκθεση σε κίνδυνο προτείνει ότι οι παραγωγικοί δείκτες μπορούν να αξιοποιηθούν ως έμμεσοι προάγγελοι

ασφάλειας, μια ιδέα που εμπλουτίζει τόσο τη βιβλιογραφία του Quality 4.0 όσο και εκείνη της διαχείρισης κινδύνου. Με τον τρόπο αυτό, η εργασία ανταποκρίνεται στο ερευνητικό κενό που είχε εντοπιστεί στη βιβλιογραφική ανασκόπηση, αναφορικά με την περιορισμένη ενσωμάτωση της διάστασης ασφάλειας στα μοντέλα ωρίμανσης ποιότητας.

Σε πρακτικό επίπεδο, η μελέτη προσφέρει στη διοίκηση της μονάδας, αλλά και σε ανάλογες μεσαίες βιομηχανίες, μια τεκμηριωμένη ιεράρχηση παρεμβάσεων. Αντί για μια γενική προτροπή ψηφιακού μετασχηματισμού, τα ευρήματα υποδεικνύουν συγκεκριμένη σειρά προτεραιοτήτων: πρώτα η εδραίωση της αξιοπιστίας των δεδομένων βάσης, κατόπιν η ανάπτυξη ορατότητας πραγματικού χρόνου στους χρόνους και τις καθυστερήσεις, και εν συνεχεία η ενοποίηση της πληροφόρησης σε κοινή εικόνα. Η προσέγγιση αυτή είναι συμβατή με τη θέση των Ghobakhloo (2020) και Sader και συνεργατών (2019) ότι ο ψηφιακός μετασχηματισμός αποδίδει μόνο όταν καθοδηγείται από συγκεκριμένα λειτουργικά προβλήματα και όχι από την τεχνολογία αυτή καθαυτή. Στις πρακτικές αυτές προτάσεις επανερχόμαστε αναλυτικά στο επόμενο κεφάλαιο.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο καταληκτικό αυτό κεφάλαιο συνοψίζουμε τα κύρια συμπεράσματα της εργασίας, αποτυπώνουμε τη θεωρητική και πρακτική της συνεισφορά, διατυπώνουμε συγκεκριμένες προτάσεις προς τη βιομηχανία, αναγνωρίζουμε τους περιορισμούς της και προτείνουμε κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα. Η δομή ακολουθεί τη λογική της επιστροφής στο κύριο ερευνητικό ερώτημα, ώστε να καταστεί σαφές με ποιον τρόπο τα επιμέρους ευρήματα συνθέτουν μια ολοκληρωμένη απάντηση στο πρόβλημα που έθεσε η μελέτη.

6.1 Σύνοψη των Κύριων Ευρημάτων

Το κύριο ερευνητικό ερώτημα αφορούσε τον βαθμό και τον τρόπο με τον οποίο η ψηφιακή διαχείριση ποιότητας και ασφάλειας συμβάλλει στη βιομηχανική επίδοση μιας μεσαίας μονάδας υπό το πρίσμα του Quality 4.0. Η μελέτη κατέληξε σε μια διαφοροποιημένη απάντηση: η ψηφιακή υποδομή της μονάδας είναι αναγκαία αλλά όχι επαρκής προϋπόθεση ωριμότητας, καθώς η συμβολή της περιορίζεται από κενά στην αξιοπιστία των δεδομένων, στην ορατότητα πραγματικού χρόνου και στην οργανωτική ενοποίηση της πληροφόρησης. Ως προς τα επιμέρους ερωτήματα, διαπιστώσαμε ότι η αξιοπιστία των δεδομένων βάσης αποτελεί το πρωταρχικό κενό (EE1), ότι η μονάδα διαθέτει ιστορική αλλά όχι ζωντανή ορατότητα της μεταβλητότητας (EE2), ότι η πίεση χρόνου στον πόρο ανάμιξης συνδέεται με αυξημένη έκθεση σε κίνδυνο (EE3), ότι ο κατακερματισμός της πληροφόρησης εμποδίζει τη μετατροπή των δεδομένων σε αποφάσεις (EE4) και ότι οι παραπάνω διαπιστώσεις συντίθενται σε ένα εφαρμόσιμο πλαίσιο ωρίμανσης έξι αξόνων (EE5).

