



**ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ**

**ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ**

**ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΑ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ**

**BUSINESS PROCESS MANAGEMENT IN THE CONTEXT
OF INDUSTRY 4.0**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

της

Αναστασίας Αλεξιάδου

Επιβλέπων: ΚΡΗΤΙΚΟΣ ΚΥΡΙΑΚΟΣ

Μέλη εξεταστικής επιτροπής: ΚΟΚΟΛΑΚΗΣ ΣΠΥΡΙΔΩΝ, ΧΑΡΑΛΑΜΠΙΔΗΣ ΓΙΑΝΝΗΣ

Σάμος, Ιούλιος 2026

ΠΡΟΛΟΓΟΣ ΚΑΙ ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο πλαίσιο του Προγράμματος Μεταπτυχιακών Σπουδών «Πληροφοριακά και Επικοινωνιακά Συστήματα» του Τμήματος Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων του Πανεπιστημίου Αιγαίου.

Αντικείμενο της εργασίας αποτελεί η μελέτη της Διαχείρισης Επιχειρησιακών Διαδικασιών (Business Process Management - BPM) στο πλαίσιο της Βιομηχανίας 4.0, με έμφαση στις τεχνολογίες και τις προσεγγίσεις που συμβάλλουν στον ψηφιακό μετασχηματισμό των σύγχρονων οργανισμών.

Στόχος της εργασίας είναι η καταγραφή, ανάλυση και συγκριτική αξιολόγηση των σχετικών προσεγγίσεων μέσα από συστηματική βιβλιογραφική επισκόπηση, καθώς και η ανάδειξη των προκλήσεων και των μελλοντικών κατευθύνσεων του πεδίου.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας αποτελεί το αποτέλεσμα μιας ιδιαίτερα απαιτητικής περιόδου, κατά την οποία η ισορροπία μεταξύ επαγγελματικών υποχρεώσεων, μεταπτυχιακών σπουδών και προσωπικής ζωής αποτέλεσε μια συνεχή πρόκληση.

Θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Κυριάκο Κρητικό, για την καθοδήγηση, τις πολύτιμες παρατηρήσεις και την υποστήριξή του καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στην οικογένειά μου για την αμέριστη συμπαράσταση, την κατανόηση και την ενθάρρυνση που μου προσέφερε σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Η στήριξή τους υπήρξε καθοριστική για την επίτευξη των στόχων μου.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που βρέθηκαν δίπλα μου, προσφέροντας υπομονή, στήριξη και θετική διάθεση στις δυσκολίες που προέκυψαν κατά τη διάρκεια αυτής της διαδρομής. Η πίστη τους σε εμένα και η ενθάρρυνσή τους με βοήθησαν να συνεχίσω την προσπάθεια μέχρι την ολοκλήρωση της εργασίας αυτής.

© 2026

της

Αναστασία Αλεξιάδου

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία εξετάζει τη Διαχείριση Επιχειρησιακών Διαδικασιών (Business Process Management – BPM) στο πλαίσιο της Βιομηχανίας 4.0, εστιάζοντας στον τρόπο με τον οποίο οι ψηφιακές τεχνολογίες μετασχηματίζουν τον σχεδιασμό, την εκτέλεση και τη συνεχή βελτίωση των διαδικασιών. Αρχικά αποσαφηνίζεται ο ρόλος των επιχειρησιακών διαδικασιών ως μηχανισμών μετατροπής εισροών σε εκροές με προστιθέμενη αξία και αναλύεται η λογική του κύκλου ζωής της BPM, από τη μοντελοποίηση έως τη βελτιστοποίηση. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια δομημένη κατηγοριοποίηση των προσεγγίσεων εφαρμογής BPM σε περιβάλλοντα IoT (Διαδικτύου των Πραγμάτων), Cloud (Υπολογιστικού Νέφους), Τεχνητής Νοημοσύνης, Big Data Analytics (Αναλυτικής Μεγάλων Δεδομένων) και Cyber-Physical Systems (Κυβερνο-Φυσικών Συστημάτων). η εστίαση σε αυτές τις τεχνολογίες οφείλεται στο ότι συνθέτουν από κοινού το πυρήνα του οικοσυστήματος της Βιομηχανίας 4.0, ενώ συναφείς τεχνολογίες όπως τα Ψηφιακά Δίδυμα (Digital Twins) εξετάζονται ως προέκταση των CPS και ως κατεύθυνση μελλοντικής έρευνας. Η ανάλυση αναδεικνύει τις συνέργειες αλλά και τις τεχνικές/οργανωσιακές προκλήσεις (διαλειτουργικότητα, ποιότητα δεδομένων, ασφάλεια, αλλαγή κουλτούρας). Η μετέπειτα συγκριτική αξιολόγηση των προσεγγίσεων βασίζεται σε κριτήρια, όπως ευελιξία, αυτοματοποίηση, κλιμάκωση, κόστος και ακρίβεια, και επιδεικνύει ότι οι data-driven και AI-enhanced προσεγγίσεις προσφέρουν υψηλότερη προσαρμοστικότητα, με αντάλλαγμα αυξημένη πολυπλοκότητα διακυβέρνησης. Επιπλέον, η εργασία εντοπίζει βασικά ερευνητικά κενά (τεχνολογικά, μεθοδολογικά και οργανωσιακά) και προτείνει αντίστοιχες κατευθύνσεις αντιμετώπισής τους. Τέλος, στο πρακτικό μέρος υλοποιείται mini case study «Order-to-Delivery» με διαγράμματα BPMN As-Is και To-Be, όπου η εισαγωγή αυτοματοποιημένου ελέγχου αποθεμάτων και παράλληλων ροών τιμολόγησης/αποστολής μειώνει καθυστερήσεις και ενισχύει τη διαφάνεια. Από την εργασία προκύπτουν πλείονα συμπεράσματα· κεντρικό μεταξύ αυτών είναι ότι η BPM λειτουργεί ως «σκελετός» ψηφιακού συντονισμού στα Smart Factories (Έξυπνα Εργοστάσια), υπό την προϋπόθεση ισχυρής διακυβέρνησης δεδομένων και ασφάλειας, ενώ η πραγματική αξία της προκύπτει από τη συστηματική, δεδομενο-κεντρική και επαναληπτική βελτιστοποίηση παρά από τη μεμονωμένη υιοθέτηση τεχνολογιών.

Λέξεις-κλειδιά: Διαχείριση Επιχειρησιακών Διαδικασιών, Βιομηχανία 4.0, BPMN 2.0, IoT, Τεχνητή Νοημοσύνη, Αναλυτική μεγάλων Δεδομένων, Υπολογιστικό Νέφος, Κυβερνο-Φυσικά Συστήματα, Έξυπνα Εργοστάσια

ABSTRACT

This thesis examines Business Process Management (BPM) in the context of Industry 4.0, focusing on how digital technologies are transforming the design, execution, and continuous improvement of processes. First, the role of business processes as mechanisms for converting inputs into outputs with added value is clarified, and the main rationale of the BPM lifecycle—from modeling to optimization—is analyzed. Next, a structured categorization of BPM implementation approaches in IoT (Internet of Things), Cloud, Artificial Intelligence (AI), Big Data Analytics, and Cyber-Physical Systems (CPS) is presented; the focus on these technologies stems from the fact that together they form the core of the Industry 4.0 ecosystem, while related technologies such as Digital Twins are considered an extension of CPS and a direction for future research. The analysis highlights synergies as well as technical and organizational challenges (interoperability, data quality, security, cultural change). The subsequent comparative evaluation of the approaches is based on criteria such as flexibility, automation, scalability, cost, and accuracy, and demonstrates that data-driven and AI-enhanced approaches offer greater adaptability, at the cost of increased governance complexity. Furthermore, the thesis identifies key research gaps (technological, methodological, and organizational) and proposes corresponding directions for addressing them. Finally, the thesis practical section implements an “Order-to-Delivery” mini case study with As-Is and To-Be BPMN diagrams, where the introduction of automated inventory control and parallel invoicing/shipping flows reduces delays and enhances transparency. The study yields several conclusions; central among them is that BPM functions as the “backbone” of digital coordination in Smart Factories, provided there is strong data governance and security, while its true value stems from systematic, data-centric, and iterative optimization rather than the isolated adoption of technologies.

Keywords: Business Process Management, Industry 4.0, BPMN 2.0, IoT, Artificial Intelligence, Big Data Analytics, Cloud Computing, Cyber-Physical Systems, Smart Factories.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΠΕΡΙΛΗΨΗ	3
ABSTRACT	4
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	5
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ	8
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	9
ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ	11
1.1 Ανάγκη ενσωμάτωσης της BPM στην Βιομηχανία 4.0	11
1.2 Σημασία της Διαχείρισης Επιχειρησιακών Διαδικασιών στη Βιομηχανία 4.0	12
1.3 Δομή της Διπλωματικής	13
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΥΠΟΒΑΘΡΟ	14
2.1 Επιχειρησιακές Διαδικασίες (Business Processes)	15
2.1.1 Ορισμός και βασικά χαρακτηριστικά	15
2.1.2 Κατηγορίες επιχειρησιακών διαδικασιών και ενδεικτικά παραδείγματα	15
2.1.3 Οφέλη και οργανωσιακή αξία των επιχειρησιακών διαδικασιών	16
2.1.4 Μοντελοποίηση και τεκμηρίωση: από την περιγραφή στη μετρήσιμη διαχείριση διαδικασιών	17
2.1.5 Πεδία εφαρμογής και σύνδεση με σύνθετα περιβάλλοντα λειτουργίας	18
2.2 Διαχείριση επιχειρησιακών διαδικασιών (BPM)	18
2.2.1 Ορισμός και σκοπός του BPM	18
2.2.2 Θεμελιώδεις αρχές	18
2.2.3 Κύκλος ζωής BPM και ο ρόλος της παρακολούθησης	19
2.2.4 Συστήματα BPM (BPMS) και λειτουργικότητες	20
2.2.5 Η BPMN ως πρότυπο μοντελοποίησης και λόγοι χρήσης της	20
2.2.6 Από την “κλασική” BPM στην data-driven και AI-enhanced BPM	20
2.3 Βιομηχανία 4.0	21
2.4 BPM και Industry 4.0: Συσχέτιση και συνέργειες	26
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ	30
3.1 Στόχος και ερευνητικές ερωτήσεις	30
3.2 Επιλογή πηγών	31
3.3 Κριτήρια αναζήτησης	32
3.4 Κριτήρια αποδοχής/απόρριψης και ποιότητας	34
3.5 Ροή επιλογής και ποσοτική ανάλυση των πηγών	37

3.6 Περίληψη μεθοδολογίας.....	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ	42
4.1 Τρισδιάστατο ιεραρχικό δέντρο κατηγοριοποίησης.....	42
4.2 BPM σε περιβάλλον IoT.....	45
4.3 BPM σε περιβάλλον Cloud	46
4.4 BPM και AI	48
4.5 BPM και Big Data Analytics	50
4.6 BPM και Cybersecurity / CPS.....	51
4.7 Συνοπτική αποτίμηση.....	53
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΩΝ.....	54
5.1 Κριτήρια σύγκρισης	54
5.2 Μέθοδος σύνθεσης και πίνακας αξιολόγησης.....	55
5.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων και αιτιολόγηση βαθμολογιών	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΚΕΝΑ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ	59
6.1 Κύρια ευρήματα της ανασκόπησης	59
6.2 Ερευνητικά κενά.....	60
6.2.1 Τεχνολογικά κενά.....	61
6.2.2 Μεθοδολογικά κενά.....	61
6.2.3 Οργανωσιακά κενά.....	62
6.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	62
6.3.1 Αρχιτεκτονικές αναφοράς και σημασιολογική διαλειτουργικότητα	62
6.3.2 Συντονισμός edge, fog και cloud για προσαρμογή κατά την εκτέλεση.....	63
6.3.3 Κοινά πρωτόκολλα αξιολόγησης και ανοικτά αποθετήρια	63
6.3.4 Decision-aware BPM, αιτιώδης ανάλυση και prescriptive analytics	63
6.3.5 Ασφάλεια, ιδιωτικότητα και διακυβέρνηση δεδομένων εκ σχεδιασμού	63
6.3.6 Process-aware ψηφιακά δίδυμα.....	63
6.3.7 Ολιστικά πλαίσια για ολόκληρο τον κύκλο ζωής BPM	64
6.3.8 Διακυβέρνηση BPM, δεξιότητες και διαχείριση αλλαγής.....	64
6.3.9 Ελαφριά και κλιμακωτά πρότυπα υιοθέτησης για ΜμΕ.....	64
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – MINI CASE STUDY.....	66
7.1 Επιλογή διαδικασίας (π.χ. “Order-to-Delivery Workflow”)	66
7.2 “As-Is” BPMN διάγραμμα.....	66
7.3 “To-Be” βελτιστοποιημένο διάγραμμα.....	67
7.4 Πίνακας χρόνου/κόστους.....	68
7.5 Συγκριτική αξιολόγηση.....	70
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ.....	72

8.1 Κύρια ευρήματα και συνεισφορά.....	72
8.2 Περιορισμοί.....	73
8.3 Εμπειρίες και πρακτικές παρατηρήσεις.....	73
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	76

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 2.1 – Διαδικασία Order Fulfillment μοντελοποιημένη με συμβολισμό BPMN. Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει Dumas, La Rosa, Mendling και Reijers (2018).	13
Εικόνα 2.2 – Διαδικασία αξιολόγησης και έγκρισης δανείου σε συμβολισμό BPMN. Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει Dumas, La Rosa, Mendling και Reijers (2018).	17
Εικόνα 2.3 – Ενδεικτική στρωματική αρχιτεκτονική της Βιομηχανίας 4.0. Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει Gilchrist (2016), Monostori et al. (2016), Lee et al. (2018) και Tao et al. (2019).	19
Εικόνα 2.4 – Κλειστός βρόχος ενσωμάτωσης BPM και Industry 4.0 σε έξυπνο εργοστάσιο. Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει Kusiak (2018) και Dumas et al. (2018)..	25
Εικόνα 3.1 – Διάγραμμα ροής PRISMA 2020 για τη διαδικασία επιλογής μελετών. Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει Page et al. (2021).	33
Εικόνα 3.2 – Κατανομή των 18 μελετών ανά τύπο δημοσίευσης. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.	34
Εικόνα 3.3 – Κύρια τεχνολογική εστίαση των 18 μελετών. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.	35
Εικόνα 3.4 – Αριθμός μελετών ανά έτος δημοσίευσης. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.	35
Εικόνα 4.1 – Τρισδιάστατο ιεραρχικό δέντρο κατηγοριοποίησης των προσεγγίσεων BPM στη Βιομηχανία 4.0. Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει της σύνθεσης των επιλεγμένων μελετών.	38
Εικόνα 5.1 – Μέση επίδοση ανά κριτήριο αξιολόγησης. Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει του Πίνακα 5.2.	49
Εικόνα 6.1 – Οδικός χάρτης ερευνητικών κατευθύνσεων για BPM στη Βιομηχανία 4.0. Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει του Πίνακα 6.1	56
Εικόνα 7.1 – Διαδικασία Order-to-Delivery στην υφιστάμενη κατάσταση (As-Is). Πηγή: Ιδία επεξεργασία με χρήση Bizagi Modeler.	58
Εικόνα 7.2 – Βελτιστοποιημένη διαδικασία Order-to-Delivery (To-Be). Πηγή: Ιδία επεξεργασία με χρήση Bizagi Modeler.	59

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 3.1 – Αντιστοίχιση ερευνητικών ερωτημάτων και κεφαλαίων απάντησης...	31
Πίνακας 3.2 – Πηγές αναζήτησης και αιτιολόγηση επιλογής	32
Πίνακας 3.3 – Σύνθετα ερωτήματα αναζήτησης και βασικές λέξεις-κλειδιά.....	33
Πίνακας 3.4 – Κριτήρια αποδοχής και απόρριψης	35
Πίνακας 3.5 – Κριτήρια ποιοτικής αποτίμησης των μελετών	35
Πίνακας 3.6 – Φόρμα εξαγωγής δεδομένων ανά μελέτη.....	36
Πίνακας 3.7 – Σύνοψη αριθμών της διαδικασίας PRISMA 2020	38
Πίνακας 4.1 – Αναλυτική τεχνολογική κατανομή των 18 επιλεγμένων προσεγγίσεων	44
Πίνακας 4.2 – Συσχέτιση των τριών διαστάσεων κατηγοριοποίησης	44
Πίνακας 4.3 – Επίδραση του IoT στις δραστηριότητες του κύκλου ζωής BPM.....	46
Πίνακας 4.4 – Μοντέλα διάθεσης BPMS στο υπολογιστικό νέφος	47
Πίνακας 4.5 – Κύριες μορφές αξιοποίησης Τεχνητής Νοημοσύνης στη BPM.....	49
Πίνακας 4.6 – Επίπεδα αναλυτικής δεδομένων και σύνδεσή τους με τη BPM.....	50
Πίνακας 4.7 – Απειλές, επιπτώσεις στις διαδικασίες και μέτρα αντιμετώπισης	52
Πίνακας 5.1 – Λειτουργικός ορισμός των κριτηρίων σύγκρισης	54
Πίνακας 5.2 – Μέσες βαθμολογίες των τεχνολογικών οικογενειών (κλίμακα 1–5) ...	55
Πίνακας 6.1 – Ερευνητικά κενά και αντίστοιχες κατευθύνσεις	60
Πίνακας 7.1 – Ενδεικτικός χρόνος και κόστος ανά παραγγελία στην κατάσταση As-Is και To-Be	69
Πίνακας 8.1 – Περιορισμοί της εργασίας και τρόποι μείωσής τους σε μελλοντική επέκταση	73

ΠΙΝΑΚΑΣ ΑΚΡΩΝΥΜΙΩΝ

<i>Ακρωνύμιο</i>	<i>Επεξήγηση</i>
<i>AI</i>	Artificial Intelligence – Τεχνητή Νοημοσύνη
<i>API</i>	Application Programming Interface – Διεπαφή Προγραμματισμού Εφαρμογών
<i>BPM</i>	Business Process Management – Διαχείριση Επιχειρησιακών Διαδικασιών
<i>BPMN</i>	Business Process Model and Notation
<i>BPMS</i>	Business Process Management System
<i>CPS</i>	Cyber-Physical Systems – Κυβερνο-Φυσικά Συστήματα
<i>ERP</i>	Enterprise Resource Planning
<i>IoT</i>	Internet of Things – Διαδίκτυο των Πραγμάτων
<i>KPI</i>	Key Performance Indicator – Βασικός Δείκτης Απόδοσης
<i>MES</i>	Manufacturing Execution System
<i>OT / IT</i>	Operational Technology / Information Technology
<i>PRISMA</i>	Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses
<i>SCADA</i>	Supervisory Control and Data Acquisition
<i>WMS</i>	Warehouse Management System

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – ΕΙΣΑΓΩΓΗ

1.1 Ανάγκη ενσωμάτωσης της BPM στην Βιομηχανία 4.0

Η τέταρτη βιομηχανική επανάσταση, γνωστή ως Βιομηχανία 4.0, χαρακτηρίζεται από τη σύγκλιση τεχνολογιών, όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), η Τεχνητή Νοημοσύνη (AI), τα Μεγάλα Δεδομένα (Big Data), τα κυβερνο-φυσικά συστήματα (CPS) και το υπολογιστικό νέφος (cloud computing), σε ένα ενιαίο, έξυπνο και διασυνδεδεμένο οικοσύστημα παραγωγής (Nguyen et al., 2019· IBM, 2024). Η έννοια του «έξυπνου εργοστασίου» (smart factory) αποτελεί τον κεντρικό επιχειρησιακό τόπο εφαρμογής της Βιομηχανίας 4.0, καθώς περιγράφει ένα περιβάλλον παραγωγής όπου τα κυβερνο-φυσικά συστήματα και το IoT διασυνδέουν μηχανές, ανθρώπους και πληροφοριακά συστήματα, επιτρέποντας συλλογή και αξιοποίηση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, προγνωστική συντήρηση, ευέλικτη προσαρμογή της παραγωγής και υψηλό επίπεδο αυτοματοποίησης μέσω διαλειτουργικών ψηφιακών υποδομών (Zhou et al., 2015· Liao et al., 2017· IBM, 2024· Piccarozzi et al., 2018· Hitpass & Astudillo, 2019).