Η σύγκλιση των ποσοτικών και των ποιοτικών ευρημάτων, την οποία τεκμηριώσαμε μέσω της μεθοδολογικής τριγωνοποίησης, ενισχύει την εμπιστοσύνη στα συμπεράσματα αυτά (Denzin, 1978· Yin, 2018). Τα ποσοτικά μοτίβα της απόκλισης χρόνου και της μεταβλητότητας δεν αποτελούν στατιστικά τεχνουργήματα, αλλά εκφράσεις πραγματικών οργανωτικών μηχανισμών, όπως αυτοί αποτυπώθηκαν στα λόγια των στελεχών. Αυτή η αμοιβαία επιβεβαίωση των δύο ρευμάτων δεδομένων συνιστά την ισχυρότερη μεθοδολογική εγγύηση εγκυρότητας που μπορεί να προσφέρει ένας μικτός σχεδιασμός εμβαθυμένης μελέτης περίπτωσης.

6.2 Θεωρητική Συνεισφορά

Η θεωρητική συνεισφορά της εργασίας συνοψίζεται σε τρία σημεία. Πρώτον, η μελέτη προσφέρει εμπειρική τεκμηρίωση στη θέση ότι η ωριμότητα Quality 4.0 είναι πρωτίστως ζήτημα ποιότητας και διακυβέρνησης δεδομένων και δευτερευόντως ζήτημα τεχνολογικού εξοπλισμού (Antony et al., 2022· Liu et al., 2023). Δεύτερον, αναδεικνύει μια λειτουργική γέφυρα μεταξύ της παραγωγικής επίδοσης και της ασφάλειας, δείχνοντας πως ένας δείκτης χρόνου μπορεί να λειτουργήσει ως προάγγελος κινδύνου, εμπλουτίζοντας έτσι τη συζήτηση για την ενσωμάτωση της ασφάλειας στα μοντέλα ωρίμανσης ποιότητας (Badri et al., 2018· Reason, 1997). Τρίτον, προτείνει ένα πλαίσιο ωρίμανσης έξι αξόνων που, αν και αντλεί από μία μόνο μονάδα, διατυπώνεται με όρους μεταφορσιμότητας προς ανάλογα βιομηχανικά περιβάλλοντα.

6.3 Πρακτικές Προτάσεις προς τη Βιομηχανία

Με βάση την ιεράρχηση που προέκυψε από την ανάλυση κενών, διατυπώνουμε συγκεκριμένες προτάσεις παρέμβασης, ταξινομημένες κατά προτεραιότητα. Οι προτάσεις αυτές δεν συνιστούν γενικές κατευθύνσεις ψηφιακού μετασχηματισμού, αλλά στοχευμένες ενέργειες που απαντούν στα τεκμηριωμένα κενά της μονάδας, ακολουθώντας τη λογική ότι η αξία του ψηφιακού μετασχηματισμού προκύπτει από τη σύνδεσή του με συγκεκριμένα λειτουργικά προβλήματα (Ghobakhloo, 2020). Ο Πίνακας 13 αποτυπώνει τις προτεινόμενες ενέργειες ανά άξονα ωρίμανσης, μαζί με τον αναμενόμενο αντίκτυπο και τη σχετική προτεραιότητα.

Πίνακας 13. Προτεινόμενες ενέργειες παρέμβασης ανά άξονα ωρίμανσης.