Παράλληλα, η Διαχείριση Επιχειρησιακών Διαδικασιών (Business Process Management – BPM) αναγνωρίζεται ως το θεμέλιο για τη διακυβέρνηση και τη συνεχή βελτίωση των οργανωσιακών ροών και λειτουργιών, καθώς καλύπτει τη μοντελοποίηση, την εκτέλεση, την παρακολούθηση και την ανασχεδίαση διαδικασιών, με στόχο την επίτευξη στρατηγικής ευθυγράμμισης και τη δημιουργία προστιθέμενης αξίας (Stjepić et al., 2020· Czvetkó et al., 2023). Η BPM λειτουργεί ως ο συντονιστής του ψηφιακού μετασχηματισμού, καθώς επιτρέπει τη λειτουργική ενσωμάτωση καινοτόμων τεχνολογιών, αντί αυτές να εφαρμόζονται αποσπασματικά (Liakos et al., 2022· Szelągowski & Berniak-Woźny, 2024). Η σημασία της έγκειται στην ικανότητά της να συνδέει τους επιχειρησιακούς στόχους με τις ψηφιακές δυνατότητες, να προάγει την οργανωσιακή ευελιξία και να καθιστά δυνατή την ολιστική και προσαρμόσιμη διαχείριση της αξιακής αλυσίδας.

Ωστόσο, η ενσωμάτωση της BPM σε περιβάλλοντα Βιομηχανίας 4.0 παραμένει μια σημαντική πρόκληση, καθώς η βιβλιογραφία αναδεικνύει κατακερματισμό στις προσεγγίσεις, αλληλεπικαλύψεις όρων και ελλείψεις σε συστηματική αξιολόγηση των τεχνικών που επιχειρούν να ενσωματώσουν τεχνολογίες όπως η Τεχνητή Νοημοσύνη,

το IoT και το υπολογιστικό νέφος στον κύκλο ζωής των επιχειρησιακών διαδικασιών, δηλαδή από τη μοντελοποίηση και την εκτέλεση έως την παρακολούθηση και τη βελτιστοποίηση (Stjepić et al., 2020· Piccarozzi et al., 2018· Khider et al., 2024). Παρά την αυξανόμενη ερευνητική παραγωγή, απουσιάζει μια ενιαία, συγκριτική και κατηγοριοποιημένη σύνθεση που να εξετάζει τη συμβατότητα, την ωριμότητα και την εφαρμοσιμότητα των λύσεων BPM στο πλαίσιο της Βιομηχανίας 4.0 (Szelągowski & Berniak-Woźny, 2024· Panagopoulos et al., 2022). Το αντικείμενο της παρούσας μελέτης εντοπίζεται ακριβώς σε αυτό το πεδίο: στη συστηματική χαρτογράφηση και αποτίμηση των προσεγγίσεων που συνδέουν τη BPM με τις τεχνολογίες της Βιομηχανίας 4.0.

1.2 Σημασία της Διαχείρισης Επιχειρησιακών Διαδικασιών στη Βιομηχανία 4.0

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι να καλύψει το ερευνητικό και πρακτικό κενό που περιγράφηκε παραπάνω, μέσω συστηματικής βιβλιογραφικής επισκόπησης (systematic literature review) των προσεγγίσεων, μεθόδων και τεχνικών BPM που εφαρμόζονται ή προτείνονται στο πλαίσιο της Βιομηχανίας 4.0. Ειδικότερα, η εργασία επιδιώκει: (i) τη συστηματική αποτύπωση και κατηγοριοποίηση των υφιστάμενων προσεγγίσεων BPM, (ii) τη συγκριτική αξιολόγησή τους με σαφή και τεκμηριωμένα κριτήρια, (iii) την ανάδειξη θεματικών περιοχών όπου παρατηρείται ερευνητικό έλλειμμα και θεωρητική ασυνέχεια, και (iv) τη διατύπωση τεκμηριωμένων προτάσεων για μελλοντική έρευνα και πρακτική αξιοποίηση σε βιομηχανικά περιβάλλοντα ψηφιακού μετασχηματισμού (Tranfield et al., 2003· Kitchenham & Charters, 2007· Ahmad & Van Looy, 2020· van der Aalst, 2016).

Η συνεισφορά της εργασίας είναι τριπλή. Πρώτον, παρέχει μια ενοποιημένη τρισδιάστατη ταξινόμηση της διάσπαρτης βιβλιογραφίας, διακρίνοντας με σαφήνεια την τεχνολογική βάση, τις δραστηριότητες του κύκλου ζωής BPM και τις εφαρμογές της Βιομηχανίας 4.0. Δεύτερον, προτείνει πλαίσιο συγκριτικής αξιολόγησης με μη επικαλυπτόμενα κριτήρια και ενιαία μέθοδο σύνθεσης μέσω αριθμητικών μέσων όρων. Τρίτον, μέσω ενός εφαρμοσμένου mini case study αναδεικνύει τα οφέλη του ανασχεδιασμού διαδικασιών, συνδέοντας τα θεωρητικά ευρήματα με ενδεικτικά μετρήσιμα αποτελέσματα. Με τον τρόπο αυτό, η εργασία προσφέρει τόσο

κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα όσο και πρακτικό πλαίσιο για επαγγελματίες που σχεδιάζουν τον ψηφιακό μετασχηματισμό οργανισμών.

1.3 Δομή της Διπλωματικής

Η αναφορά της παρούσας διπλωματικής εργασίας οργανώνεται σε οκτώ κεφάλαια. Το πρώτο κεφάλαιο προσδιορίζει το αντικείμενο, τον σκοπό και τη συνεισφορά της μελέτης. Το δεύτερο κεφάλαιο αναπτύσσει το θεωρητικό υπόβαθρο για τις επιχειρησιακές διαδικασίες, τη BPM και τις τεχνολογίες της Βιομηχανίας 4.0. Το τρίτο κεφάλαιο περιγράφει τη μεθοδολογία της συστηματικής επισκόπησης, τις ερευνητικές ερωτήσεις και τα κριτήρια επιλογής και αξιολόγησης των άρθρων. Το τέταρτο κεφάλαιο παρουσιάζει την ανάλυση και την κατηγοριοποίηση των επιλεγμένων μελετών ανά τεχνολογική περιοχή. Το πέμπτο κεφάλαιο πραγματοποιεί τη συγκριτική αξιολόγηση των προσεγγίσεων με βάση τα οριζόμενα κριτήρια. Το έκτο κεφάλαιο αναδεικνύει τα ερευνητικά κενά και τις αντίστοιχες μελλοντικές κατευθύνσεις. Το έβδομο κεφάλαιο παρουσιάζει το πρακτικό μέρος της εργασίας μέσω μελέτης περίπτωσης με διαγράμματα BPMN As-Is και To-Be. Τέλος, το όγδοο κεφάλαιο συνοψίζει τα συμπεράσματα, τους περιορισμούς και την αποκτηθείσα εμπειρία.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – ΥΠΟΒΑΘΡΟ

Η θεωρητική θεμελίωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας εδράζεται στην κατανόηση των βασικών εννοιών που συνδέονται με τις επιχειρησιακές διαδικασίες, τη διαχείρισή τους και τη σύνδεσή τους με τις τεχνολογίες της Βιομηχανίας 4.0. Σκοπός του παρόντος κεφαλαίου είναι η αποσαφήνιση του γνωστικού πλαισίου μέσα στο οποίο κινείται η ερευνητική προσέγγιση, καθώς και η ανάδειξη της σημασίας του Business Process Management (BPM) στην εποχή του ψηφιακού μετασχηματισμού.

Αρχικά, εξετάζεται η έννοια της επιχειρησιακής διαδικασίας (business process), ως βασική δομική μονάδα των οργανωσιακών ροών που καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο οι οργανισμοί δημιουργούν και αποδίδουν αξία. Αναλύονται οι βασικές κατηγορίες διαδικασιών, τα χαρακτηριστικά τους και η συμβολή τους στην επίτευξη των επιχειρησιακών στόχων. Στη συνέχεια, παρουσιάζεται αναλυτικά η επιστημονική περιοχή του BPM, η οποία έχει εξελιχθεί από απλό εργαλείο μοντελοποίησης σε μια ολιστική προσέγγιση διαχείρισης των οργανωσιακών λειτουργιών, με δομημένες φάσεις, συγκεκριμένες μεθοδολογίες και συστήματα υποστήριξης.

Το τρίτο μέρος του κεφαλαίου αφιερώνεται στην παρουσίαση της έννοιας της Βιομηχανίας 4.0 και των τεχνολογιών που τη συνθέτουν. Εξετάζεται η αρχιτεκτονική του νέου βιομηχανικού παραδείγματος, όπως διαμορφώνεται μέσα από την αξιοποίηση τεχνολογιών όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), τα μεγάλα δεδομένα (Big Data), το υπολογιστικό νέφος (Cloud), η τεχνητή νοημοσύνη (AI), τα κυβερνο-φυσικά συστήματα (CPS) και τα ψηφιακά δίδυμα (Digital Twins). Τέλος, το κεφάλαιο ολοκληρώνεται με την αποτύπωση των τρόπων με τους οποίους οι πρακτικές του BPM συνδυάζονται ή επαναπροσδιορίζονται στο πλαίσιο των έξυπνων εργοστασίων, προσφέροντας παραδείγματα εφαρμογών, καθώς και επισημαίνοντας κρίσιμες συνέργειες και μελλοντικές προκλήσεις.

Η συστηματική παρουσίαση των παραπάνω εννοιών και διαστάσεων διαμορφώνει τη θεωρητική βάση για την ανάλυση που θα ακολουθήσει στα επόμενα κεφάλαια, και αποτελεί αναγκαίο υπόβαθρο για την κατανόηση της πολυπλοκότητας και των απαιτήσεων της διαχείρισης επιχειρησιακών διαδικασιών στην εποχή της τέταρτης βιομηχανικής επανάστασης.

2.1 Επιχειρησιακές Διαδικασίες (Business Processes)

2.1.1 Ορισμός και βασικά χαρακτηριστικά

Οι επιχειρησιακές διαδικασίες αποτελούν τη θεμελιώδη μονάδα οργάνωσης και εκτέλεσης των δραστηριοτήτων ενός οργανισμού, καθώς περιγράφουν τον τρόπο με τον οποίο οι εισροές (*inputs*) μετασχηματίζονται σε εκροές (*outputs*) που παράγουν αξία για τον τελικό πελάτη ή χρήστη (Dumas et al., 2018). Μια διαδικασία δεν είναι απλώς μια «λίστα εργασιών», αλλά ένα δομημένο σύνολο αλληλένδετων δραστηριοτήτων με σαφή αφετηρία, κανόνες ροής, πόρους, σημεία ελέγχου και μετρήσιμα αποτελέσματα (Hammer & Champy, 1993). Στη σύγχρονη θεώρηση, οι διαδικασίες ενσωματώνουν τόσο ανθρώπινους ρόλους όσο και πληροφοριακά συστήματα, ενώ συχνά περιλαμβάνουν αποφάσεις, εξαιρέσεις και μηχανισμούς συμμόρφωσης που καθορίζουν την πραγματική λειτουργία του οργανισμού (Dumas et al., 2018). Η «διαδικασιακή» οπτική είναι κρίσιμη επειδή μετακινεί το ενδιαφέρον από μεμονωμένα τμήματα προς τις ροές εργασίας από άκρο σε άκρο (*end-to-end*), όπου συνήθως εντοπίζονται οι καθυστερήσεις και οι αστοχίες συντονισμού (Recker, 2020).

2.1.2 Κατηγορίες επιχειρησιακών διαδικασιών και ενδεικτικά παραδείγματα

Η βιβλιογραφία διακρίνει τις επιχειρησιακές διαδικασίες σε βασικές (*core*), υποστηρικτικές (*support*) και διοικητικές/καθοδηγητικές (*management*) διαδικασίες, ανάλογα με τη συνεισφορά τους στη δημιουργία αξίας και στη λειτουργική συνοχή του οργανισμού (Dumas et al., 2018). Οι βασικές διαδικασίες συνδέονται άμεσα με την παραγωγή και παράδοση προϊόντων ή υπηρεσιών, καθώς και με τη διαχείριση της σχέσης με τον πελάτη, επειδή εκεί παράγεται το «τελικό αποτέλεσμα» που γίνεται αντιληπτό στην αγορά (Hammer & Champy, 1993). Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα βασικής διαδικασίας είναι το *order-to-cash*, όπου ο οργανισμός ξεκινά από την παραγγελία και ολοκληρώνει με την τιμολόγηση και την είσπραξη, συνδέοντας πωλήσεις, αποθήκη, διανομή και οικονομικές λειτουργίες σε μία ενιαία ροή (Dumas et al., 2018). Ενδεικτικά, στη διαδικασία *Order Fulfillment* ενός e-commerce, η υποβολή παραγγελίας ενεργοποιεί διαδοχικά ελέγχους διαθεσιμότητας, προετοιμασία αποστολής, δρομολόγηση μεταφοράς, ενημέρωση πελάτη και έκδοση παραστατικών, ώστε να διασφαλιστεί ότι η υπόσχεση εξυπηρέτησης υλοποιείται χωρίς ασυνέχειες (Recker, 2020).

Οι υποστηρικτικές διαδικασίες δεν δημιουργούν άμεσα αξία προς τον πελάτη, αλλά είναι απαραίτητες για να λειτουργούν οι βασικές ροές, επειδή εξασφαλίζουν πόρους, δεξιότητες, υποδομές και εσωτερικές υπηρεσίες (Dumas et al., 2018). Για παράδειγμα, η διαδικασία *Recruit-to-Hire* καλύπτει τον εντοπισμό ανάγκης στελέχωσης, τη δημοσίευση θέσης, τη διαλογή υποψηφίων και την πρόσληψη, υποστηρίζοντας έμμεσα την παραγωγική ικανότητα του οργανισμού (Recker, 2020). Οι διοικητικές διαδικασίες σχετίζονται με σχεδιασμό, έλεγχο και συντονισμό, όπως η κατάρτιση προϋπολογισμών, η παρακολούθηση απόδοσης και η διακυβέρνηση πολιτικών, επειδή καθορίζουν το πλαίσιο μέσα στο οποίο εκτελούνται οι υπόλοιπες διαδικασίες (Recker, 2020).

Οι υποστηρικτικές διαδικασίες δεν παράγουν άμεσα αξία προς τον πελάτη, αλλά εξασφαλίζουν την ομαλή λειτουργία των βασικών· χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν η διαχείριση ανθρώπινου δυναμικού (π.χ. προσλήψεις, εκπαίδευση), η συντήρηση εξοπλισμού και η υποστήριξη πληροφοριακών συστημάτων (Dumas et al., 2018). Οι διοικητικές διαδικασίες, τέλος, αφορούν τον σχεδιασμό, τον έλεγχο και τη λήψη αποφάσεων που κατευθύνουν τον οργανισμό, όπως ο στρατηγικός προγραμματισμός, η κατάρτιση προϋπολογισμού και η διαχείριση συμμόρφωσης και κινδύνων (Hammer & Champy, 1993).

2.1.3 Οφέλη και οργανωσιακή αξία των επιχειρησιακών διαδικασιών

Η αξία της διαδικασιακής προσέγγισης προκύπτει από το ότι καθιστά την εργασία διαφανή, επαναλήψιμη και βελτιώσιμη, μειώνοντας την εξάρτηση από άτυπες πρακτικές και προσωπική εμπειρία (Dumas et al., 2018). Η σαφής τεκμηρίωση ρόλων και βημάτων μειώνει ασάφειες, λάθη μεταβίβασης και καθυστερήσεις, επειδή κάθε συμμετέχων γνωρίζει «τι κάνει, πότε και με ποια είσοδο/έξοδο» (van der Aalst, 2016). Επιπλέον, όταν μια διαδικασία ορίζεται με μετρήσιμα σημεία ελέγχου, διευκολύνεται ο εντοπισμός στενώσεων (*bottlenecks*) και ενεργειών χωρίς προστιθέμενη αξία, κάτι που συνδέεται άμεσα με μείωση κόστους και βελτίωση επιπέδων εξυπηρέτησης (van der Aalst, 2016). Σε πιο εφαρμοστικό επίπεδο, η συστηματική χαρτογράφηση διαδικασιών υποστηρίζει πρωτοβουλίες συνεχούς βελτίωσης, επειδή επιτρέπει στοχευμένες παρεμβάσεις αντί για γενικές «διορθώσεις» που σπάνια αλλάζουν την πραγματική ροή εργασίας (Dumas et al., 2018). Στο πλαίσιο αυτό, πρακτικές λιτής

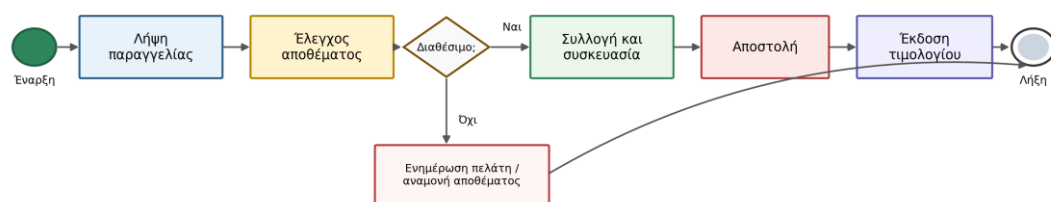
παραγωγής (lean production), όπως το *Kanban*¹, αξιοποιούν την ορατότητα της ροής και τον έλεγχο εργασιών σε εξέλιξη για να μειώσουν χρόνους αναμονής μεταξύ σταδίων και να περιορίσουν τη συσσώρευση αποθεμάτων εντός διαδικασίας (Ohno, 1988).

2.1.4 Μοντελοποίηση και τεκμηρίωση: από την περιγραφή στη μετρήσιμη διαχείριση διαδικασιών

Η μοντελοποίηση διαδικασιών αποτελεί βασικό βήμα, επειδή μεταφράζει την πραγματική λειτουργία σε αναπαραστάσεις που μπορούν να αναλυθούν, να ελεγχθούν και να βελτιωθούν (Dumas et al., 2018). Η χρήση τυποποιημένων συμβολισμών, όπως αυτών που αντιστοιχούν στην γλώσσα μοντελοποίησης BPMN 2.0, διευκολύνει την κοινή κατανόηση μεταξύ επιχειρησιακών και τεχνικών ρόλων, καθώς προσφέρει κοινή «γλώσσα» για γεγονότα, δραστηριότητες, ρόλους και αποφάσεις (Dumas et al., 2018).

Παράλληλα, η εξόρυξη διαδικασιών (*process mining*) αξιοποιεί πραγματικά ψηφιακά ίχνη από πληροφοριακά συστήματα για να ανακατασκευάσει την πραγματική ροή και να εντοπίσει αποκλίσεις από το «πώς νομίζουμε ότι δουλεύει» στο «πώς όντως δουλεύει» (van der Aalst, 2016). Η μετάβαση από περιγραφικές απεικονίσεις σε δεδομένο-κεντρική (data-centric) ανάλυση είναι κρίσιμη, επειδή επιτρέπει τεκμηριωμένες αποφάσεις ανασχεδιασμού και όχι παρεμβάσεις βασισμένες σε υποθέσεις ή μεμονωμένες εμπειρίες (van der Aalst, 2016).

Ροή εκπλήρωσης παραγγελίας (Order Fulfillment)



Ιδια επεξεργασία σε συμβολισμό συμβατό με τη λογική BPMN.

Εικόνα 2.1 – Διαδικασία Order Fulfillment μοντελοποιημένη με συμβολισμό BPMN. Πηγή: Ιδια επεξεργασία βάσει Dumas, La Rosa, Mendling και Reijers (2018).

2.1.5 Πεδία εφαρμογής και σύνδεση με σύνθετα περιβάλλοντα λειτουργίας

Οι επιχειρησιακές διαδικασίες εμφανίζονται σε όλο το εύρος λειτουργιών ενός οργανισμού, όπως παραγωγή, εφοδιαστική αλυσίδα, εξυπηρέτηση πελάτη, οικονομική διαχείριση, ανθρώπινο δυναμικό και τεχνική συντήρηση, επειδή κάθε λειτουργία υλοποιείται μέσα από επαναλαμβανόμενες ροές αποφάσεων και ενεργειών (Recker, 2020). Η διαδικασιακή λογική αποκτά ακόμη μεγαλύτερη σημασία όταν οι οργανισμοί λειτουργούν σε συνθήκες αυξημένης πολυπλοκότητας και διαλειτουργικότητας, όπου η πληροφορία ρέει μεταξύ πολλών συστημάτων και ομάδων, δημιουργώντας ανάγκη για σαφείς κανόνες συντονισμού (Dumas et al., 2018). Σε τέτοια περιβάλλοντα, οι διαδικασίες δεν αποτελούν στατικές περιγραφές, αλλά δυναμικές δομές που προσαρμόζονται σε δεδομένα, γεγονότα και περιορισμούς της λειτουργίας, με αποτέλεσμα να λειτουργούν ως «σκελετός» πάνω στον οποίο μπορούν να ενσωματωθούν τεχνολογίες αυτοματοποίησης και αναλυτικής (Liao et al., 2017).

Η συγκεκριμένη δυναμική προετοιμάζει το έδαφος για την επόμενη ενότητα, όπου η διαχείριση και ο συντονισμός διαδικασιών συνδέονται με τον ψηφιακό μετασχηματισμό, τη διαλειτουργικότητα και τα συστήματα της Βιομηχανίας 4.0 (Liao et al., 2017).

2.2 Διαχείριση επιχειρησιακών διαδικασιών (BPM)

2.2.1 Ορισμός και σκοπός του BPM

Η Διαχείριση Επιχειρησιακών Διαδικασιών (BPM) συνιστά συστηματική διοικητική και τεχνολογική προσέγγιση για τον σχεδιασμό, τη λειτουργία και τη συνεχή βελτίωση των διαδικασιών ενός οργανισμού, με στόχο αποδοτικότητα, ευελιξία και καλύτερη ευθυγράμμιση με τη στρατηγική (Dumas et al., 2018). Το BPM δεν περιορίζεται στη χαρτογράφηση, αλλά περιλαμβάνει μεθόδους, τεχνικές και εργαλεία που καλύπτουν τον κύκλο από το “τι κάνουμε” έως το “πώς το βελτιώνουμε με στοιχεία”, άρα λειτουργεί ως γέφυρα μεταξύ διοίκησης και πληροφοριακών συστημάτων (Van Looy, 2020). Στη σύγχρονη βιβλιογραφία, η BPM αντιμετωπίζεται ως πλαίσιο ολιστικής διακυβέρνησης των ροών εργασίας, ιδίως όταν ο οργανισμός στηρίζεται σε ψηφιακές πλατφόρμες και αυτοματοποίηση (vom Brocke & Rosemann, 2015).

2.2.2 Θεμελιώδεις αρχές

Οι αρχές που συχνά συνδέονται με την BPM, όπως εστίαση στον πελάτη, διαφάνεια, τεκμηρίωση, αυτοματοποίηση και συνεχής βελτίωση, δεν είναι “σλόγκαν”, αλλά κριτήρια που καθορίζουν πώς σχεδιάζονται, ελέγχονται και βελτιώνονται οι

διαδικασίες στην πράξη (vom Brocke & Rosemann, 2015). Η εστίαση στον πελάτη, για παράδειγμα, μεταφράζεται σε σχεδιασμό διαδικασιών με βάση αποτελέσματα και επίπεδα υπηρεσίας, αντί για εσωτερικές ευκολίες τμημάτων του οργανισμού (Dumas et al., 2018). Η διαφάνεια και η τεκμηρίωση σημαίνουν ότι τα βήματα, οι ρόλοι και οι κανόνες γίνονται ρητοί και ελέγξιμοι, ώστε να περιορίζονται οι ασάφειες και να διευκολύνεται η συμμόρφωση (van der Aalst, 2016). Η αυτοματοποίηση, όταν εφαρμόζεται ορθά, δεν “αντικαθιστά” απλώς ανθρώπους, αλλά μειώνει καθυστερήσεις, λάθη και χειρωνακτικές μεταβιβάσεις πληροφοριών (Dumas et al., 2018). Η συνεχής βελτίωση αποτελεί τον μηχανισμό με τον οποίο τα ευρήματα από τη μέτρηση και παρακολούθηση διαδικασιών επιστρέφουν στον ανασχεδιασμό, άρα η βελτιστοποίηση δεν είναι μια αφηρημένη ιδέα αλλά μια συγκεκριμένη φάση

2.2.3 Κύκλος ζωής BPM και ο ρόλος της παρακολούθησης

Ο κύκλος ζωής της BPM συνήθως περιγράφεται ως αλληλουχία σχεδίασης/ανακάλυψης, μοντελοποίησης, εκτέλεσης, παρακολούθησης και αξιολόγησης και βελτιστοποίησης, με έμφαση στο ότι οι φάσεις δεν είναι γραμμικές αλλά επαναληπτικές (Dumas et al., 2018). Η σχεδίαση περιλαμβάνει την αποτύπωση στόχων, απαιτήσεων και περιορισμών, ενώ η μοντελοποίηση μετατρέπει αυτή τη γνώση σε τυποποιημένη περιγραφή (π.χ. BPMN), ώστε να είναι κοινά κατανοητή και τεχνικά αξιοποιήσιμη (Object Management Group, 2011). Η εκτέλεση μπορεί να είναι χειροκίνητη ή υποβοηθούμενη/αυτοματοποιημένη μέσω workflow engines (μηχανών ροών εργασίας), αλλά σε κάθε περίπτωση απαιτεί ορισμό ρόλων και κανόνων ώστε να διατηρείται η συνέπεια (Dumas et al., 2018). Η παρακολούθηση δεν είναι “κοιτάω αν πήγε καλά”, αλλά η συστηματική συλλογή μετρικών, συμβάντων και αποκλίσεων, ώστε να τεκμηριώνεται πού ακριβώς χάνεται χρόνος ή ποιότητα (van der Aalst, 2016). Η βελτιστοποίηση είναι συγκεκριμένη φάση που βασίζεται σε ευρήματα της παρακολούθησης και όχι σε κάποια απλή ευχή, ενώ συχνά υποστηρίζεται από αναλύσεις, όπως process mining (εξόρυξης διαδικασιών) ή root cause analysis (ανάλυσης ριζικών αιτιών) (van der Aalst, 2016).

2.2.4 Συστήματα BPM (BPMS) και λειτουργικότητες

Τα Business Process Management Systems (BPMS) (Συστήματα Διαχείρισης Επιχειρησιακών Διαδικασιών) αποτελούν την τεχνολογική υποδομή που υποστηρίζει την εκτέλεση και τον έλεγχο διαδικασιών, επιτρέποντας τον ορισμό ροών εργασίας, την ανάθεση εργασιών, την εφαρμογή κανόνων δρομολόγησης και την ενσωμάτωση με άλλα εταιρικά συστήματα (Dumas et al., 2018). Κεντρική λειτουργικότητα των BPMS είναι η ενορχήστρωση (orchestration) των βημάτων, έτσι ώστε μια διαδικασία να μπορεί να εκτελείται με συνέπεια ακόμη και όταν εμπλέκει πολλά τμήματα και εφαρμογές (Van Looy, 2020). Η ενσωμάτωση με ERP/CRM και συστήματα παραγωγής δεν είναι διακοσμητική, αλλά απαραίτητη για να εξασφαλιστεί ότι δεδομένα και αποφάσεις ρέουν χωρίς κενά και διπλές καταχωρίσεις, επιτυγχάνοντας έτσι συνέπεια και αξιοπιστία στη λειτουργία του οργανισμού (Dumas et al., 2018). Συνεπώς, η αναφορά σε συγκεκριμένες πλατφόρμες συνοδεύεται από κατάλληλη βιβλιογραφική ή τεχνική παραπομπή, ώστε να τεκμηριώνεται η χρήση τους σε ερευνητικά ή βιομηχανικά περιβάλλοντα (Recker, 2020).

2.2.5 Η BPMN ως πρότυπο μοντελοποίησης και λόγοι χρήσης της

Η BPMN 2.0 αποτελεί διεθνές πρότυπο μοντελοποίησης διαδικασιών, σχεδιασμένο ώστε να γεφυρώνει business και IT, προσφέροντας κοινό, σαφές και επεκτάσιμο συμβολισμό (Object Management Group, 2011). Η χρήση BPMN δεν περιορίζεται στην “εικόνα”, αλλά εξυπηρετεί την ανάλυση ροών, τη διαχείριση εξαιρέσεων και την επικοινωνία των επιχειρησιακών κανόνων σε μορφή που μπορεί να υποστηρίξει αυτοματοποίηση (Dumas et al., 2018). Σε ακαδημαϊκό πλαίσιο, η BPMN είναι κατάλληλη ακριβώς επειδή επιτρέπει τυποποίηση, συγκρισιμότητα μοντέλων και σύνδεση με μηχανισμούς εκτέλεσης και παρακολούθησης (van der Aalst, 2016).

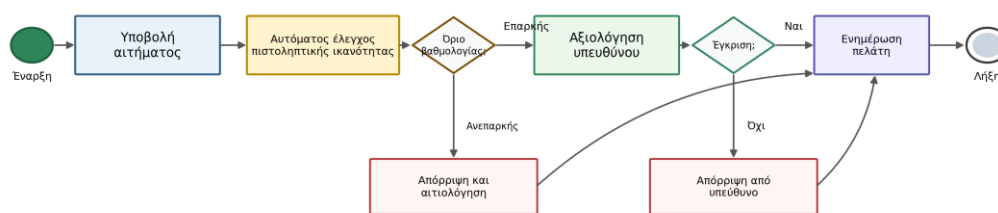
2.2.6 Από την “κλασική” BPM στην data-driven και AI-enhanced BPM

Στο πλαίσιο της Βιομηχανίας 4.0, και λόγω της ανάγκης κάλυψης νέων πεδίων και τεχνολογιών, της αυξανόμενης πολυπλοκότητας των συστημάτων και της απαίτησης για μεγαλύτερη αυτοματοποίηση, η BPM μετακινείται προς μια data-driven

(οδηγούμενη από δεδομένα) λογική, όπου τα δεδομένα από συσκευές, συστήματα και γεγονότα τροφοδοτούν δυναμικά την εκτέλεση και αναθεώρηση των διαδικασιών (Mendling et al., 2020). Η ενίσχυση με τεχνικές ανάλυσης και μηχανικής μάθησης/τεχνητής νοημοσύνης οδηγεί σε AI-enhanced BPM, όπου η πρόβλεψη, η ανίχνευση ανωμαλιών και η υποστήριξη αποφάσεων ενσωματώνονται στον κύκλο ζωής των διαδικασιών (Mendling et al., 2020).

Αυτή η μετάβαση αυξάνει τις απαιτήσεις για διαλειτουργικότητα και διακυβέρνηση δεδομένων, επειδή οι διαδικασίες πλέον “συνομιλούν” με υποδομές IoT, πλατφόρμες analytics (αναλυτικής) και συστήματα ελέγχου (Liao et al., 2017). Η ερευνητική συζήτηση εστιάζει στο πώς οι διαδικασίες παραμένουν διαφανείς και ελέγξιμες όταν γίνονται πιο αυτόνομες και βασίζονται σε αλγοριθμικές αποφάσεις, κάτι που συνδέεται άμεσα με ζητήματα αξιοπιστίας και λογοδοσίας (Recker, 2020).

Διαδικασία αξιολόγησης και έγκρισης δανείου



Η τελική απόφαση διατηρεί σαφή σημεία ελέγχου και ανθρώπινης λογοδοσίας.

Εικόνα 2.2 – Διαδικασία αξιολόγησης και έγκρισης δανείου σε συμβολισμό BPMN. Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει Dumas, La Rosa, Mendling και Reijers (2018).

2.3 Βιομηχανία 4.0

Η Βιομηχανία 4.0 αναφέρεται στην τέταρτη βιομηχανική επανάσταση, η οποία χαρακτηρίζεται από την ενσωμάτωση προηγμένων ψηφιακών τεχνολογιών στην παραγωγική διαδικασία, με στόχο την αυτοματοποίηση, την ευφυή λήψη αποφάσεων και τη βελτιστοποίηση των επιχειρησιακών ροών (Kagermann et al., 2013· Hermann et al., 2016). Ο πυρήνας της αφορά τη διασύνδεση φυσικών και ψηφιακών συστημάτων, δημιουργώντας έναν κυβερνο-φυσικό χώρο (cyber-physical space), όπου μηχανές, αισθητήρες και λογισμικά συνεργάζονται με ελάχιστη ανθρώπινη παρέμβαση (Xu et al., 2018).

Η αρχιτεκτονική της Βιομηχανίας 4.0 είναι πολυεπίπεδη και περιλαμβάνει έξυπνες συσκευές (smart devices), διασυνδεδεμένες μέσω του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT), που συλλέγουν και ανταλλάσσουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο (Gilchrist, 2016). Το Υπολογιστικό Νέφος παρέχει την υποδομή για την αποθήκευση και ανάλυση των μεγάλων δεδομένων (Big Data), ενώ η Τεχνητή Νοημοσύνη (AI) επιτρέπει την εξαγωγή προγνωστικών μοντέλων και την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων (Lee et al., 2018). Τα Κυβερνο-Φυσικά Συστήματα (CPS) συνδυάζουν φυσικές διεργασίες με υπολογιστικές μονάδες ελέγχου, υποστηρίζοντας την αυτονομία και την ευελιξία των παραγωγικών μονάδων (Monostori et al., 2016). Τέλος, η έννοια των Ψηφιακών Διδύμων (Digital Twins) επιτρέπει την προσομοίωση και τον έλεγχο των πραγματικών συστημάτων σε εικονικά περιβάλλοντα, μειώνοντας τα κόστη και τα λάθη (Tao et al., 2019). Ενδιάμεσα στρώματα συλλογής δεδομένων (data acquisition) και επεξεργασίας στο άκρο του δικτύου (edge/fog computing) αναλαμβάνουν την προεπεξεργασία και το φιλτράρισμα των δεδομένων κοντά στην πηγή τους, μειώνοντας τον όγκο που μεταφέρεται στο νέφος και τον χρόνο απόκρισης (Gilchrist, 2016). Στη συνέχεια αναλύονται συντόμως οι προαναφερόμενες τεχνολογίες που τοποθετούνται στα στρώματα της αρχιτεκτονικής της Βιομηχανίας 4.0.



Η BPM λειτουργεί ως επίπεδο εντοπισμού που συνδέει επιχειρησιακούς στόχους, δεδομένα και φυσικές ενέργειες.

Εικόνα 2.3 – Ενδεικτική στρωματική αρχιτεκτονική της Βιομηχανίας 4.0. Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει Gilchrist (2016), Monostori et al. (2016), Lee et al. (2018) και Tao et al. (2019).

Internet of Things (IoT)

Το IoT αποτελεί τη βασική τεχνολογία διασύνδεσης στον πυρήνα της Βιομηχανίας 4.0. Αναφέρεται στο δίκτυο φυσικών αντικειμένων—συσκευών, αισθητήρων, μηχανών—που είναι εξοπλισμένα με δυνατότητες επικοινωνίας, συλλογής και ανταλλαγής δεδομένων (Atzori, Iera & Morabito, 2010). Στο πλαίσιο της παραγωγής, το IoT επιτρέπει την παρακολούθηση εξοπλισμού σε πραγματικό χρόνο, την ανίχνευση βλαβών και την έξυπνη αυτοματοποίηση μέσω αισθητήρων. Χρησιμοποιείται σε εφαρμογές όπως προγνωστική συντήρηση, έλεγχος ποιότητας, παρακολούθηση αποθεμάτων και tracing στην εφοδιαστική αλυσίδα.

Big Data Analytics

Η Βιομηχανία 4.0 παράγει τεράστιους όγκους δεδομένων μέσω IoT, CPS και συστημάτων ERP. Τα Big Data Analytics αφορούν την ικανότητα αποθήκευσης, επεξεργασίας και ανάλυσης αυτών των δεδομένων με σκοπό την εξαγωγή επιχειρησιακά χρήσιμων πληροφοριών (Wamba et al., 2017). Επιτρέπει την αναγνώριση μοτίβων, τη βελτιστοποίηση ροών, τον έλεγχο ποιότητας, ακόμα και την εξατομικευμένη παραγωγή μέσω ανάλυσης συμπεριφοράς πελατών. Πλατφόρμες όπως Apache Hadoop¹ και Spark² έχουν υιοθετηθεί σε βιομηχανικά περιβάλλοντα για real-time analytics.

Cloud Computing

Το Υπολογιστικό Νέφος (YN) προσφέρει εικονικές υποδομές (Infrastructure-as-a-Service, παροχή υπολογιστικών πόρων, αποθήκευσης και δικτύου κατ' απαίτηση), λογισμικό (Software-as-a-Service, έτοιμες εφαρμογές προσβάσιμες μέσω διαδικτύου) και πλατφόρμες (Platform-as-a-Service, περιβάλλοντα ανάπτυξης και εκτέλεσης εφαρμογών), μειώνοντας το κόστος και αυξάνοντας την ευελιξία των επιχειρήσεων (Buyya et al., 2009). Στην Βιομηχανία 4.0, το YN επιτρέπει την ασφαλή αποθήκευση δεδομένων από αισθητήρες, την κοινή χρήση μοντέλων AI, την απομακρυσμένη διαχείριση παραγωγικών μονάδων και την κλιμακωσιμότητα συστημάτων BPM. Παράλληλα, παρέχει την υποδομή τόσο για την ανάλυση μεγάλων δεδομένων όσο και

¹ (<https://hadoop.apache.org>)

² (<https://spark.apache.org>)

για την εκτέλεση των δραστηριοτήτων των διαδικασιών, ενώ μπορεί να φιλοξενεί και τα ίδια τα συστήματα BPM, τα οποία στη συνέχεια κλιμακώνονται ανάλογα με τη ζήτηση, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα τη διαλειτουργικότητα μεταξύ ετερογενών συστημάτων.

Artificial Intelligence (AI)

Η Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence - AI) επιτρέπει τη δημιουργία «έξυπνων» μηχανισμών που μαθαίνουν από δεδομένα και προσαρμόζουν τη συμπεριφορά τους. Μέσω Μηχανικής Μάθησης (Machine Learning) και Βαθιάς Μάθησης (Deep Learning), η AI υποστηρίζει την αυτόματη ταξινόμηση συμβάντων, την πρόβλεψη βλαβών, την οπτική αναγνώριση (computer vision), ακόμα και την αυτόνομη ρομποτική (Russell & Norvig, 2021). Στη διαχείριση διαδικασιών, μπορεί να προτείνει βελτιώσεις, να βελτιστοποιεί ροές, να αυτοματοποιεί αποφάσεις και να υποστηρίξει την εξόρυξη διαδικασιών.

Cyber-Physical Systems (CPS)

Τα CPS αποτελούν τη ραχοκοκαλιά της αυτοματοποίησης στη Βιομηχανία 4.0. Πρόκειται για ενσωματωμένα συστήματα που συνδυάζουν φυσικές διεργασίες (π.χ. μηχανικά εξαρτήματα, αισθητήρες) με λογισμικό ελέγχου και επικοινωνίας (Rajkumar et al., 2010). Εφαρμόζονται σε γραμμές παραγωγής, έξυπνα ρομπότ, και logistics, όπου η φυσική δράση και η υπολογιστική απόκριση είναι πλήρως συγχρονισμένες. Προσφέρουν υψηλό βαθμό αυτονομίας, προσαρμοστικότητας και αλληλεπίδρασης με το περιβάλλον.

Digital Twins

Τα Digital Twins είναι εικονικές αναπαραστάσεις φυσικών αντικειμένων, διαδικασιών ή συστημάτων, που συγχρονίζονται σε πραγματικό χρόνο με τα αντίστοιχα φυσικά τους ισοδύναμα (Fuller et al., 2020). Χρησιμοποιούνται για προσομοιώσεις, ανάλυση σεναρίων, προβλέψεις και βελτιστοποίηση απόδοσης. Σε συνδυασμό με AI και IoT, επιτρέπουν τη δυναμική προσαρμογή της παραγωγής, την ελαχιστοποίηση λαθών και τη μείωση του χρόνου ανάπτυξης νέων προϊόντων.