Άξονας	Προτεινόμενη ενέργεια	Αντίκτυπος	Προτεραιότητα
Θεμελίωση δεδομένων	Καθιέρωση κανόνων επικύρωσης και υποχρεωτικών πεδίων στο ERP για τους χρόνους	Υψηλός	Άμεση
Ορατότητα πραγματικού χρόνου	Πίνακες ελέγχου ζωντανής παρακολούθησης χρόνων και καθυστερήσεων	Υψηλός	Άμεση
Ροή υλικών και ασφάλεια	Συστηματική καταγραφή και προτυποποίηση χρόνων καθαρισμού R2	Υψηλός	Άμεση
Υποστήριξη αποφάσεων	Ορισμός κοινών δεικτών και ορίων ελέγχου ανά πόρο	Μεσαίος	Μεσοπρόθεσμη
Οργανωτική ευθυγράμμιση	Ενιαία εικόνα παραγωγής και διατμηματικές συσκέψεις δεδομένων	Μεσαίος	Μεσοπρόθεσμη
Βρόχος συνεχούς βελτίωσης	Περιοδική αναθεώρηση δεικτών και κλείσιμο του κύκλου βελτίωσης	Μεσαίος	Μακροπρόθεσμη

Πηγή: επεξεργασία του συγγραφέα από την ανάλυση κενών του Κεφαλαίου 4.

6.4 Περιορισμοί της Έρευνας

Η ερμηνεία των συμπερασμάτων οφείλει να λαμβάνει υπόψη τους περιορισμούς της μελέτης. Ο πρώτος και κυριότερος αφορά τη φύση του ερευνητικού σχεδιασμού: πρόκειται για εμβαθυμένη μελέτη μίας περίπτωσης, οπότε τα ευρήματα υπόκεινται σε αναλυτική και όχι σε στατιστική γενίκευση (Yin, 2018). Η μεταφορά των συμπερασμάτων σε άλλες μονάδες

απαιτεί προσοχή στα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά του κλάδου των γεωργικών σκευασμάτων και στο συγκεκριμένο επίπεδο ψηφιακής ωριμότητας της εξεταζόμενης επιχείρησης. Ο δεύτερος περιορισμός αφορά τα ποιοτικά δεδομένα, τα οποία προέκυψαν από τέσσερις συνεντεύξεις· αν και ο αριθμός αυτός κρίνεται επαρκής για τους σκοπούς της τριγωνοποίησης σε μια μελέτη περίπτωσης, δεν εξαντλεί το εύρος των οργανωτικών οπτικών.

Ένας τρίτος περιορισμός σχετίζεται με τα ίδια τα ποσοτικά δεδομένα. Η ανάλυση στηρίχθηκε σε ιστορικά δεδομένα ενός ημερολογιακού έτους, οπότε δεν αποτυπώνει πολυετείς τάσεις ούτε επιτρέπει την παρακολούθηση της επίδρασης τυχόν παρεμβάσεων σε βάθος χρόνου. Επιπλέον, η ίδια η ανωριμότητα της αξιοπιστίας των δεδομένων, που αποτέλεσε εύρημα της μελέτης, επέβαλε τον αποκλεισμό ενός ποσοστού εγγραφών από συγκεκριμένους υπολογισμούς. Αντιμετωπίσαμε τον περιορισμό αυτόν με διαφάνεια, αναφέροντας ρητά τον αριθμό των έγκυρων παρατηρήσεων σε κάθε ανάλυση, ώστε τα ευρήματα να παραμένουν ελέγχιμα και αναπαραγώγιμα.