Η Βιομηχανία 4.0 προσφέρει στις επιχειρήσεις ένα νέο, επαναστατικό πλαίσιο λειτουργίας, όπου η τεχνολογία επιταχύνει και βελτιστοποιεί τις διαδικασίες σε όλα τα

επίπεδα της παραγωγικής αλυσίδας. Ένα από τα βασικότερα πλεονεκτήματα είναι η αύξηση της παραγωγικότητας και της αποδοτικότητας, καθώς η αυτοματοποίηση με τεχνητή νοημοσύνη και οι αισθητήρες σε πραγματικό χρόνο περιορίζουν τις καθυστερήσεις, τις σπατάλες και τα λάθη (Lu, 2017).

Παράλληλα, επιτυγχάνεται ευελιξία στην παραγωγή και δυνατότητα προσωποποιημένων προϊόντων, γεγονός που επιτρέπει την προσαρμογή στις απαιτήσεις του πελάτη με μικρότερο κόστος και χρόνο, σε αντίθεση με τη μαζική παραγωγή του παρελθόντος (Brettel et al., 2014).

Ένα επιπλέον στρατηγικό όφελος είναι η μείωση του κόστους μέσω προληπτικής συντήρησης, καθώς τα cyber-physical systems και το IoT συλλέγουν δεδομένα λειτουργίας που προβλέπουν αστοχίες εξοπλισμού και επιτρέπουν την έγκαιρη επέμβαση χωρίς διακοπές παραγωγής (Lee et al., 2014).

Παράλληλα, η ποιότητα των προϊόντων βελτιώνεται σημαντικά, χάρη στη συνεχή παρακολούθηση των μεταβλητών της παραγωγής και στη χρήση τεχνικών Μηχανικής Μάθησης που εντοπίζουν ανωμαλίες ή αποκλίσεις πριν αυτές επηρεάσουν το τελικό προϊόν (Schumacher et al., 2016), όπως συμβαίνει σε σενάρια ελέγχου ποιότητας με οπτική επιθεώρηση (computer vision) πάνω στη γραμμή παραγωγής, σε προληπτική ή προγνωστική συντήρηση (predictive maintenance) βάσει δεδομένων αισθητήρων δονήσεων/θερμοκρασίας για την αποφυγή αστοχιών, σε δυναμική ρύθμιση παραμέτρων διεργασίας και ευέλικτη/εξατομικευμένη παραγωγή (mass customization) σε πραγματικό χρόνο, σε ιχνηλασιμότητα και βελτιστοποίηση εφοδιαστικής αλυσίδας μέσω ψηφιακής διασύνδεσης (end-to-end visibility), καθώς και σε αξιοποίηση ψηφιακών διδύμων για προσομοίωση, δοκιμή και βελτιστοποίηση πριν εφαρμοστούν αλλαγές στο φυσικό σύστημα (Lee et al., 2014; Monostori et al., 2016; Lu, 2017; Tao et al., 2019)

Ωστόσο, η μετάβαση στη Βιομηχανία 4.0 δεν είναι χωρίς προκλήσεις. Πρώτα απ' όλα, απαιτείται υψηλή επένδυση σε νέες υποδομές, εξοπλισμό και αναβάθμιση των ψηφιακών δεξιοτήτων του προσωπικού, κάτι που μπορεί να αποδειχθεί απαγορευτικό για μικρομεσαίες επιχειρήσεις (Santos et al., 2017).

Επιπλέον, η κυβερνοασφάλεια καθίσταται κρίσιμο ζήτημα, καθώς ο όγκος των δεδομένων και οι αυξημένες ψηφιακές διασυνδέσεις αυξάνουν την ευαλωτότητα σε

επιθέσεις και την πιθανότητα παραβίασης προσωπικών ή επιχειρησιακών δεδομένων· ουσιαστικά, η ενοποίηση των διαφόρων συστημάτων σε ένα ενιαίο περιβάλλον Βιομηχανίας 4.0 διευρύνει σημαντικά την επιφάνεια επίθεσης (attack surface) του οργανισμού (Fernández-Caramés & Fraga-Lamas, 2018).

Τέλος, σημαντική πρόκληση αποτελεί η δυσκολία εναρμόνισης παλαιών συστημάτων και τεχνολογιών με τις νέες ψηφιακές λύσεις, καθώς πολλές επιχειρήσεις εξακολουθούν να βασίζονται σε παρωχημένα συστήματα ελέγχου ή λογισμικά που δεν υποστηρίζουν την απαιτούμενη διαλειτουργικότητα (Kamble et al., 2018). Αυτή η ασυμβατότητα ενδέχεται να προκαλέσει επιπλέον καθυστερήσεις και κόστος, εάν δεν σχεδιαστεί προσεκτικά η στρατηγική ενσωμάτωσης.

2.4 BPM και Industry 4.0: Συσχέτιση και συνέργειες

Η Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση επαναπροσδιορίζει τη λειτουργία της παραγωγής, καθώς η λήψη αποφάσεων, ο έλεγχος και ο συντονισμός της εργασίας μετακινούνται από στατικά, γραμμικά μοντέλα οργάνωσης προς δυναμικά, δεδομενοκεντρικά και διασυνδεδεμένα οικοσυστήματα.

Σε αυτό το περιβάλλον, η BPM αποκτά στρατηγικό ρόλο, όχι ως μια ακόμη τεχνική “βελτίωσης ροών”, αλλά ως μηχανισμός ενοποίησης της λειτουργικής λογικής του οργανισμού με τις ψηφιακές δυνατότητες των έξυπνων εργοστασίων, επιτρέποντας κοινή γλώσσα σχεδίασης, ορατότητα, τυποποίηση και διακυβέρνηση των διαδικασιών σε πραγματικό χρόνο (Mendling et al., 2020; Fraunhofer IPA, 2021). Από αυτή την οπτική, η συνέργεια BPM–Industry 4.0 δεν προκύπτει επειδή “συνυπάρχουν” τεχνολογίες, όπως IoT ή analytics, αλλά επειδή η BPM προσφέρει το οργανωτικό και σημασιολογικό πλαίσιο μέσα στο οποίο τα δεδομένα μετατρέπονται σε ελεγχόμενη δράση, με σαφείς ρόλους, κανόνες, εξαρτήσεις και δείκτες απόδοσης.

Η συσχέτιση BPM και Industry 4.0 εδράζεται στην ικανότητα της BPM να παρέχει έναν τυποποιημένο, κατανοητό και διαφανή μηχανισμό οργάνωσης της επιχειρησιακής γνώσης, η οποία πλέον κατανέμεται μεταξύ ανθρώπινων και μηχανικών παραγόντων, ενώ οι αποφάσεις εκτελούνται ολοένα συχνότερα μέσω αυτοματοποιημένων κανόνων ή γεγονότων που παράγονται από αισθητήρες και συστήματα (Ko et al., 2009; Kerremans, 2020). Σε επίπεδο αρχιτεκτονικής, η BPM λειτουργεί ως “στρώμα

ενορχήστρωσης” που γεφυρώνει την επιχειρησιακή πρόθεση με τα συστήματα παραγωγής και ελέγχου, διαμεσολαβώντας μεταξύ των κυβερνο-φυσικών υποδομών και των επιχειρησιακών πλατφορμών (π.χ. ERP, MES - Manufacturing Execution Systems / Συστήματα Εκτέλεσης Παραγωγής, SCADA)³, ώστε οι ροές πληροφορίας, οι αποφάσεις και οι ενέργειες να παραμένουν ευθυγραμμισμένες με στόχους, όπως η ποιότητα, η διαθεσιμότητα, η ιχνηλασιμότητα και η ευελιξία (Brocke & Rosemann, 2015; Dumas et al., 2018). Με αυτόν τον τρόπο, οι διαδικασίες παύουν να είναι “περιγραφές” και μετατρέπονται σε λειτουργικούς μηχανισμούς συνεχούς παρακολούθησης και προσαρμογής, όπου γεγονότα από το πεδίο ενεργοποιούν ελέγχους, ανακατευθύνσεις ροών και κλιμακώσεις αποφάσεων με τρόπο ελεγχόμενο και τεκμηριωμένο.

Η παρούσα ενότητα εστιάζει στη συσχέτιση και στις ενδεχόμενες συνέργειες μεταξύ BPM και Βιομηχανίας 4.0· η εκτενής ανάλυση της ενσωμάτωσης και τα σχετικά παραδείγματα εφαρμογής αναπτύσσονται στα επόμενα κεφάλαια, καθώς αποτελούν το κύριο αντικείμενο της έρευνας. Ενδεικτικά, ακολουθούν ορισμένα συνοπτικά παραδείγματα από Smart Factories.

Bosch – Βελτιστοποίηση Παραγωγής μέσω BPM & AI

Η Bosch αποτελεί πρωτοπόρο στην ενσωμάτωση BPM στα εργοστάσια Βιομηχανίας 4.0, με περισσότερες από 280 εγκαταστάσεις που λειτουργούν βάσει έξυπνων διαδικασιών. Το λογισμικό ARIS BPM Suite χρησιμοποιείται για τον σχεδιασμό και τη συνεχή παρακολούθηση ροών παραγωγής, ενώ οι αισθητήρες IoT συλλέγουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για την κατάσταση των μηχανών. Η χρήση αλγορίθμων Μηχανικής Μάθησης επιτρέπει τη βελτιστοποίηση της συντήρησης, προβλέποντας αστοχίες και μειώνοντας τον χρόνο αδράνειας. Η BPM αναλαμβάνει επίσης την αυτόματη δημιουργία εντολών ανεφοδιασμού, εναρμονίζοντας πλήρως τις διαδικασίες με τις ανάγκες του εργοστασίου (Bosch Group, 2022).

³ (SCADA)

Siemens Amberg – Αυτοματισμός σε 1.000+ Διαδικασίες

Το Siemens Electronics Plant στο Άμπεργκ θεωρείται υπόδειγμα Smart Factory, με πάνω από 75% των διαδικασιών να είναι αυτοματοποιημένες. Η BPM χρησιμοποιείται για τη μοντελοποίηση όλων των επιχειρησιακών και παραγωγικών διαδικασιών, ενώ παράλληλα διασυνδέεται με αισθητήρες και ERP συστήματα. Η διαλειτουργικότητα μεταξύ BPM, IoT, MES και AI επιτρέπει την αμφίδρομη παρακολούθηση και προσαρμογή της παραγωγής. Χάρη στην BPM, επιτυγχάνεται διαφάνεια στη λήψη αποφάσεων, με βελτίωση της ποιότητας κατά 99.99885% (Siemens, 2021).

Volkswagen – BPM για Real-Time Συναρμολόγηση

Η Volkswagen εφαρμόζει BPM για την αυτοματοποίηση των γραμμών συναρμολόγησης στα εργοστάσια της, ενσωματώνοντας IoT αισθητήρες, ρομποτικά συστήματα και ψηφιακά δίδυμα (digital twins). Το BPM μοντελοποιεί τις διαδικασίες logistics, ελέγχου ποιότητας και ροής προσωπικού, με στόχο τη δυναμική ρύθμιση των ρυθμών παραγωγής. Σε περιπτώσεις αναποτελεσματικότητας, το BPM ενεργοποιεί αυτοματοποιημένες ενέργειες για να ελαχιστοποιηθεί ο χρόνος διακοπής (downtime), οδηγώντας σε αύξηση της λειτουργικής διαθεσιμότητας και μείωση αποβλήτων (vom Brocke, J., & Rosemann, M. (2015))

General Electric (GE) – από το Asset Management στη BPM ενοποίηση

Η GE, μέσω της Predix Platform, συλλέγει τεράστιο όγκο δεδομένων από αισθητήρες σε βιομηχανικά μηχανήματα. Τα δεδομένα αυτά αξιοποιούνται από BPM εφαρμογές για προληπτική συντήρηση, προγραμματισμό επιθεωρήσεων, ακόμα και για προσομοιώσεις “what-if” μέσω ψηφιακών διδύμων. Η BPM λειτουργεί εδώ ως ενοποιητικός κόμβος μεταξύ predictive analytics (προγνωστικής ανάλυσης), διαδικασιών διαχείρισης ανθρώπινου δυναμικού και διαχείρισης πόρων, διασφαλίζοντας βελτιστοποίηση από άκρη σε άκρη (GE Digital, 2020).

Κλειστός βρόχος BPM και Industry 4.0 σε έξυπνο εργοστάσιο



Η τεχνολογία παράγει αξία όταν τα δεδομένα επιστρέφουν οργανωμένα στον κύκλο ζωής της διαδικασίας.

Εικόνα 2.4 – Κλειστός βρόχος ενσωμάτωσης BPM και Industry 4.0 σε έξυπνο εργοστάσιο. Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει Kusiak (2018) και Dumas et al. (2018).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗΣ

Το παρόν κεφάλαιο παρουσιάζει με διαφανή και αναπαραγώγιμο τρόπο τη συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση που εφαρμόστηκε για τη χαρτογράφηση, την κατηγοριοποίηση και την αξιολόγηση προσεγγίσεων BPM στη Βιομηχανία 4.0. Η μεθοδολογία αναπτύχθηκε σε έξι διαδοχικά βήματα: διατύπωση ερευνητικών ερωτήσεων, επιλογή βάσεων και πηγών, κατασκευή ερωτημάτων αναζήτησης, εφαρμογή κριτηρίων αποδοχής και ποιότητας, εξαγωγή και κωδικοποίηση δεδομένων και, τέλος, ποσοτική και θεματική σύνθεση των ευρημάτων. Η δομή του κεφαλαίου ακολουθεί ακριβώς αυτή τη σειρά, ώστε κάθε μεθοδολογική απόφαση να συνδέεται με το αντίστοιχο αποτέλεσμα και να μπορεί να ελεγχθεί ή να επαναληφθεί (Tranfield et al., 2003· Kitchenham & Charters, 2007).

Η εργασία αποτελεί συστηματική ανασκόπηση πρωτογενών προσεγγίσεων και όχι μετα-ανασκόπηση. Το τελικό αναλυτικό δείγμα περιλαμβάνει 18 πρωτογενείς μελέτες που πληρούν τα κριτήρια ένταξης. Υφιστάμενες συστηματικές ή αφηγηματικές ανασκοπήσεις δεν προσμετρώνται στις 18 μελέτες και δεν βαθμολογούνται στον Πίνακα 5.2· χρησιμοποιούνται μόνο ως δευτερογενείς πηγές για τριγωνοποίηση των ευρημάτων, έλεγχο της πληρότητας της αναζήτησης και ενίσχυση της συζήτησης για ερευνητικά κενά και μελλοντικές κατευθύνσεις. Η διάκριση αυτή διατηρεί σαφή τα όρια ανάμεσα στη σύνθεση των πρωτογενών ευρημάτων και στην υποστηρικτική αξιοποίηση της ήδη υπάρχουσας γνώσης.

3.1 Στόχος και ερευνητικές ερωτήσεις

Ο στόχος της επισκόπησης είναι να συγκεντρώσει και να συνθέσει την πρόσφατη ερευνητική παραγωγή που αφορά την εφαρμογή ή την προσαρμογή της BPM σε περιβάλλοντα Βιομηχανίας 4.0, με έμφαση στην αξιοποίηση τεχνολογιών, όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων, η τεχνητή νοημοσύνη, τα μεγάλα δεδομένα, το υπολογιστικό νέφος, τα κυβερνοφυσικά συστήματα και τα ψηφιακά δίδυμα. Η επισκόπηση επιδιώκει, πρώτον, να καταγράψει τις κύριες κατηγορίες προσεγγίσεων, μεθόδων και τεχνικών που εμφανίζονται στη βιβλιογραφία και, δεύτερον, να τις συγκρίνει με κριτήρια που επιτρέπουν αξιολόγηση ωριμότητας, εφαρμοσιμότητας και τεχνολογικής πληρότητας. Η λογική διατύπωσης ερευνητικών ερωτήσεων ακολουθεί τη σύσταση των Kitchenham και Charters (2007), σύμφωνα με την οποία οι ερωτήσεις πρέπει να είναι συγκεκριμένες, να απαντώνται με βάση τα δεδομένα των επιλεγμένων μελετών και να οδηγούν σε σαφές πλάνο εξαγωγής και σύνθεσης πληροφοριών.

Οι ερευνητικές ερωτήσεις (RQ) που καθοδήγησαν το πρωτόκολλο της επισκόπησης διατυπώνονται ως εξής (Kitchenham & Charters, 2007· Snyder, 2019):

- **RQ1:** Ποιες προσεγγίσεις, μέθοδοι και τεχνικές BPM έχουν προταθεί ή εφαρμοστεί σε περιβάλλοντα Βιομηχανίας 4.0;
- **RQ2:** Πώς μπορούν να κατηγοριοποιηθούν οι προσεγγίσεις με βάση τρεις ανεξάρτητες διαστάσεις: τεχνολογική βάση, δραστηριότητα του κύκλου ζωής BPM και λειτουργία ή εφαρμογή στη Βιομηχανία 4.0;
- **RQ3:** Με ποια κριτήρια μπορούν να αξιολογηθούν και να συγκριθούν οι προσεγγίσεις αυτές (π.χ. διαλειτουργικότητα, κλιμακωσιμότητα, υποστήριξη δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, βαθμός αυτοματοποίησης) και οι κατηγορίες τους και ποιες φαίνεται να υπερτερούν και με βάση ποια ακριβώς κριτήρια;
- **RQ4:** Ποια ερευνητικά κενά και ποιες μελλοντικές κατευθύνσεις αναδεικνύονται από τη σύνθεση των ευρημάτων;

Σημειώνεται ότι ο τρόπος κατηγοριοποίησης (RQ2) δεν ήταν προκαθορισμένος, αλλά προέκυψε επαγωγικά από τη μελέτη της επιλεγμένης βιβλιογραφίας. Ο ακόλουθος πίνακας αντιστοιχίζει κάθε ερευνητική ερώτηση με το σημείο της αναφοράς όπου απαντάται:

Πίνακας 3.1 – Αντιστοίχιση ερευνητικών ερωτημάτων και κεφαλαίων απάντησης

Ερώτηση	Σημείο απάντησης στην αναφορά
RQ1	Κεφάλαιο 4 (Ενότητες 4.2–4.6)
RQ2	Κεφάλαιο 4 (Ιεραρχική κατηγοριοποίηση) – Ενότητα 4.1
RQ3	Κεφάλαιο 5 (Συγκριτική Αξιολόγηση)
RQ4	Κεφάλαιο 6 (Ερευνητικά Κενά και Κατευθύνσεις)

3.2 Επιλογή πηγών

Η αναζήτηση πραγματοποιήθηκε σε επιστημονικές πηγές που καλύπτουν τόσο το πεδίο των πληροφοριακών συστημάτων όσο και το πεδίο της βιομηχανικής μηχανικής (industrial engineering). Ως κύριες πηγές αναζήτησης επιλέχθηκαν το Google Scholar, το IEEE Xplore, το Scopus και το SpringerLink, επειδή παρέχουν ευρεία κάλυψη σε

περιοδικά και συνέδρια που δημοσιεύουν έρευνα για BPM, Industry 4.0 και συναφείς τεχνολογίες.

Η επιλογή πολλαπλών βάσεων είναι συμβατή με τις συστάσεις των Kitchenham και Charters (2007), διότι μειώνει τον κίνδυνο παράλειψης σημαντικών μελετών και ενισχύει την πληρότητα της επισκόπησης. Επιπλέον, η χρήση του Scopus υποστηρίζει συστηματική καταγραφή μεταδεδομένων και διευκολύνει τις ποσοτικές απεικονίσεις, ενώ το IEEE Xplore και το SpringerLink καλύπτουν μεγάλο μέρος της τεχνικής βιβλιογραφίας που αφορά ψηφιακά βιομηχανικά συστήματα.

Πίνακας 3.2 – Πηγές αναζήτησης και αιτιολόγηση επιλογής

<i>Πηγή</i>	<i>Κάλυψη</i>	<i>Λόγος επιλογής</i>
<i>Google Scholar</i>	Διατμηματική κάλυψη περιοδικών και συνεδρίων	Ευρεία αναζήτηση και εντοπισμός citations και προδημοσιεύσεων
<i>IEEE Xplore</i>	Συνέδρια και περιοδικά μηχανικής και πληροφορικής	Υψηλή συνάφεια για IoT, CPS, AI και βιομηχανικά πληροφοριακά συστήματα
<i>Scopus</i>	Ευρετήριο πολλών εκδοτών	Αξιόπιστα μεταδεδομένα, φίλτρα και δυνατότητα εξαγωγής για ποσοτικές αναλύσεις
<i>SpringerLink</i>	Βιβλία, κεφάλαια και περιοδικά	Κάλυψη BPM, εξόρυξη διαδικασιών (process mining) και Βιομηχανία 4.0 σε ενημερωμένους τόμους

3.3 Κριτήρια αναζήτησης

Η στρατηγική αναζήτησης βασίστηκε σε συνδυασμούς λέξεων κλειδιών που αντιστοιχούν στους δύο βασικούς πυλώνες του θέματος, δηλαδή στην BPM και στη Βιομηχανία 4.0, καθώς και σε συμπληρωματικούς όρους που αναφέρονται στις τεχνολογίες της Βιομηχανίας 4.0. Η κατασκευή των ερωτημάτων αναζήτησης ακολούθησε λογικούς τελεστές AND και OR ώστε να διασφαλιστεί ισορροπία ανάμεσα σε ευαισθησία και εξειδίκευση, όπως προτείνεται στις κατευθυντήριες

γραμμές για συστηματικές επισκοπήσεις (Kitchenham & Charters, 2007· Petticrew & Roberts, 2006).

Ο χρονικός περιορισμός (2017-2025) κατά την αναζήτηση της βιβλιογραφίας επιλέχθηκε ώστε να καλύπτει την περίοδο εκτόξευσης της ερευνητικής παραγωγής για Βιομηχανία 4.0, σύμφωνα με την επισκόπηση των Liao et al. (2017), ενώ η γλώσσα περιορίστηκε κυρίως στα αγγλικά, με δυνατότητα ένταξης και ελληνόγλωσσων μελετών όπου ήταν διαθέσιμες ώστε να διασφαλίζεται η δυνατότητα πλήρους μελέτης του κειμένου, για λόγους συγκρισιμότητας και πρόσβασης σε peer reviewed (αξιολογημένες από ομότιμους) δημοσιεύσεις. Η αναζήτηση συμπληρώθηκε με backward και forward snowballing, δηλαδή εντοπισμό επιπλέον μελετών από τις βιβλιογραφίες των επιλεγμένων άρθρων και από τις αναφορές προς αυτά (citation/snowballing), πρακτική που συνιστάται για αύξηση της πληρότητας (Wohlin, 2014).

Πίνακας 3.3 – Σύνθετα ερωτήματα αναζήτησης και βασικές λέξεις-κλειδιά

<i>Διάσταση</i>	<i>Ενδεικτικοί όροι και συνδυασμοί</i>
<i>Κύριος άξονας</i>	Business Process Management AND Industry 4.0
<i>IoT</i>	BPM AND (IoT OR Internet of Things OR sensor data)
<i>AI</i>	BPM AND (artificial intelligence OR machine learning OR deep learning OR reinforcement learning OR supervised learning OR unsupervised learning OR robotics OR statistical modeling OR feature engineering)
<i>Big Data</i>	BPM AND (big data OR analytics OR data driven OR data mining OR data engineering OR business intelligence OR ETL OR data lakes OR data warehousing OR stream processing OR batch processing)
<i>Cloud</i>	BPM AND cloud computing OR BPMS OR SaaS OR fog computing OR edge computing
<i>CPS</i>	BPM AND cyber physical systems OR smart factory
<i>Digital Twins</i>	BPM AND digital twin OR simulation OR virtual commissioning
<i>Process Mining</i>	BPM AND (process mining OR event log OR conformance checking) — εξετάζεται ως

Κατά την εκτέλεση των ερωτημάτων εφαρμόστηκαν φίλτρα ανά έτος δημοσίευσης, ανά τύπο εγγράφου (άρθρα περιοδικών και πρακτικά συνεδρίων) και, όπου ήταν διαθέσιμο, ανά θεματική κατηγορία (Computer Science, Engineering, Business/Management). Οι πλήρεις συμβολοσειρές αναζήτησης (search strings) καταγράφηκαν σε αρχείο καταγραφής αναζήτησης ώστε να μπορεί να επαναληφθεί η διαδικασία. Η διαδικασία εξαγωγής μεταδεδομένων περιλάμβανε τίτλο, συγγραφείς, έτος, εκδότη ή πηγή, τύπο δημοσίευσης, DOI ή URL, αριθμό αναφορών (citations) για την υποστήριξη του snowballing, καθώς και σύντομη περιγραφή της συνεισφοράς (abstract). Η επιλογή αυτών των πεδίων ευθυγραμμίζεται με τη λογική της data extraction form (φόρμας εξαγωγής δεδομένων) που παρουσιάζεται αναλυτικά στον Πίνακα 3.6· τα πεδία της επιλέχθηκαν ώστε να υποστηρίζουν τόσο την εφαρμογή των κριτηρίων ποιότητας και συνάφειας όσο και τη συγκριτική σύνθεση των ευρημάτων, και ευθυγραμμίζονται με τη λογική που συστήνεται σε καθιερωμένες προσεγγίσεις συστηματικής ανασκόπησης.

3.4 Κριτήρια αποδοχής/απόρριψης και ποιότητας

Η διαδικασία επιλογής μελετών πραγματοποιήθηκε σε δύο διαδοχικά στάδια, με στόχο την απομάκρυνση μη συναφών εγγραφών και την ενίσχυση της εσωτερικής εγκυρότητας του τελικού δείγματος. Στο πρώτο στάδιο εξετάστηκαν τα μεταδεδομένα (τίτλος και περίληψη) με βάση τα κριτήρια αποδοχής και αποκλεισμού που εμφανίζονται και δικαιολογούνται στον Πίνακα 3.4, ώστε να εντοπιστούν μελέτες που αναφέρονται ρητά σε BPM και σε συμφραζόμενα Βιομηχανίας 4.0 ή σε τεχνολογίες που συνδέονται άμεσα με έξυπνα εργοστάσια (smart factories). Στο δεύτερο στάδιο πραγματοποιήθηκε ανάγνωση πλήρους κειμένου, ώστε να επιβεβαιωθεί ότι η μελέτη περιέχει σαφή μεθοδολογική περιγραφή και συνεισφορά καθώς και επαρκή τεκμηρίωση. Συνεπώς, πραγματοποιήθηκε διαλογή με βάση το περιεχόμενο των μελετών, το οποίο αξιολογήθηκε χρησιμοποιώντας τα κριτήρια ποιότητας του Πίνακα 3.5. Η λογική διπλού σταδίου screening (διαλογής) είναι συμβατή με καθιερωμένες πρακτικές συστηματικών επισκοπήσεων (Kitchenham & Charters, 2007· Moher et al., 2009).

Πίνακας 3.4 – Κριτήρια αποδοχής και απόρριψης

Κατηγορία	Κριτήριο	Αιτιολόγηση
Αποδοχής	Δημοσίευση σε peer reviewed (αξιολόγησης από ομότιμους) περιοδικό ή συνέδριο	Εξασφάλιση ελάχιστου επιπέδου επιστημονικής αξιολόγησης
Αποδοχής	Ρητή σύνδεση BPM με Industry 4.0 ή με τεχνολογίες smart factory	Συνάφεια με το ερευνητικό πεδίο
Αποδοχής	Περίοδος δημοσίευσης 2017 – 2025	Επικέντρωση στη σύγχρονη φάση ωρίμανσης Industry 4.0 (Liao et al., 2017)
Απόρριψης	Μελέτες εκτός βιομηχανικού ή οργανωσιακού πλαισίου (όπως προκύπτει από τον τίτλο και την περίληψη)	Εστίαση σε εφαρμογή σε επιχειρησιακές διαδικασίες
Απόρριψης	Μη προσβάσιμο πλήρες κείμενο	Αδυναμία αξιολόγησης και εξαγωγής δεδομένων

Πίνακας 3.5 – Κριτήρια ποιοτικής αποτίμησης των μελετών

Κριτήριο ποιότητας	Περιγραφή και τρόπος αποτίμησης
Q1 Σαφήνεια ερευνητικού στόχου	Ελέγχεται αν ο στόχος και το ερευνητικό πρόβλημα περιγράφονται ρητά και συνεκτικά
Q2 Μεθοδολογική τεκμηρίωση	Ελέγχεται αν περιγράφεται ρητά η συνεισφορά της μελέτης (μέθοδος, μεθοδολογία, τεχνική, πρωτόκολλο ή αλγόριθμος), καθώς και τα σχετικά δεδομένα, και αν δικαιολογούνται επαρκώς οι μεθοδολογικές και τεχνολογικές επιλογές των ερευνητών
Q3 Αναπαραγωγιμότητα	Ελέγχεται αν παρέχονται επαρκείς λεπτομέρειες για επανάληψη ή αξιολόγηση της συνεισφοράς
Q4 Σύνδεση με BPM lifecycle	Ελέγχεται ποιο στάδιο του κύκλου ζωής BPM υποστηρίζει η προσέγγιση και με ποιο μηχανισμό

Q5 Τεκμηρίωση αποτελεσμάτων

Ελέγχεται αν εφαρμόζεται κάποια μέθοδος αξιολόγησης/επικύρωσης της συνεισφοράς, όπως δείκτης αξιολόγησης, μελέτη περίπτωσης, (case study), πείραμα ή συγκριτική ανάλυση

Q6 Περιορισμοί και απειλές εγκυρότητας

Ελέγχεται αν η μελέτη αναγνωρίζει περιορισμούς, προϋποθέσεις και απειλές (εγκυρότητας_

Κάθε μελέτη βαθμολογήθηκε, στη δεύτερη φάση της διαλογής (η οποία αφορά αποκλειστικά τα κριτήρια ποιότητας, σε αντίθεση με τα κριτήρια αποδοχής/απόρριψης της πρώτης φάσης που εφαρμόζονται με λογική 0/1), σε κλίμακα τριών επιπέδων, όπου το 0 αντιστοιχεί σε μη ικανοποιητική κάλυψη, το 1 σε μερική κάλυψη και το 2 σε πλήρη κάλυψη του κριτηρίου. Η συνολική βαθμολογία χρησιμοποιήθηκε ως φίλτρο ποιότητας, ώστε να αποκλειστούν μελέτες που δεν παρέχουν επαρκή βάση για συγκριτική σύνθεση. Η χρήση ποιοτικής λίστας ελέγχου (quality checklist) αποτελεί καθιερωμένη πρακτική σε συστηματικές επισκοπήσεις (Kitchenham & Charters, 2007· Dybå & Dingsøyr, 2008) για ενίσχυση της αξιοπιστίας.

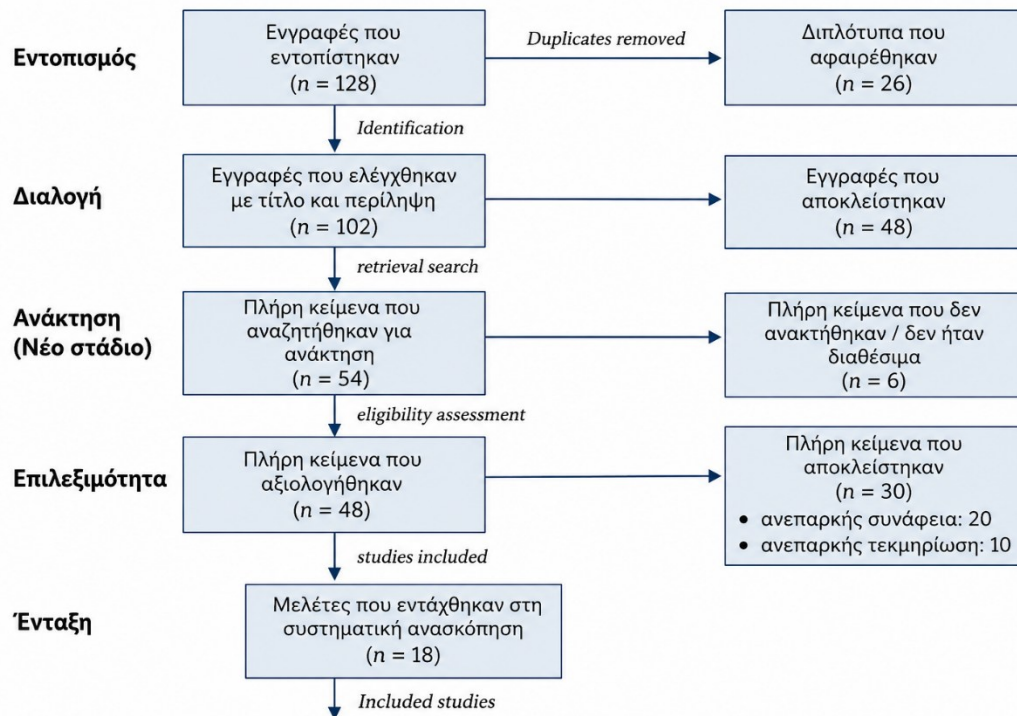
Πίνακας 3.6 – Φόρμα εξαγωγής δεδομένων ανά μελέτη

Πεδίο	Περιγραφή
Αναφορά	Συγγραφείς, έτος, τίτλος, πηγή, DOI
Στόχος μελέτης	Το πρόβλημα που επιχειρεί να αντιμετωπίσει και η εμβέλεια (scope)
Τεχνολογία Industry 4.0	κάλυψη σχετικών τεχνολογιών με Βιομηχανία 4.0 (IoT, AI, Big Data, Cloud, CPS, Digital Twins) (μίας από αυτές ή και συνδυασμό τους)
Στάδιο BPM lifecycle	Μοντελοποίηση, εκτέλεση, παρακολούθηση, βελτιστοποίηση
Μέθοδος	Είδος συνεισφοράς της μελέτης: αρχιτεκτονική, πλαίσιο, αλγόριθμος, process mining, case study ή πείραμα

<i>Δεδομένα</i>	Είδος δεδομένων: event logs, μετρήσεις αισθητήρων, δεδομένα από συστήματα λογισμικού (π.χ. ERP/MES), event logs, αισθητήρες, συστήματα ERP ή MES
<i>Αποτελέσματα</i>	Αποτελέσματα εφαρμογής, αξιολόγησης ή προσομοίωσης της μεθόδου: δείκτες απόδοσης, χρόνος, κόστος, ποιότητα, ακρίβεια, παραγωγικότητα
<i>Περιορισμοί</i>	Τεχνικοί και οργανωσιακοί περιορισμοί, απειλές εγκυρότητας

3.5 Ροή επιλογής και ποσοτική ανάλυση των πηγών

Η ροή εντοπισμού, διαλογής και ένταξης παρουσιάζεται σύμφωνα με το PRISMA 2020. Από 128 αρχικές εγγραφές αφαιρέθηκαν 26 διπλότυπα. Οι 102 μοναδικές εγγραφές ελέγχθηκαν με βάση τίτλο και περίληψη, από τις οποίες 48 αποκλείστηκαν. Στη συνέχεια, αναζητήθηκε το πλήρες κείμενο για 54 άρθρα (φάση ανάκτησης), από τα οποία 6 δεν κατέστη δυνατό να ανακτηθούν (μη διαθέσιμο πλήρες κείμενο). Αξιολογήθηκαν ως προς την επιλεξιμότητά τους 48 πλήρη κείμενα και αποκλείστηκαν 30 (20 λόγω ανεπαρκούς θεματικής συνάφειας και 10 λόγω ανεπαρκούς μεθοδολογικής τεκμηρίωσης). Το τελικό δείγμα περιλαμβάνει 18 πρωτογενείς μελέτες. Οι δευτερογενείς ανασκοπήσεις (review/survey papers) χρησιμοποιήθηκαν αποκλειστικά υποστηρικτικά για τη διαμόρφωση του θεωρητικού πλαισίου, την αναγνώριση βασικών θεματικών κατηγοριών και τον εντοπισμό επιπλέον πρωτογενών πηγών (snowballing). Συνεπώς, δεν περιλαμβάνονται στους ποσοτικούς υπολογισμούς του διαγράμματος PRISMA ούτε στην ανάλυση των 18 πρωτογενών μελετών (Page et al., 2021).

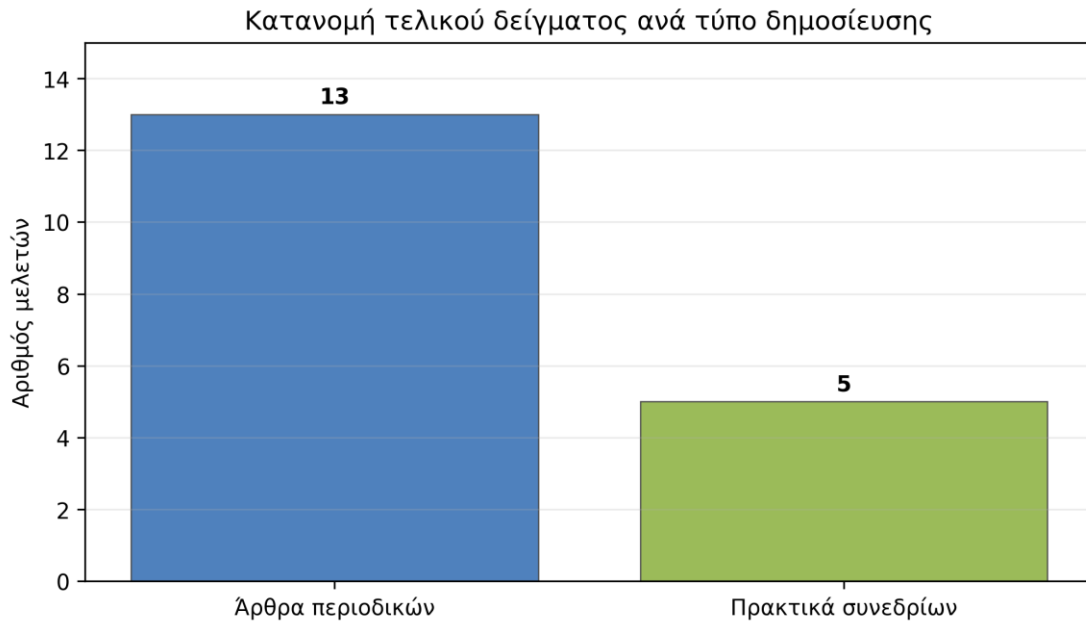


Εικόνα 3.1 – Διάγραμμα ροής PRISMA 2020 για τη διαδικασία επιλογής μελετών. Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει Page et al. (2021).