6.5 Προτάσεις για Μελλοντική Έρευνα

Οι περιορισμοί της μελέτης υποδεικνύουν και τις κατευθύνσεις της μελλοντικής έρευνας. Μια πρώτη κατεύθυνση είναι η διεξαγωγή πολλαπλών μελετών περίπτωσης σε διαφορετικούς κλάδους, ώστε να ελεγχθεί η μεταφερσιμότητα του προτεινόμενου πλαισίου ωρίμανσης και να διερευνηθεί κατά πόσον η σύζευξη χρόνου και ασφάλειας που εντοπίσαμε αποτελεί γενικότερο μοτίβο ή ιδιαιτερότητα του εξεταζόμενου κλάδου. Μια δεύτερη κατεύθυνση είναι η διαχρονική, διαμήκης παρακολούθηση μιας μονάδας πριν και μετά την εφαρμογή των προτεινόμενων παρεμβάσεων, η οποία θα επέτρεπε τη μετάβαση από τη συσχέτιση προς την αιτιότητα και την αποτίμηση της πραγματικής επίδρασης των ψηφιακών εργαλείων στην επίδοση και την ασφάλεια.

Μια τρίτη, ιδιαίτερα υποσχόμενη κατεύθυνση αφορά την ανάπτυξη και τον έλεγχο προγνωστικών μοντέλων που θα αξιοποιούν τους δείκτες απόκλισης χρόνου ως προάγγελους κινδύνου ασφάλειας. Η ιδέα αυτή, που προέκυψε ως θεωρητική συνεισφορά της παρούσας εργασίας, θα μπορούσε να λάβει εφαρμοσμένη μορφή μέσω της προγνωστικής αναλυτικής και των τεχνικών μηχανικής μάθησης που έχει αναδείξει η σχετική

βιβλιογραφία (Carvalho et al., 2019· Bousdekis et al., 2023). Τέλος, η ενσωμάτωση της φωνής περισσότερων οργανωτικών ρόλων και επιπέδων σε μελλοντικές ποιοτικές έρευνες θα εμπλούτιζε την κατανόηση των κοινωνικοτεχνικών μηχανισμών που καθορίζουν την επιτυχία του Quality 4.0.

6.6 Καταληκτικές Παρατηρήσεις

Συνολικά, η μελέτη κατέδειξε ότι η συμβολή της ψηφιακής διαχείρισης ποιότητας και ασφάλειας στη βιομηχανική επίδοση δεν είναι αυτόματη συνέπεια της τεχνολογικής επένδυσης, αλλά αποτέλεσμα της συστηματικής μετατροπής των δεδομένων σε αξιόπιστη, ορατή και κοινά κατανοητή πληροφορία που τροφοδοτεί την απόφαση και τη βελτίωση. Για την εξεταζόμενη μονάδα, το ζητούμενο δεν είναι περισσότερη τεχνολογία αλλά μεγαλύτερη ωριμότητα στη χρήση της τεχνολογίας που ήδη διαθέτει. Η διαπίστωση αυτή, αν και προέκυψε από μία περίπτωση, αποτυπώνει μια ευρύτερη πραγματικότητα της μεσαίας βιομηχανίας και προσφέρει, μέσω του προτεινόμενου πλαισίου ωρίμανσης, έναν πρακτικό οδικό χάρτη για τη γεφύρωση της απόστασης μεταξύ της ψηφιακής καταγραφής και της ουσιαστικής ψηφιακής ωριμότητας.

Βιβλιογραφικές Αναφορές

- Antony, J., Sony, M., Furterer, S., McDermott, O., & Pepper, M. (2022). Quality 4.0 and its impact on organizational performance: An integrative viewpoint. *The TQM Journal*, 34(6), 2069–2084. <https://doi.org/10.1108/TQM-08-2021-0242>
- Aven, T. (2016). Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation. *European Journal of Operational Research*, 253(1), 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.12.023>
- Badri, A., Boudreau-Trudel, B., & Souissi, A. S. (2018). Occupational health and safety in the industry 4.0 era: A cause for major concern? *Safety Science*, 109, 403–411. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2018.06.012>
- Bousdekis, A., Lepenioti, K., Apostolou, D., & Mentzas, G. (2023). Data analytics in quality 4.0: Literature review and future research directions. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 36(5), 678–701. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2022.2128219>
- Bowen, G. A. (2009). Document analysis as a qualitative research method. *Qualitative Research Journal*, 9(2), 27–40. <https://doi.org/10.3316/QRJ0902027>
- Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77–101. <https://doi.org/10.1191/1478088706qp063oa>
- Broday, E. E. (2022). The evolution of quality: From inspection to quality 4.0. *International Journal of Quality and Service Sciences*, 14(3), 368–382. <https://doi.org/10.1108/IJQSS-09-2021-0121>
- Bryman, A. (2016). *Social research methods* (5th ed.). Oxford University Press.
- Carvalho, T. P., Soares, F. A. A. M. N., Vita, R., Francisco, R. P., Basto, J. P., & Alcala, 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>
- Charmaz, K. (2014). *Constructing grounded theory* (2nd ed.). SAGE Publications.