Πίνακας 3.7 – Σύνοψη αριθμών της διαδικασίας PRISMA 2020

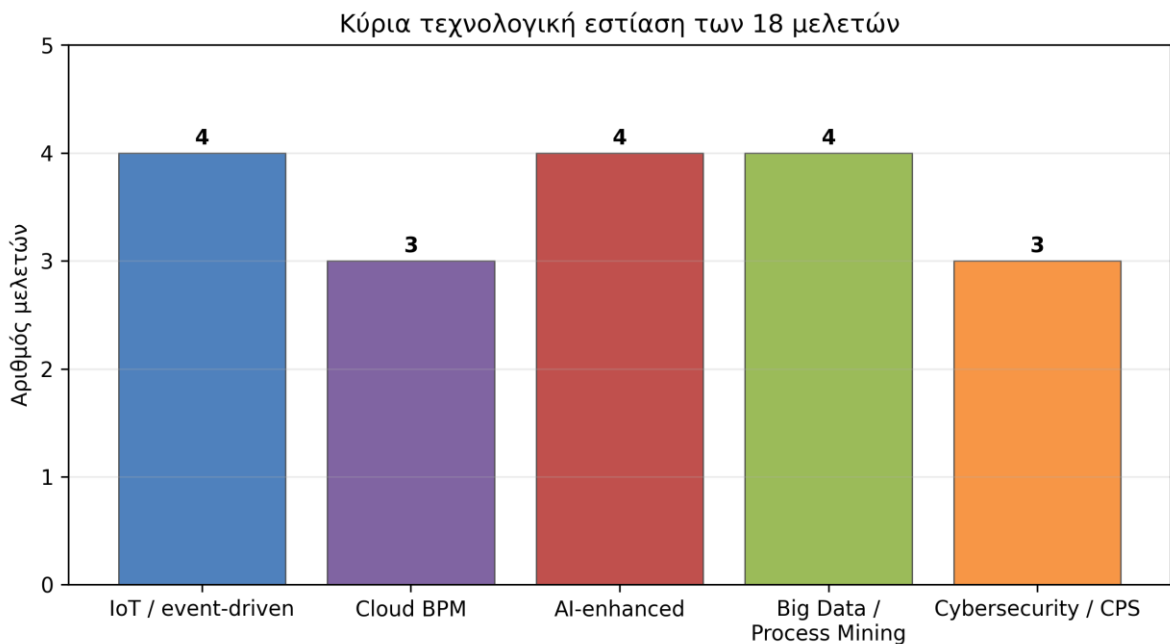
Βήμα	Πλήθος
Εγγραφές που εντοπίστηκαν	128
Διπλότυπα που αφαιρέθηκαν	26
Εγγραφές που ελέγχθηκαν με τίτλο και περίληψη	102
Εγγραφές που αποκλείστηκαν στο πρώτο στάδιο	48
Πλήρη κείμενα που αναζητήθηκαν προς ανάκτηση	54
Πλήρη κείμενα που δεν ήταν διαθέσιμα / δεν ανακτήθηκαν	6
Πλήρη κείμενα που αξιολογήθηκαν ως προς την επιλεξιμότητα	48
Πλήρη κείμενα που αποκλείστηκαν (λόγω συνάφειας/τεκμηρίωσης)	30
Μελέτες που εντάχθηκαν	18

Μετά την ολοκλήρωση της διαλογής κωδικοποιήθηκαν τρία βασικά χαρακτηριστικά του τελικού δείγματος: ο τύπος δημοσίευσης, η κύρια τεχνολογική εστίαση και το έτος δημοσίευσης. Για να διατηρηθεί παντού ο ίδιος παρονομαστής, κάθε μελέτη καταμετρήθηκε μία φορά σε κάθε διάγραμμα. Ειδικά στο Σχήμα 3.3, όπου αρκετές μελέτες συνδυάζουν περισσότερες τεχνολογίες, η ταξινόμηση έγινε με βάση την κυρίαρχη τεχνολογική συνεισφορά που δηλώνεται στον στόχο και στα αποτελέσματα της μελέτης. Οι πολυδιάστατες επικαλύψεις αναλύονται ποιοτικά στο Κεφάλαιο 4 και δεν οδηγούν σε διπλή καταμέτρηση.



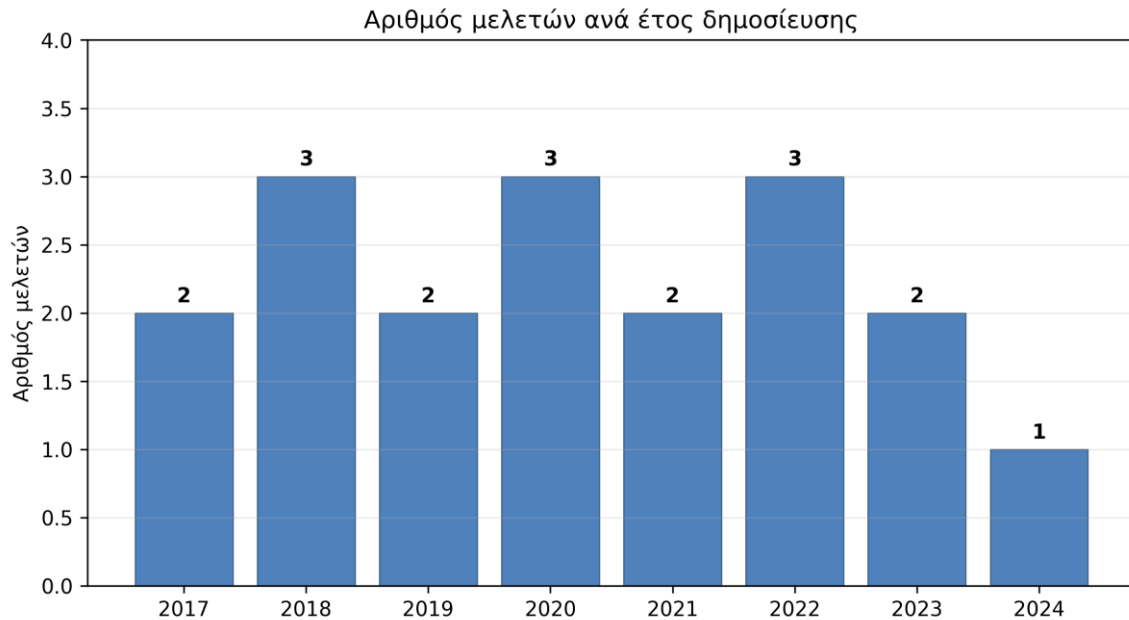
Εικόνα 3.2 – Κατανομή των 18 μελετών ανά τύπο δημοσίευσης. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

Το Σχήμα 3.2 δείχνει ότι 13 από τις 18 μελέτες (72%) δημοσιεύθηκαν σε επιστημονικά περιοδικά και 5 σε πρακτικά συνεδρίων (28%). Η υπεροχή των άρθρων περιοδικών υποδηλώνει ότι το πεδίο έχει περάσει από την αρχική φάση παρουσίασης πρωτοτύπων σε πιο αναλυτικές δημοσιεύσεις με εκτενέστερη τεκμηρίωση. Η παρουσία συνεδριακών εργασιών παραμένει ουσιαστική, επειδή τεχνολογίες όπως το IoT, η TN και τα CPS εξελίσσονται γρήγορα και συχνά παρουσιάζονται πρώτα σε τεχνικά συνέδρια πριν ωριμάσουν σε άρθρα περιοδικών.



Εικόνα 3.3 – Κύρια τεχνολογική εστίαση των 18 μελετών. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

Στο Σχήμα 3.3 οι κατηγορίες IoT/event-driven, AI-enhanced και Big Data/Process Mining περιλαμβάνουν από τέσσερις μελέτες έκαστης, ενώ οι κατηγορίες Cloud BPM και Cybersecurity/CPS τρεις. Η σχετικά ισόρροπη κατανομή δικαιολογεί τη διατήρηση πέντε διακριτών τεχνολογικών κατηγοριών στο Κεφάλαιο 4.



Σχήμα 3.4 – Αριθμός μελετών ανά έτος δημοσίευσης. Πηγή: Ιδία επεξεργασία.

Το Σχήμα 3.4 αποτυπώνει συνολικά 18 μελέτες. Η παραγωγή δεν ακολουθεί απόλυτα γραμμική αύξηση, αλλά εμφανίζει σταθερή παρουσία σε όλη την περίοδο 2017–2024, με μικρές κορυφώσεις το 2018, το 2020 και το 2022. Η εικόνα αυτή είναι συμβατή με τη σταδιακή μετάβαση από γενικές συζητήσεις για Industry 4.0 προς πιο εξειδικευμένες προσεγγίσεις BPM που εστιάζουν σε δεδομένα, αυτοματοποίηση, ασφάλεια και πραγματικό χρόνο. Η χαμηλότερη τιμή του 2024 δεν ερμηνεύεται ως υποχώρηση του ενδιαφέροντος, επειδή η αναζήτηση ολοκληρώθηκε πριν κλείσει πλήρως ο δημοσιευτικός κύκλος του έτους.

3.6 Περίληψη μεθοδολογίας

Συνοψίζοντας, η ανασκόπηση ακολούθησε προκαθορισμένο και αναπαραγώγιμο πρωτόκολλο: ερευνητικές ερωτήσεις, πολλαπλές βάσεις, δομημένες συμβολοσειρές αναζήτησης, δύο στάδια διαλογής, ποιοτική αποτίμηση και τυποποιημένη εξαγωγή δεδομένων. Το τελικό δείγμα αποτελείται από 18 πρωτογενείς μελέτες, ενώ οι ανασκοπήσεις χρησιμοποιήθηκαν μόνο υποστηρικτικά. Η ενιαία αριθμητική βάση των

18 μελετών διατηρείται στο PRISMA, στους πίνακες και σε όλα τα διαγράμματα της ποσοτικής ανάλυσης.

Η μεθοδολογική προσέγγιση που ακολουθήθηκε οδήγησε σε συνεπή και αξιόπιστα αποτελέσματα που επιτρέπουν, στο επόμενο κεφάλαιο, να πραγματοποιηθεί συστηματική κατηγοριοποίηση και ανάλυση των επιλεγμένων προσεγγίσεων, με στόχο την κριτική σύνθεση, τη συγκριτική αξιολόγηση και την ανάδειξη ερευνητικών κενών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΑΙ ΚΑΤΗΓΟΡΙΟΠΟΙΗΣΗ

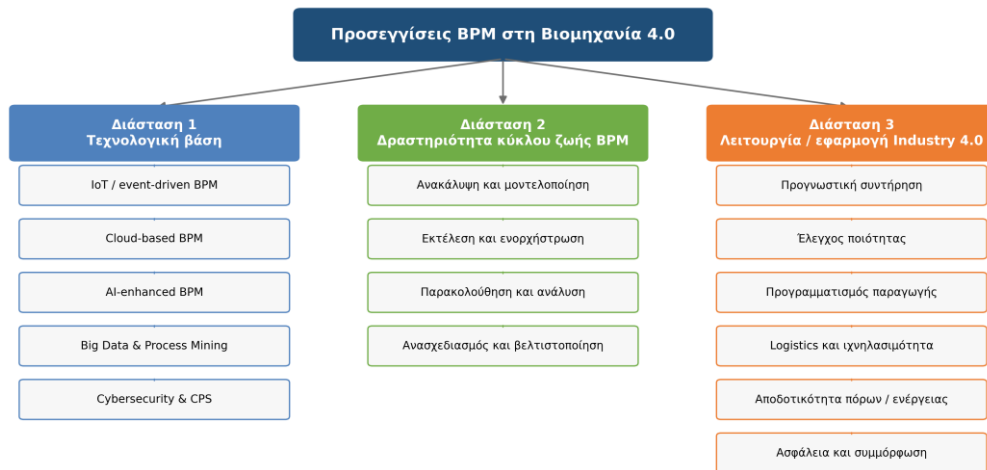
Το Κεφάλαιο 4 μετατρέπει τα ευρήματα της συστηματικής επισκόπησης σε ένα συνεκτικό σχήμα κατηγοριοποίησης, ώστε οι προσεγγίσεις BPM να παρουσιαστούν με τρόπο συγκρίσιμο και λειτουργικό για περιβάλλοντα Βιομηχανίας 4.0. Η ανάλυση οργανώνεται με άξονα τις τεχνολογικές συνιστώσες που επηρεάζουν άμεσα τον κύκλο ζωής της BPM, τη ροή δεδομένων και την εκτελεσιμότητα των διαδικασιών, με έμφαση στη διαλειτουργικότητα και την ασφάλεια (van der Aalst, 2016· Dumas et al., 2018· Mendling et al., 2020). Ειδικότερα, το κεφάλαιο οργανώνεται ως εξής: αρχικά (Ενότητα 4.1) παρουσιάζεται το ιεραρχικό δέντρο κατηγοριοποίησης (taxonomy) των προσεγγίσεων· στη συνέχεια αναλύονται διαδοχικά οι πέντε τεχνολογικές περιοχές, δηλαδή η BPM σε περιβάλλον IoT (4.2), σε περιβάλλον Cloud (4.3), σε συνδυασμό με Τεχνητή Νοημοσύνη (4.4), με ανάλυση Μεγάλων Δεδομένων (4.5) και με Κυβερνοασφάλεια/CPS (4.6)· τέλος (Ενότητα 4.7) παρατίθεται συνοπτική αποτίμηση των ευρημάτων. Σημειώνεται ότι η συγκριτική αξιολόγηση των προσεγγίσεων πραγματοποιείται στο Κεφάλαιο 5.

4.1 Τρισδιάστατο ιεραρχικό δέντρο κατηγοριοποίησης

Η κατηγοριοποίηση οργανώνεται σε τρεις ανεξάρτητες και συμπληρωματικές διαστάσεις. Η πρώτη διάσταση περιγράφει την κύρια τεχνολογική βάση της προσέγγισης. Η δεύτερη αποτυπώνει τη δραστηριότητα του κύκλου ζωής BPM στην οποία δίνεται η μεγαλύτερη έμφαση: ανακάλυψη και μοντελοποίηση, εκτέλεση και ενορχήστρωση, παρακολούθηση και ανάλυση ή ανασχεδιασμός και βελτιστοποίηση. Η τρίτη διάσταση αφορά την επιχειρησιακή λειτουργία ή εφαρμογή στη Βιομηχανία 4.0, όπως προγνωστική συντήρηση, έλεγχος ποιότητας, προγραμματισμός παραγωγής, logistics και ιχνηλασιμότητα, αποδοτικότητα πόρων ή ασφάλεια και συμμόρφωση. Οι διαστάσεις είναι ορθογώνιες: μία μελέτη μπορεί να συνδυάζει μία ή περισσότερες τεχνολογικές βάσεις, να υποστηρίζει περισσότερες δραστηριότητες BPM και να εφαρμόζεται σε διαφορετικές λειτουργίες σχετικές με την Βιομηχανία 4.0.

Στην τεχνολογική διάσταση οι πέντε κατηγορίες τοποθετούνται στο ίδιο επίπεδο: IoT/event-driven BPM, Cloud-based BPM, AI-enhanced BPM, Big Data και Process

Mining, καθώς και Cybersecurity και CPS. Το υπολογιστικό νέφος μπορεί να φιλοξενεί άλλα είδη (προσεγγίσεων) BPM (π.χ. AI-enhanced BPM ή Big Data & Process Mining), αλλά αυτό δεν δημιουργεί εννοιολογική σχέση υπερκατηγορίας και υποκατηγορίας. Για παράδειγμα το Big Data & Process Mining μπορεί να εκτελείται σε τοπικές, υβριδικές ή νεφοκεντρικές υποδομές. Για τον λόγο αυτό όλες οι τεχνολογικές κατηγορίες παρουσιάζονται ως ισότιμοι κλάδοι του δέντρου.



Οι τρεις διαστάσεις είναι ανεξάρτητες και συνδυάζονται για την περιγραφή κάθε μελέτης· δεν υποδηλώνουν σχέση υπερκατηγορίας-υποκατηγορίας μεταξύ τεχνολογιών.

Εικόνα 4.1 – Τρισδιάστατο ιεραρχικό δέντρο κατηγοριοποίησης των προσεγγίσεων BPM στη Βιομηχανία 4.0. Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει της σύνθεσης των επιλεγμένων μελετών.

Για την πλήρη τεκμηρίωση της τεχνολογικής κατανομής και τη δικαιολόγηση της κατηγοριοποίησης, ο Πίνακας 4.1 παρουσιάζει αναλυτικά τις 18 επιλεγμένες προσεγγίσεις της συστηματικής ανασκόπησης, χαρτογραφημένες ως προς τη βασική και τις επιμέρους τεχνολογικές βάσεις, τις δραστηριότητες του κύκλου ζωής BPM και τις λειτουργίες Industry 4.0.

Πίνακας 4.1 – Αναλυτική τεχνολογική κατανομή των 18 επιλεγμένων προσεγγίσεων.

	Μελέτη / Πηγή	(α) Βασική Τεχνολογική Βάση	(β) Επιμέρους Τεχνολογικές Βάσεις	(γ) Δραστηριότητες Κύκλου Ζωής BPM	(δ) Λειτουργίες / Εφαρμογές Industry 4.0
1	Liakos et al. (2022)	IoT / event-driven	AI, Cloud	Εκτέλεση, Παρακολούθηση	Προγνωστική συντήρηση
2	Panagopoulos et al. (2022)	IoT / event-driven	Cloud, Big Data	Εκτέλεση, Παρακολούθηση	Logistics & ιχνηλασιμότητα
3	Dumas et al. (2018)	IoT / event-driven	-	Σχεδιασμός, Εκτέλεση	Μοντελοποίηση διεργασιών παραγωγής
4	Kusiak (2018)	IoT / event-driven	AI	Παρακολούθηση, Βελτιστοποίηση	Εξυπνη παραγωγή & αυτοματοποίηση
5	Tupa & Steiner (2019)	Cloud-based	IoT	Εκτέλεση, Συνεργασία	Απομακρυσμένη λειτουργία & εφοδιαστική αλυσίδα
6	Stjepić et al. (2020)	Cloud-based	Big Data	Εκτέλεση, Δια-οργανωσιακή ροή	Κλιμάκωση βιομηχανικών ροών
7	Gilchrist (2016)	Cloud-based	CPS	Εκτέλεση, Συνεργασία	Εντοπισμός & διαχείριση πόρων
8	Monostori et al. (2016)	Cloud-based	CPS, Cybersecurity	Εκτέλεση, Παρακολούθηση	Cyber-Physical Production Systems (CPPS)
9	Mendling et al. (2020)	AI-enhanced	Process Mining	Παρακολούθηση, Βελτιστοποίηση	Προγραμματισμός παραγωγής & λήψη αποφάσεων
10	Czvetkó et al. (2023)	AI-enhanced	Big Data, IoT	Παρακολούθηση, Βελτιστοποίηση	Έλεγχος ποιότητας & πρόβλεψη βλαβών
11	Russell & Norvig (2021)	AI-enhanced	-	Βελτιστοποίηση / Υποστήριξη αποφάσεων	Αυτόματη λήψη αποφάσεων στη ροή
12	Marrella et al. (2023)	Big Data & Process Mining	AI	Ανακάλυψη, Compliance	Εντοπισμός στενωσιών (bottlenecks)
13	Lee et al. (2018)	Big Data & Process Mining	IoT	Ανακάλυψη, Ανάλυση	Ανάλυση KPIs & αποκλίσεων διεργασιών
14	Tao et al. (2019)	Big Data & Process Mining	Cloud, Digital Twin	Ανακάλυψη, Ανασχεδιασμός	Βελτιστοποίηση παραγωγικού κύκλου
15	Fernández-Caramés & Fraga-Lamas (2018)	Cybersecurity & CPS	IoT, Cloud	Εκτέλεση, Παρακολούθηση	Ασφάλεια κρίσιμων βιομηχανικών υποδομών
16	Kamble et al. (2018)	Cybersecurity & CPS	IoT	Εκτέλεση, Compliance	Ασφάλης αυτοματοποίησης & έλεγχος πρόσβασης
17	Brocke & Rosemann (2015)	Cybersecurity & CPS	Cloud	Διακυβέρνηση, Παρακολούθηση	Ασφάλεια & Audit trails σε BPM
18	AWS (n.d.)	Cybersecurity & CPS	Cloud, Automation	Εκτέλεση, Παρακολούθηση	Αυτοματοποιημένη απόκριση σε συμβάντα

Ο Πίνακας 4.2 δείχνει πώς οι τρεις διαστάσεις συσχετίζονται χωρίς να συγχέονται. Η στήλη της τεχνολογικής βάσης περιγράφει το μέσο ή τον μηχανισμό που χρησιμοποιείται. Η στήλη του κύκλου ζωής αποτυπώνει τις δραστηριότητες που ενισχύονται συχνότερα, χωρίς να αποκλείει συμμετοχή σε άλλες δραστηριότητες. Η τελευταία στήλη περιλαμβάνει πραγματικές λειτουργίες και εφαρμογές της Βιομηχανίας 4.0 και όχι τεχνικά συστατικά, όπως αισθητήρες, αλγόριθμοι ή brokers.