- Chen, H., Chiang, R. H. L., & Storey, V. C. (2012). Business intelligence and analytics: From big data to big impact. *MIS Quarterly*, 36(4), 1165–1188. <https://doi.org/10.2307/41703503>
- Chiarini, A. (2020). Industry 4.0, quality management and TQM world: The mix of these is going to determine the future. *The TQM Journal*, 32(4), 603–616. <https://doi.org/10.1108/TQM-04-2020-0082>
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed.). Lawrence Erlbaum Associates.
- Creswell, J. W., & Plano Clark, V. L. (2018). *Designing and conducting mixed methods research* (3rd ed.). SAGE Publications.
- Crosby, P. B. (1979). *Quality is free: The art of making quality certain*. McGraw-Hill.
- Deming, W. E. (1986). *Out of the crisis*. MIT Center for Advanced Engineering Study.
- Denzin, N. K. (1978). *The research act: A theoretical introduction to sociological methods* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- Dias, A. M., Carvalho, A. M., & Sampaio, P. (2022). Quality 4.0: Literature review analysis, definition and impacts of the digital transformation process on quality. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 39(6), 1312–1335. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-07-2021-0247>
- Eisenhardt, K. M. (1989). Building theories from case study research. *Academy of Management Review*, 14(4), 532–550. <https://doi.org/10.5465/amr.1989.4308385>
- Eisenhardt, K. M., & Graebner, M. E. (2007). Theory building from cases: Opportunities and challenges. *Academy of Management Journal*, 50(1), 25–32. <https://doi.org/10.5465/amj.2007.24160888>
- Feigenbaum, A. V. (1991). *Total quality control* (3rd ed., rev.). McGraw-Hill.
- Ferraz Junior, S., & Gonçalves, R. F. (2025). Quality 4.0 in industrial organizations: Challenges, benefits, and a research agenda. *The TQM Journal*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1108/TQM-01-2025-0034>
- Field, A. (2018). *Discovering statistics using IBM SPSS Statistics* (5th ed.). SAGE Publications.

- Fonseca, L., Amaral, A., & Oliveira, J. (2021). Quality 4.0: The EFQM 2020 model and Industry 4.0 relationships and implications. *Sustainability*, 13(6), 3107. <https://doi.org/10.3390/su13063107>
- Forcina, A., & Falcone, D. (2021). The role of Industry 4.0 enabling technologies for safety management: A systematic literature review. *Procedia Computer Science*, 180, 436–445. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.260>
- Garvin, D. A. (1988). *Managing quality: The strategic and competitive edge*. The Free Press.
- Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119869. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>
- Glogovac, M., Ruso, J., & Maricic, M. (2020). ISO 9004 maturity model for quality in industry 4.0. *Total Quality Management & Business Excellence*, 33(5–6), 529–547. <https://doi.org/10.1080/14783363.2020.1865793>
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). Design principles for Industrie 4.0 scenarios. *2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS)*, 3928–3937. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2016.488>
- Hofmann, E., & Rüsch, M. (2017). Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics. *Computers in Industry*, 89, 23–34. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2017.04.002>
- Hollnagel, E. (2018). *Safety-I and Safety-II: The past and future of safety management*. CRC Press.
- International Organization for Standardization. (2015). *ISO 9001:2015 — Quality management systems — Requirements*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2018a). *ISO 31000:2018 — Risk management — Guidelines*. ISO.
- International Organization for Standardization. (2018b). *ISO 45001:2018 — Occupational health and safety management systems — Requirements with guidance for use*. ISO.
- Ishikawa, K. (1985). *What is total quality control? The Japanese way* (D. J. Lu, Trans.). Prentice-Hall.
- Jacob, D. (2017). *Quality 4.0 impact and strategy handbook: Getting digitally connected to transform quality management*. LNS Research.

- Juran, J. M. (1989). *Juran on leadership for quality: An executive handbook*. The Free Press.
- Kagermann, H., Wahlster, W., & Helbig, J. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Final report of the Industrie 4.0 Working Group*. Acatech — National Academy of Science and Engineering.
- Komkowski, T., Antony, J., Garza-Reyes, J. A., Tortorella, G. L., & Pongboonchai-Empl, T. (2023). A systematic review of the integration of Industry 4.0 with quality-related operational excellence methodologies. *Quality Management Journal*, 30(1), 3–15. <https://doi.org/10.1080/10686967.2022.2144783>
- 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., Davari, H., Singh, J., & Pandhare, V. (2018). Industrial artificial intelligence for industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 18, 20–23. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.09.002>
- Lincoln, Y. S., & Guba, E. G. (1985). *Naturalistic inquiry*. SAGE Publications.
- Liu, H. C., Liu, R., Gu, X., & Yang, M. (2023). From total quality management to Quality 4.0: A systematic literature review and future research agenda. *Frontiers of Engineering Management*, 10, 191–205. <https://doi.org/10.1007/s42524-022-0243-z>
- Miles, M. B., Huberman, A. M., & Saldaña, J. (2014). *Qualitative data analysis: A methods sourcebook* (3rd ed.). SAGE Publications.
- Montgomery, D. C. (2013). *Introduction to statistical quality control* (7th ed.). Wiley.
- Müller, J. M., Buliga, O., & Voigt, K. I. (2018). Fortune favors the prepared: How SMEs approach business model innovations in Industry 4.0. *Technological Forecasting and Social Change*, 132, 2–17. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.12.019>
- Nakajima, S. (1988). *Introduction to TPM: Total productive maintenance*. Productivity Press.

- Niciejewska, M., & Idzikowski, A. (2019). Occupational health and safety management in "small size" enterprises, with particular emphasis on hazards identification. *Production Engineering Archives*, 24(24), 1–4. <https://doi.org/10.30657/pea.2019.24.01>
- Park, S. H., Shin, W. S., Park, Y. H., & Lee, Y. (2017). Building a new culture for quality management in the era of the Fourth Industrial Revolution. *Total Quality Management & Business Excellence*, 28(9–10), 934–945. <https://doi.org/10.1080/14783363.2017.1310703>
- Patriarca, R., Bergström, J., Di Gravio, G., & Costantino, F. (2018). Resilience engineering: Current status of the research and future challenges. *Safety Science*, 102, 79–100. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2017.10.005>
- Patton, M. Q. (2015). *Qualitative research & evaluation methods: Integrating theory and practice* (4th ed.). SAGE Publications.
- Podgórski, D., Majchrzycka, K., Dąbrowska, A., Gralewicz, G., & Okrasa, M. (2017). Towards a conceptual framework of OSH risk management in smart working environments based on smart PPE, ambient intelligence and the Internet of Things technologies. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 23(1), 1–20. <https://doi.org/10.1080/10803548.2016.1214431>
- Ranjith Kumar, R., Ganesh, L. S., & Rajendran, C. (2022). Quality 4.0 — A review of and framework for quality management in the digital era. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 39(6), 1385–1411. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-05-2021-0150>
- Ranjith Kumar, R., Ganesh, L. S., & Rajendran, C. (2022). Quality 4.0 — A review of and framework for quality management in the digital era. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 39(6), 1385–1411. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-05-2021-0150>
- Reason, J. (1997). *Managing the risks of organizational accidents*. Ashgate.
- Rubin, H. J., & Rubin, I. S. (2012). *Qualitative interviewing: The art of hearing data* (3rd ed.). SAGE Publications.