Πίνακας 4.2 – Συσχέτιση των τριών διαστάσεων κατηγοριοποίησης

Τεχνολογική βάση	Συχνότερες δραστηριότητες κύκλου ζωής BPM	Ενδεικτικές λειτουργίες / εφαρμογές Industry 4.0	Ενδεικτική τεκμηρίωση
<i>IoT / event-driven BPM</i>	Εκτέλεση & παρακολούθηση	Προγνωστική συντήρηση, Logistics & ιχνηλασιμότητα	Liakos et al. (2022)· Panagopoulos et al. (2022)
<i>Cloud-based BPM</i>	Εκτέλεση & Συνεργασία/ Διαοργανική ροή	Κλιμάκωση ροών, απομακρυσμένη λειτουργία, διαχείριση εφοδιαστικής αλυσίδας	Tupa & Steiner (2019)· Stjepić et al. (2020)
<i>AI-enhanced BPM</i>	Παρακολούθηση & Βελτιστοποίηση/ Υποστήριξη αποφάσεων	Προγραμματισμός παραγωγής, έλεγχος ποιότητας,	Mendling et al. (2020)· Czvetkó et al. (2023)
<i>Big Data & Process Mining</i>	Ανακάλυψη & έλεγχος συμμόρφωσης (Compliance)	Εντοπισμός στενώσεων(bottlenecks) ανάλυση KPIs & αποκλίσεων	Marrella et al. (2023)· Czvetkó et al. (2023)
<i>Cybersecurity & CPS</i>	Εκτέλεση & παρακολούθηση (υπό περιορισμούς ασφάλειας)	Ασφαλής αυτοματοποίηση, έλεγχος πρόσβασης προστασία κρίσιμων λειτουργιών	Fernández-Caramés & Fraga-Lamas (2018)· Kamble et al. (2018)

Η κατηγοριοποίηση είναι πολυετικετική σε επίπεδο μελέτης. Για παράδειγμα, μια προσέγγιση μπορεί να χρησιμοποιεί ταυτόχρονα IoT και AI, να υποστηρίζει εκτέλεση και βελτιστοποίηση και να εφαρμόζεται στην προγνωστική συντήρηση. Στην ποσοτική ανάλυση του Σχήματος 3.3 χρησιμοποιήθηκε μόνο η κυρίαρχη τεχνολογική εστίαση ώστε το άθροισμα να παραμένει 18, ενώ στο παρόν κεφάλαιο οι επικαλύψεις διατηρούνται και αναλύονται ποιοτικά.

4.2 BPM σε περιβάλλον IoT

Σε περιβάλλον IoT, οι διαδικασίες δεν “τρέχουν” μόνο από ανθρώπους ή επιχειρησιακά συστήματα, αλλά πυροδοτούνται και από γεγονότα του φυσικού κόσμου, όπως μετρήσεις αισθητήρων, σήματα κατάστασης μηχανών ή συναγερμούς (alarms). Αυτό μετακινεί την BPM προς event-driven (οδηγούμενη από γεγονότα) λογική, όπου η σχεδίαση των διαδικασιών οφείλει να υποστηρίζει υψηλή συχνότητα συμβάντων, αβεβαιότητα και αυστηρούς χρονικούς περιορισμούς που δεν χωρούν σε κλασικές ροές γραφείου. Η υψηλή συχνότητα συμβάντων επιβάλλει ασύγχρονη επεξεργασία και μηχανισμούς φιλτραρίσματος/συγκερασμού γεγονότων (event aggregation), ώστε να μην υπερφορτώνεται η ροή· αντίστοιχα, η αβεβαιότητα (π.χ. ελλειπείς ή θορυβώδεις μετρήσεις) απαιτεί σχεδίαση με εναλλακτικές διαδρομές, χειρισμό εξαιρέσεων και κανόνες ανοχής σφαλμάτων (Atzori et al., 2010· Monostori et al., 2016).

Πρακτικά, οι IoT ροές αρχιτεκτονικά απαιτούν: α) επίπεδο συλλογής και μετάδοσης δεδομένων (sensing–connectivity), β) επίπεδο επεξεργασίας σε πραγματικό χρόνο (complex event processing ή stream analytics), και γ) σύνδεση με BPMS/workflow engine ώστε ένα γεγονός να μεταφράζεται σε ενέργειες, όπως ειδοποίηση, αίτημα συντήρησης ή αλλαγή παραμέτρων παραγωγής. Τα χαρακτηριστικά αυτά συνοψίζονται στον ακόλουθο Πίνακα 4.3, ο οποίος προκύπτει από τη σύνθεση των ευρημάτων της επιλεγμένης βιβλιογραφίας για τις IoT-aware προσεγγίσεις BPM (π.χ., Liakos et al., 2022· Panagopoulos et al., 2022· Kusiak, 2018). Οι διαστάσεις του πίνακα αντιστοιχούν στα θεμελιώδη στάδια του κύκλου ζωής BPM (Εκτέλεση, Παρακολούθηση, Ανασχεδιασμός & Βελτιστοποίηση), αποτυπώνοντας πώς το IoT μεταβάλλει καθένα από αυτά. Ειδικότερα, η πυροδότηση (triggering) και ο χρονισμός (timing) διευκρινίζεται ότι αποτελούν δομικούς μηχανισμούς που εμπίπτουν στη δραστηριότητα της Εκτέλεσης, καθώς καθορίζουν την αυτόματη έναρξη και το συγχρονισμό των ροών. Η προληπτική/προγνωστική συντήρηση αποτελεί

χαρακτηριστικό παράδειγμα, όπου οι διαδικασίες συντήρησης «κουμπώνουν» πάνω σε δεδομένα δονήσεων/θερμοκρασίας, ενεργοποιούν αυτόματα tickets και δεσμεύσεις ανταλλακτικών κατά την εκτέλεση, οδηγώντας τελικά στον ανασχεδιασμό και τη βελτιστοποίηση των προγραμματισμένων παραθύρων διακοπής λειτουργίας (maintenance windows).

Πίνακας 4.3 – Επίδραση του IoT στις δραστηριότητες του κύκλου ζωής BPM

Διάσταση (Στάδιο BPM)	BPM σε IoT – τι αλλάζει	Ενδεικτικές τεχνικές/πρακτικές
Εκτέλεση: Triggering (Πυροδότηση)	Από ανθρώπινα γεγονότα σε γεγονότα παραγόμενα από μηχανές (machine events), machine events	Event gateways, message brokers, rules
Εκτέλεση: Timing (Χρονισμός)	Αυστηροί χρονικοί περιορισμοί (strict timing constraints)	SLA-aware workflows, edge processing
Παρακολούθηση: Observability (Παρατηρησιμότητα)	Συνεχής παρακολούθηση κατάστασης (continuous state monitoring)	Streaming dashboards, KPIs,
Ανασχεδιασμός & Βελτιστοποίηση (Redesign & Optimization)	Δυναμική αλλαγή ροών (dynamic flow reconfiguration)	Dynamic binding, runtime policies

4.3 BPM σε περιβάλλον Cloud

Το YN αλλάζει κυρίως το “πώς” εκτελείται και κλιμακώνεται μια διαδικασία. Ένα cloud-based (βασιζόμενο στο νέφος) BPMS μπορεί να λειτουργήσει ως υπηρεσία λογισμικού (SaaS) ή ως cloud-native (εγγενής ως προς το YN) πλατφόρμα, αξιοποιώντας ελαστικότητα πόρων, αυτοματοποιημένη κλιμάκωση και ανθεκτικότητα σε σφάλματα. Αυτό είναι κρίσιμο σε διαδικασίες με αιχμές φορτίου (π.χ. μαζικές παραγγελίες, βιομηχανικά alerts) ή σε δια-οργανωσιακές ροές που απαιτούν ασφαλή

ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ πολλών συστημάτων (Buyya et al., 2009). Στην πράξη διακρίνονται τρία βασικά μοντέλα διάθεσης της BPM στο νέφος, τα οποία αναλύονται και στον συνοδευτικό πίνακα. Πρώτον, τα SaaS BPMS, δηλαδή κλασικά συστήματα BPM που έχουν μεταφερθεί στο νέφος και προσφέρονται ως υπηρεσία λογισμικού (διαφέρουν από το καθαρό PaaS, καθώς ο χρήστης λαμβάνει έτοιμη εφαρμογή και όχι απλώς πλατφόρμα ανάπτυξης). Ειδική κατηγορία εντός των Συστήματα Διαχείρισης Επιχειρησιακών Διαδικασιών ως Υπηρεσία Λογισμικού (SaaS BPMS) αποτελούν οι πλατφόρμες low-code BPM, οι οποίες προσφέρονται επίσης στο νέφος και επιτρέπουν την ταχεία ανάπτυξη ροών/διαδικασιών με ελάχιστο κώδικα.

Δεύτερον, οι cloud-native engines, δηλαδή συνιστώσες των BPMS που επιτρέπουν την εκτέλεση ροών εργασίας σε κατανεμημένα, εγγενώς cloud περιβάλλοντα (π.χ. με μικρο-υπηρεσίες και δοχεία/containers). Τρίτον, η serverless orchestration (ενορχήστρωση λειτουργικότητας χωρίς διακομιστές), δηλαδή ελαφριές (lightweight) πλατφόρμες που ορίζουν και εκτελούν ροές εργασίας αποτελούμενες κυρίως από serverless functions· ως serverless computing νοείται το μοντέλο όπου ο πάροχος του νέφους διαχειρίζεται αυτόματα την υποδομή και ο κώδικας εκτελείται κατ' απαίτηση, χωρίς ο χρήστης να διαχειρίζεται διακομιστές.

Πίνακας 4.4 – Μοντέλα διάθεσης BPMS στο υπολογιστικό νέφος

Μοντέλο διάθεσης στο νέφος	Πλεονεκτήματα	Κίνδυνοι/Περιορισμοί	Ενδεικτικά παραδείγματα
SaaS BPMS	Γρήγορη υιοθέτηση (έτοιμη, πανταχού παρούσα πρόσβαση σε BPMS χωρίς εγκατάσταση), λιγότερη συντήρηση	Εξάρτηση από τον πάροχο (vendor lock-in) του BPMS, περιορισμένη παραμετροποίηση	Low-code suites (σουίτες)
Cloud-native engine	Κλιμάκωση κατ' απαίτηση και ανθεκτικότητα μέσω	Ανάγκη ωριμότητας DevOps και επαρκούς τεχνικής	BPMN engines σε Kubernetes

	αρχιτεκτονικής μικρο-υπηρεσιών (microservices)	γνώσης (π.χ. για την ανάπτυξη μικρο- υπηρεσιών και τη διαχείριση τεχνολογιών, όπως το Kubernetes)	
Serverless orchestration	Ελαχιστοποίηση υποδομών	Μειωμένη διαφάνεια σε πολύπλοκες ροές (λόγω κατανομής της εκτέλεσης σε πολλές serverless συναρτήσεις, το οποίο δυσχεραίνει την παρακολούθηση από άκρο σε άκρο)	AWS Step Functions

4.4 BPM και AI

Η Τεχνητή Νοημοσύνη μετακινεί το BPM από “κανόνες και ροές” σε διαδικασίες που προβλέπουν, προτείνουν και μαθαίνουν. Στο επίπεδο λειτουργίας, αυτό σημαίνει ότι αποφάσεις εντός της διαδικασίας (π.χ. δρομολόγηση εργασίας, έγκριση, προτεραιοποίηση) δεν βασίζονται μόνο σε στατικούς κανόνες, αλλά και σε μοντέλα μηχανικής μάθησης που αξιοποιούν ιστορικά logs (καταχωρήσεων). Η αξιοποίηση AI σε BPM εμφανίζεται συνήθως με τις εξής μορφές: α) prediction (πρόβλεψη καθυστερήσεων/κινδύνων), β) recommendation (πρόταση επόμενης ενέργειας), γ) automation (αυτόματη εκτέλεση ενεργειών), και δ) optimization (αναζήτηση καλύτερης ρύθμισης πόρων) (Russell & Norvig, 2021 · Mendling et al., 2020).

Ο ακόλουθος πίνακας εστιάζει στις τρεις πιο αντιπροσωπευτικές μορφές αξιοποίησης (predictive, prescriptive και anomaly detection), ενώ η αυτοματοποίηση (automation) και η βελτιστοποίηση (optimization) διατρέχουν εγκάρσια και τις τρεις, καθώς αποτελούν τρόπους αξιοποίησης των αποτελεσμάτων τους εντός της ροής.

Σε κάθε περίπτωση, η τελική επιλογή της ενέργειας προς εκτέλεση, ανάμεσα σε πολλές προτάσεις που μπορεί να παράγει το μοντέλο, παραμένει είτε στον αρμόδιο ανθρώπινο χειριστή (human-in-the-loop) είτε σε έναν ρητά ορισμένο κανόνα απόφασης της διαδικασίας, ώστε να διατηρείται η λογοδοσία. Το κρίσιμο σημείο εδώ είναι η διακυβέρνηση (governance): τα μοντέλα AI πρέπει να είναι ελέγξιμα, να ανανεώνονται, και να μην παράγουν αποφάσεις που παραβιάζουν πολιτικές ποιότητας ή ισότητας. Σε βιομηχανικό περιβάλλον, αυτό μεταφράζεται σε ανάγκη για ανθρώπινη επίβλεψη, audit trails και συνδυασμό AI με κανόνες ασφαλείας, ώστε η διαδικασία να παραμένει αξιόπιστη ακόμη και όταν “μαθαίνει” από δεδομένα. Παράλληλα, πρέπει να εξασφαλίζεται η ποιότητα των δεδομένων, καθώς αυτή οδηγεί σε υψηλότερη ακρίβεια (π.χ. πρόβλεψης), ενώ απαιτούνται και ισχυρές υπολογιστικές υποδομές, όπως το υπολογιστικό νέφος, για την εκπαίδευση και την εκτέλεση (serving) των αξιοποιήσιμων μοντέλων μηχανικής μάθησης (Brocke & Rosemann, 2015).

Πίνακας 4.5 – Κύριες μορφές αξιοποίησης Τεχνητής Νοημοσύνης στη BPM

<i>Χρήση AI</i>	<i>Στόχος</i>	<i>Δεδομένα εισόδου</i>	<i>Έξοδος προς BPM</i>
<i>Predictive</i>	Πρόβλεψη downtime/καθυστερήσεων	Sensor streams, monitoring history, event logs	Alerts, ανάγκη για rescheduling
<i>Prescriptive</i>	Πρόταση ενεργειών βελτιστοποίησης / δυναμική προσαρμογή ροής (process adaptation)	KPIs/SLAs, business rules, ιστορικό αποφάσεων	Next-best-action
<i>Anomaly detection</i>	Εντοπισμός αποκλίσεων (π.χ. ασυνήθιστη διάρκεια βήματος, εκτροπές τιμών αισθητήρων,	Quality metrics, sensor data, event logs, machine data	Quality hold (παύση/δέσμευση παρτίδας για έλεγχο ποιότητας) και rework flow (ροή επανεπεξεργασίας/

παραβίαση σειράς εκτέλεσης)		διόρθωσης ελαττωματικών)
--------------------------------	--	-----------------------------

4.5 BPM και Big Data Analytics

Η ανάλυση μεγάλων δεδομένων στηρίζει την BPM κυρίως σε δύο επίπεδα: πρώτον, στην κατανόηση του “τι πραγματικά συμβαίνει” μέσα από logs (process mining), και δεύτερον, στη σύνδεση της λειτουργίας με την επιχειρησιακή αξία μέσω KPIs και αναλυτικών μοντέλων. Αντίστοιχα με το process mining, και αυτό το δεύτερο επίπεδο (το οποίο αποτελείται από δύο είδη αναλυτικής όπως φαίνεται στον Πίνακα 4.5) επιτελεί τρεις βασικές λειτουργίες: παρακολούθηση (συνεχής μέτρηση δεικτών απόδοσης), πρόβλεψη (forecasting μελλοντικών τιμών KPIs και πιθανών παραβιάσεων SLA) και υποστήριξη αποφάσεων (σύνδεση των μετρήσεων με ενέργειες βελτίωσης). Η μετάβαση προς data-driven BPM ενισχύθηκε ιδιαίτερα στη Βιομηχανία 4.0, όπου κάθε στάδιο παραγωγής αφήνει ψηφιακό αποτύπωμα σε ρυθμούς που ξεπερνούν τις παραδοσιακές μεθόδους reporting (Wamba et al., 2017; van der Aalst, 2016).

Το process mining επιτρέπει τέσσερις βασικές λειτουργίες: discovery (ανακάλυψη μοντέλου από δεδομένα), conformance checking (έλεγχος απόκλισης από το επιθυμητό μοντέλο), enhancement (βελτίωση μοντέλου με βάση bottlenecks και variances) και root cause analysis (ανάλυση ριζικών αιτιών των αποκλίσεων). Σε παραγωγικά περιβάλλοντα, ο συνδυασμός process mining με streaming analytics ανοίγει τον δρόμο για near-real-time έλεγχο ροών, όπου οι αποκλίσεις δεν “φαίνονται” σε εβδομάδες μετά αλλά στο ίδιο το παράθυρο λειτουργίας (van der Aalst, 2016).

Πίνακας 4.6 – Επίπεδα αναλυτικής δεδομένων και σύνδεσή τους με τη BPM

Τεχνική	Τι προσφέρει στο BPM	Ενδεικτικό αποτέλεσμα
<i>Process mining</i>	Αντικειμενική χαρτογράφηση ροής	Εντοπισμός bottlenecks, conformance checking, model discovery
<i>Streaming analytics</i>	Έγκαιρη ανίχνευση τάσεων ή deviations	Alerts πριν από αστοχία, έγκαιρη ανίχνευση τάσεων, αυτόματη κλιμάκωση πόρων

<i>KPIs & αναλυτικά μοντέλα (predictive analytics)</i>	Σύνδεση λειτουργίας με πρόβλεψη	Πρόβλεψη (προβλεπόμενης) επιχειρησιακής αξίας (π.χ. ικανοποίηση πελάτη) και εντοπισμός πιθανών παραβιάσεων KPI/SLA (forecast SLA breaches)
--	---------------------------------	--

4.6 BPM και Cybersecurity / CPS

Όσο οι διαδικασίες συνδέονται με CPS και αυτοματοποιημένες ενέργειες, η ασφάλεια παύει να είναι “IT ζήτημα” και γίνεται ιδιότητα της ίδιας της διαδικασίας. Η αλληλουχία ενεργειών (ποιος κάνει τι, πότε και με ποια δικαιώματα) αποτελεί επιφάνεια επίθεσης. Αυτό σημαίνει ότι η μοντελοποίηση οφείλει να ενσωματώνει security-by-design χαρακτηριστικά: ρόλους, δικαιώματα, ισχυρή αυθεντικοποίηση, καταγραφή ενεργειών και πολιτικές πρόσβασης στα δεδομένα, ειδικά όταν τα δεδομένα προέρχονται από αισθητήρες ή αφορούν κρίσιμες υποδομές (Fernández-Caramés & Fraga-Lamas, 2018; Monostori et al., 2016).

Στην πράξη, η ασφαλής εκτέλεση BPM σε smart factories απαιτεί συνδυασμό: α) Identity & Access Management, β) segmentation μεταξύ IT/OT δικτύων, όπου με OT (Operational Technology, Τεχνολογία Λειτουργιών) εννοούμε το υλικό και λογισμικό που παρακολουθεί και ελέγχει φυσικές συσκευές και διεργασίες παραγωγής (π.χ. PLC, SCADA), σε αντιδιαστολή με το IT (Information Technology, Τεχνολογία Πληροφοριών) που διαχειρίζεται δεδομένα και πληροφοριακά συστήματα· η διάκριση είναι κρίσιμη επειδή τα δίκτυα OT έχουν διαφορετικές απαιτήσεις διαθεσιμότητας και ασφάλειας, με στόχο την καλύτερη απομόνωση και τον περιορισμό της εξάπλωσης ενός συμβάντος (network segmentation), γ) ασφαλή APIs, ασφαλή πρωτόκολλα επικοινωνίας (secure protocols, π.χ. TLS) και υποδομές μηνυματοδότησης (messaging infrastructures), και δ) πολιτικές ανθεκτικότητας (resilience) για συνέχιση λειτουργίας σε περίπτωση συμβάντος. (Fernández-Caramés & Fraga-Lamas, 2018· Monostori et al., 2016). Επιπλέον, οι διαδικασίες incident response (απόκρισης συμβάντων) μπορούν να μοντελοποιηθούν ως workflows (ροές εργασίας) ώστε να επιβάλλεται τυποποιημένη απόκριση (π.χ. απομόνωση μηχανής, ειδοποίηση υπευθύνων, έλεγχος

επιπτώσεων) ανάλογα με την περίπτωση/συμβάν ασφαλείας με πλήρες audit trail (AWS, n.d.).