- Sader, S., Husti, I., & Daróczy, M. (2019). Industry 4.0 as a key enabler toward successful implementation of total quality management practices. *Periodica Polytechnica Social and Management Sciences*, 27(2), 131–140. <https://doi.org/10.3311/PPso.12675>
- Saihi, A., Awad, M., & Ben-Daya, M. (2023). Quality 4.0: Leveraging Industry 4.0 technologies to improve quality management practices — A systematic review. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 40(2), 628–650. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-09-2021-0305>
- Saunders, M., Lewis, P., & Thornhill, A. (2019). *Research methods for business students* (8th ed.). Pearson.
- Schumacher, A., Erol, S., & Sihn, W. (2016). A maturity model for assessing Industry 4.0 readiness and maturity of manufacturing enterprises. *Procedia CIRP*, 52, 161–166. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.07.040>
- Schwab, K. (2017). *The Fourth Industrial Revolution*. Crown Business.
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Sony, M., & Naik, S. (2020). Critical factors for the successful implementation of Industry 4.0: A review and future research direction. *Production Planning & Control*, 31(10), 799–815. <https://doi.org/10.1080/09537287.2019.1691278>
- Sony, M., Antony, J., Douglas, J. A., & McDermott, O. (2021). Motivations, barriers and readiness factors for Quality 4.0 implementation: An exploratory study. *The TQM Journal*, 33(6), 1502–1515. <https://doi.org/10.1108/TQM-11-2020-0272>
- Tao, F., Zhang, H., Liu, A., & Nee, A. Y. C. (2018). Digital twin in industry: State-of-the-art. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 15(4), 2405–2415. <https://doi.org/10.1109/TII.2018.2873186>
- Tashakkori, A., & Teddlie, C. (Eds.). (2010). *SAGE handbook of mixed methods in social & behavioral research* (2nd ed.). SAGE Publications.
- Tranfield, D., Denyer, D., & Smart, P. (2003). Towards a methodology for developing evidence-informed management knowledge by means of systematic review. *British Journal of Management*, 14(3), 207–222. <https://doi.org/10.1111/1467-8551.00375>

- Tukey, J. W. (1977). *Exploratory data analysis*. Addison-Wesley.
- Wang, R. Y., & Strong, D. M. (1996). Beyond accuracy: What data quality means to data consumers. *Journal of Management Information Systems*, 12(4), 5–33.
<https://doi.org/10.1080/07421222.1996.11518099>
- Werbińska-Wojciechowska, S., & Winiarska, K. (2023). Maintenance performance in the age of Industry 4.0: A bibliometric performance analysis and a systematic literature review. *Sensors*, 23(3), 1409. <https://doi.org/10.3390/s23031409>
- Wohlin, C. (2014). Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering. *Proceedings of the 18th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering (EASE '14)*, 1–10.
<https://doi.org/10.1145/2601248.2601268>
- Xu, L. D., Xu, E. L., & Li, L. (2018). Industry 4.0: State of the art and future trends. *International Journal of Production Research*, 56(8), 2941–2962.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1444806>
- Yin, R. K. (2018). *Case study research and applications: Design and methods* (6th ed.). SAGE Publications.
- Zhong, R. Y., Xu, X., Klotz, E., & Newman, S. T. (2017). Intelligent manufacturing in the context of industry 4.0: A review. *Engineering*, 3(5), 616–630.
<https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.015>

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

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