Πίνακας 4.7 – Απειλές, επιπτώσεις στις διαδικασίες και μέτρα αντιμετώπισης

<i>Απειλή/Κίνδυνος</i>	<i>Πού “χτυπά” στο BPM</i>	<i>Μέτρο αντιμετώπισης</i>
<i>Ανεξέλεγκτη πρόσβαση</i>	Tasks/approvals/APIs	RBAC, MFA, least privilege principle
<i>Παραποίηση δεδομένων αισθητήρων</i>	Triggers και KPIs	Data validation, anomaly detection, signed messages
<i>Ransomware/διακοπή λειτουργίας</i>	Οπουδήποτε στο σύστημα — ακόμη και σε ολόκληρο το BPMS, όχι μόνο στην υποδομή εκτέλεσης (execution layer)· δυνητικά σταματά τα πάντα	Backups, segmentation, failover
<i>Supply-chain risk</i>	Connectors/3rd-party services	Security assessment, penetration testing, patch management (π.χ. ενημέρωση connector), αντικατάσταση υπηρεσίας (service replacement) σε περίπτωση compromise, vendor assessment, SBOM, monitoring

4.7 Συνοπτική αποτίμηση

Συνολικά, η τρισδιάστατη ταξινόμηση δείχνει ότι οι τεχνολογίες δεν αποτελούν διαδοχικά επίπεδα μιας ενιαίας υποδομής αλλά ανεξάρτητες βάσεις που μπορούν να συνδυαστούν. Το IoT και τα CPS συνδέουν τη διαδικασία με γεγονότα του φυσικού κόσμου, το Cloud υποστηρίζει ελαστική εκτέλεση, η TN ενισχύει την πρόβλεψη και τη λήψη αποφάσεων, το Big Data και το Process Mining τεκμηριώνουν την πραγματική συμπεριφορά των διαδικασιών, ενώ η κυβερνοασφάλεια θέτει κανόνες αξιοπιστίας και συμμόρφωσης. Η κάλυψη των δραστηριοτήτων του κύκλου ζωής και των εφαρμογών διαφέρει ανά προσέγγιση και αξιολογείται συστηματικά στο Κεφάλαιο 5, αντί να αποδίδεται με ένα υποκειμενικό συνολικό διάγραμμα ωριμότητας.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΣΥΓΚΡΙΣΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΕΩΝ

5.1 Κριτήρια σύγκρισης

Οι πέντε τεχνολογικές οικογένειες προσεγγίσεων του Κεφαλαίου 4 συγκρίνονται με δέκα κριτήρια που έχουν διακριτό αντικείμενο και θετική κατεύθυνση. Η προσαρμοστικότητα διαχωρίζεται από την απόκριση σε πραγματικό χρόνο, επειδή μία διαδικασία μπορεί να ανασχεδιαστεί εκ των υστέρων χωρίς να αλλάζει δυναμικά κατά την εκτέλεση. Η αξιοποίηση δεδομένων και Process Mining διαχωρίζεται από την ποιότητα αποφάσεων: το πρώτο κριτήριο εξετάζει κατά πόσο η πραγματική εκτέλεση αναλύεται συστηματικά, ενώ το δεύτερο εστιάζει στην ακρίβεια, την ιχνηλασιμότητα και την επεξηγησιμότητα των αποφάσεων. Τέλος, η εμπειρική ωριμότητα δεν αφορά την αναλυτική ικανότητα αλλά την ύπαρξη τεκμηριωμένων εφαρμογών, εργαλείων, προτύπων και επαναλαμβανόμενων αποτελεσμάτων.

Πίνακας 5.1 – Λειτουργικός ορισμός των κριτηρίων σύγκρισης

Κωδ.	Κριτήριο	Λειτουργικός ορισμός
C1	Προσαρμοστικότητα και ευελιξία	Ικανότητα ανασχεδιασμού ή αναδρομολόγησης της διαδικασίας όταν αλλάζουν προϊόντα, κανόνες, πόροι ή συνθήκες.
C2	Βαθμός αυτοματοποίησης	Έκταση στην οποία δραστηριότητες και αποφάσεις εκτελούνται χωρίς χειροκίνητη παρέμβαση μέσω κανόνων, workflows ή αλγοριθμικών μηχανισμών.
C3	Απόκριση σε πραγματικό χρόνο	Ικανότητα ανίχνευσης γεγονότων και ενεργοποίησης κατάλληλης ενέργειας με χαμηλή καθυστέρηση.
C4	Διαλειτουργικότητα	Ικανότητα ανταλλαγής και σημασιολογικά συνεπούς αξιοποίησης δεδομένων μεταξύ BPMS, ERP, MES, SCADA, IoT και εξωτερικών υπηρεσιών.
C5	Τεκμηριωμένη βελτίωση μέσω δεδομένων	Χρήση event logs, Process Mining και αναλυτικής για ανακάλυψη ροών, έλεγχο συμμόρφωσης, εντοπισμό στενώσεων και αξιολόγηση βελτιώσεων.
C6	Ποιότητα και επεξηγησιμότητα αποφάσεων	Ακρίβεια, σταθερότητα, ιχνηλασιμότητα και δυνατότητα ανθρώπινης κατανόησης των κανόνων ή μοντέλων που παράγουν αποφάσεις.
C7	Κλιμακωσιμότητα	Ικανότητα διαχείρισης αυξανόμενου όγκου συμβάντων, χρηστών, γραμμών παραγωγής και εγκαταστάσεων χωρίς δυσανάλογη υποβάθμιση.
C8	Εφικτότητα υλοποίησης	Συνδυασμός κόστους, απαιτούμενων δεξιοτήτων, πολυπλοκότητας ενσωμάτωσης και φόρτου συντήρησης. Υψηλή τιμή σημαίνει ευνοϊκή εφικτότητα.
C9	Κυβερνοασφάλεια και συμμόρφωση	Ενσωμάτωση ελέγχων πρόσβασης, ακεραιότητας, καταγραφής, ιδιωτικότητας και κανονιστικής συμμόρφωσης.
C10	Εμπειρική ωριμότητα και τεκμηρίωση	Ύπαρξη ώριμων εργαλείων, προτύπων, αναπαραγωγικών μελετών και εφαρμογών πέρα από μεμονωμένα proof-of-concept.

Η κλίμακα 1–5 εφαρμόζεται με τους ίδιους κανόνες σε όλα τα κριτήρια: 1 σημαίνει ουσιαστική απουσία τεκμηριωμένης υποστήριξης, 2 περιορισμένη ή πιλοτική υποστήριξη με σοβαρούς περιορισμούς, 3 μερική και επαναλαμβανόμενη υποστήριξη

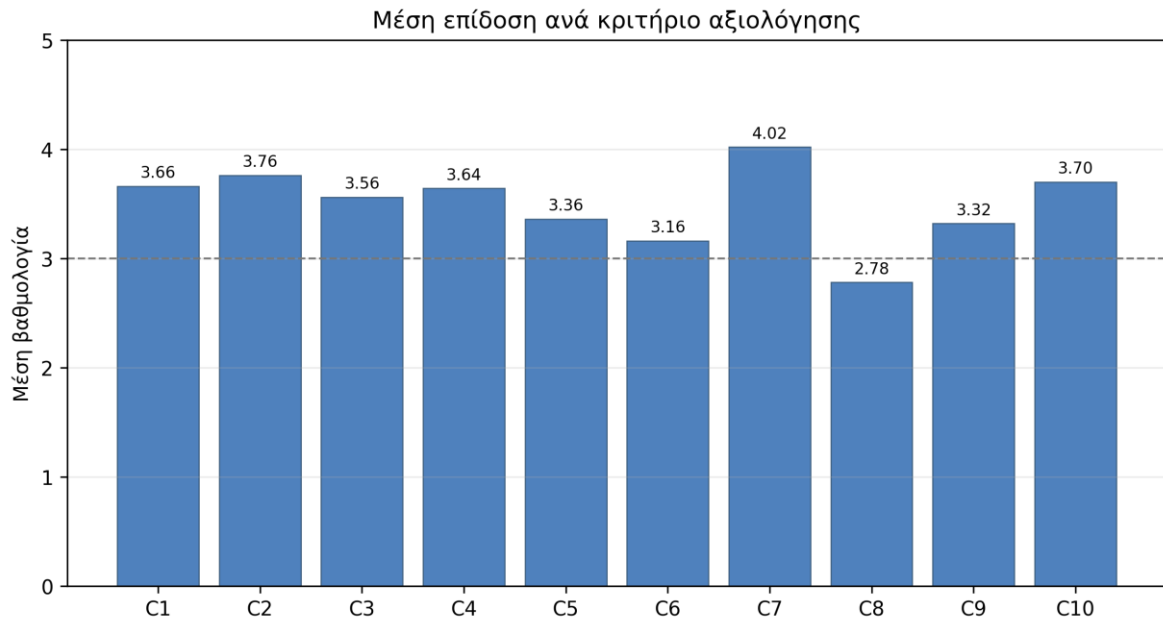
υπό ουσιώδεις προϋποθέσεις, 4 ισχυρή υποστήριξη στις περισσότερες μελέτες με διαχειρίσιμους περιορισμούς και 5 κεντρικό, σταθερό και εμπειρικά επικυρωμένο πλεονέκτημα. Οι ενδιάμεσες τιμές 2 και 4 δεν αποδίδονται απλώς επειδή ένα χαρακτηριστικό αναφέρεται, αλλά όταν η τεκμηρίωση το τοποθετεί σαφώς ανάμεσα στα γειτονικά επίπεδα.

5.2 Μέθοδος σύνθεσης και πίνακας αξιολόγησης

Για να αποφευχθεί η χρήση διαφορετικών κανόνων σε διαφορετικά επίπεδα, εφαρμόστηκε αποκλειστικά η μέθοδος του αριθμητικού μέσου όρου. Κάθε επιλεγμένη μελέτη βαθμολογήθηκε ως προς τα κριτήρια που μπορούσαν να αποτιμηθούν από το πλήρες κείμενο. Στη συνέχεια υπολογίστηκε ο μέσος όρος των μελετών που ανήκουν σε κάθε τεχνολογική οικογένεια και, τέλος, ο μέσος όρος των πέντε οικογενειών ανά κριτήριο. Οι τιμές παρουσιάζονται με ένα δεκαδικό ψηφίο. Μελέτες με περισσότερες από μία τεχνολογικές βάσεις μπορούν να συμβάλλουν σε περισσότερες οικογένειες, αλλά βαθμολογούνται μία φορά μέσα σε κάθε οικογένεια. Δεν χρησιμοποιείται κυρίαρχη τιμή σε κανένα επίπεδο σύνθεσης.

Πίνακας 5.2 – Μέσες βαθμολογίες των τεχνολογικών οικογενειών (κλίμακα 1–5)

Οικογένεια	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	M.O.
A. IoT / event-driven	4,0	4,1	4,6	3,6	3,1	3,0	4,1	2,8	3,0	3,7	3,60
B. Cloud-based BPM	3,2	3,5	3,1	4,1	2,6	3,0	4,8	3,4	3,2	4,0	3,49
C. AI-enhanced BPM	4,0	4,4	3,2	3,1	3,5	2,6	3,6	2,5	2,4	3,2	3,25
D. Big Data / Process Mining	3,8	3,4	2,7	3,4	4,8	4,0	4,2	3,0	3,2	4,1	3,66
E. Cybersecurity / CPS	3,3	3,4	4,2	4,0	2,8	3,2	3,4	2,2	4,8	3,5	3,48
Μέσος όρος κριτηρίου	3,66	3,76	3,56	3,64	3,36	3,16	4,02	2,78	3,32	3,70	3,50



Εικόνα 5.1 – Μέση επίδοση ανά κριτήριο αξιολόγησης. Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει του Πίνακα 5.2.

Η χρήση της ίδιας μεθόδου σε όλα τα επίπεδα οδηγεί σε δύο καθαρές παρατηρήσεις. Η υψηλότερη μέση επίδοση καταγράφεται στην κλιμακωσιμότητα και απόδοση (C7=4,02), επειδή αρκετές οικογένειες έχουν σχεδιαστεί για καταναμεμημένα ή δεδομενοκεντρικά περιβάλλοντα. Η χαμηλότερη επίδοση εμφανίζεται στην εφικτότητα υλοποίησης (C8=2,78), γεγονός που αντανακλά κόστος ενσωμάτωσης, ανάγκη εξειδικευμένων δεξιοτήτων και συνεχή συντήρηση. Οι μέσοι όροι των οικογενειών κυμαίνονται από 3,25 έως 3,66· επομένως οι διαφορές είναι περιορισμένες και δεν τεκμηριώνεται μία καθολικά ανώτερη οικογένεια.

5.3 Ανάλυση αποτελεσμάτων και αιτιολόγηση βαθμολογιών

Η οικογένεια A, IoT/event-driven BPM, εμφανίζει υψηλή προσαρμοστικότητα (C1=4,0), αυτοματοποίηση (C2=4,1) και κλιμακωσιμότητα (C7=4,1), επειδή η ασύγχρονη ανταλλαγή συμβάντων επιτρέπει αποσύνδεση παραγωγών και καταναλωτών. Η απόκριση σε πραγματικό χρόνο είναι η ισχυρότερη επίδοσή της (C3=4,6), αλλά δεν βαθμολογείται με 5 λόγω ετερογένειας συσκευών, καθυστερήσεων δικτύου και ανάγκης φιλτραρίσματος θορυβωδών δεδομένων. Η διαλειτουργικότητα παραμένει υψηλή αλλά όχι πλήρης (C4=3,6), καθώς απαιτούνται gateways (πύλες) και σημασιολογική αντιστοίχιση. Οι μέτριες τιμές στα C5 και C6 προκύπτουν επειδή η συλλογή δεδομένων δεν συνεπάγεται αυτόματα ώριμη αναλυτική ή επεξηγήσιμες αποφάσεις. Η εφικτότητα (C8=2,8) και η ασφάλεια (C9=3,0) επιβαρύνονται από μεγάλο αριθμό συσκευών, πρωτοκόλλων και σημείων επίθεσης, ενώ η τεκμηρίωση

(C10=3,7) είναι σχετικά ώριμη αλλά όχι ομοιόμορφη (Atzori et al., 2010· Rajkumar et al., 2010).

Η οικογένεια B, Cloud-based BPM, υπερέχει στην κλιμακωσιμότητα (C7=4,8) και στη διαλειτουργικότητα υπηρεσιών (C4=4,1), χάρη στην ελαστική παροχή πόρων και στις τυποποιημένες διεπαφές. Η προσαρμοστικότητα, η αυτοματοποίηση και η απόκριση πραγματικού χρόνου κινούνται σε μέτρια επίπεδα (C1=3,2, C2=3,5, C3=3,1), επειδή εξαρτώνται από τον σχεδιασμό της εφαρμογής, το μοντέλο νέφους και τη θέση των δεδομένων. Η χαμηλότερη τιμή στο C5=2,6 δεν σημαίνει ότι το νέφος δεν μπορεί να φιλοξενήσει Process Mining, αλλά ότι η υποδομή από μόνη της δεν παρέχει ανακάλυψη και ανάλυση διαδικασιών. Η εφικτότητα C8=3,4 είναι καλύτερη από άλλες οικογένειες λόγω υπηρεσιών κατ' απαίτηση, αλλά περιορίζεται από vendor lock-in και κόστος μεταφοράς. Η ασφάλεια C9=3,2 διαφοροποιείται ανά IaaS, PaaS και SaaS: οι πάροχοι προσφέρουν ώριμους ελέγχους, αλλά η κοινή ευθύνη και η αποθήκευση βιομηχανικών δεδομένων σε τρίτους δημιουργούν πρόσθετες απαιτήσεις συμμόρφωσης (Buyya et al., 2009).

Η οικογένεια C, AI-enhanced BPM, εμφανίζει υψηλή αυτοματοποίηση (C2=4,4) και προσαρμοστικότητα (C1=4,0), επειδή τα μοντέλα μπορούν να προτείνουν ή να επιλέγουν ενέργειες με βάση νέα δεδομένα. Η τιμή C6=2,6 είναι συνειδητά συγκρατημένη: η προγνωστική ακρίβεια μπορεί να είναι υψηλή, όμως η επεξηγησιμότητα και η ιχνηλασιμότητα παραμένουν συχνά περιορισμένες λόγω χρήσης μοντέλων μαύρου κουτιού. Η απόκριση πραγματικού χρόνου (C3=3,2) και η κλιμακωσιμότητα (C7=3,6) εξαρτώνται από υπολογιστικό κόστος, μετατόπιση δεδομένων και ανάγκη επανεκπαίδευσης. Η τεκμηριωμένη βελτίωση C5=3,5 προϋποθέτει σύνδεση των προβλέψεων με event logs και KPI, ενώ η εφικτότητα C8=2,5 και η ασφάλεια C9=2,4 επηρεάζονται από ποιότητα & διαθεσιμότητα δεδομένων, διακυβέρνηση μοντέλων, adversarial κινδύνους και κανονιστικές υποχρεώσεις. Η εμπειρική ωριμότητα C10=3,2 παραμένει μέτρια, καθώς αρκετές εφαρμογές είναι πιλοτικές (Russell & Norvig, 2021· Mendling et al., 2020).

Η οικογένεια D, Big Data και Process Mining, καταγράφει την υψηλότερη συνολική μέση τιμή (3,66), χωρίς όμως να υπερέχει σε όλα τα κριτήρια. Η ισχυρότερη επίδοση αφορά την τεκμηριωμένη βελτίωση μέσω δεδομένων (C5=4,8), επειδή η ανακάλυψη διαδικασιών, ο έλεγχος συμμόρφωσης και η ανάλυση στενώσεων αποτελούν τον

πυρήνα της. Η ποιότητα αποφάσεων $C6=4,0$ είναι υψηλή όταν τα event logs είναι πλήρη και οι κανόνες ανάλυσης διαφανείς. Η προσαρμοστικότητα $C1=3,8$ δικαιολογείται επειδή τα ευρήματα μπορούν να οδηγήσουν σε τεκμηριωμένο ανασχεδιασμό ακόμη και όταν δεν υπάρχει άμεση runtime προσαρμογή. Αντίθετα, η απόκριση πραγματικού χρόνου $C3=2,7$ είναι χαμηλότερη, καθώς σημαντικό μέρος των τεχνικών λειτουργεί εκ των υστέρων οπότε δεν υπάρχουν υψηλές προσδοκίες/απαιτήσεις απόδοσης. Οι τιμές $C4=3,4$, $C7=4,2$ και $C10=4,1$ αντανakλούν ώριμες πλατφόρμες δεδομένων, ενώ $C8=3,0$ και $C9=3,2$ παραμένουν μέτριες λόγω κόστους υποδομών, ποιότητας logs και απαιτήσεων διακυβέρνησης (van der Aalst, 2016· Marrella et al., 2023).

Η οικογένεια E, Cybersecurity/CPS, υπερέχει στην κυβερνοασφάλεια και συμμόρφωση ($C9=4,8$), επειδή ενσωματώνει ελέγχους ταυτότητας συσκευών, ακεραιότητα μηνυμάτων, τμηματοποίηση δικτύων και καταγραφή ενεργειών. Η απόκριση πραγματικού χρόνου ($C3=4,2$) και η διαλειτουργικότητα ($C4=4,0$) είναι υψηλές λόγω της στενής σύνδεσης ψηφιακού ελέγχου και φυσικής διεργασίας, χωρίς να θεωρούνται πλήρεις εξαιτίας παλαιού εξοπλισμού και ετερογενών πρωτοκόλλων. Οι τιμές $C1=3,3$, $C2=3,4$ και $C7=3,4$ είναι μέτριες, επειδή οι περιορισμοί ασφάλειας και προστασίας(safety) μπορούν να μειώσουν την ταχύτητα αλλαγών και να απαιτούν αυστηρή επικύρωση. Το $C5=2,8$ είναι χαμηλότερο, αφού η ασφάλεια και ο φυσικός έλεγχος δεν παρέχουν από μόνα τους βελτιστοποιήσεις μέσω αναλυτικής διαδικασιών. Η εφικτότητα $C8=2,2$ είναι η χαμηλότερη λόγω συνδυασμού OT/IT, εξειδικευμένου εξοπλισμού, μηχανισμών ανθεκτικότητας και συνεχών ελέγχων (Fernández-Caramés & Fraga-Lamas, 2018· Monostori et al., 2016).

Το βασικό συμπέρασμα δεν είναι ότι οι τεχνολογίες πρέπει να συνδυάζονται άκριτα. Οι συμπληρωματικές ισχυρές πλευρές τους δημιουργούν κίνητρο για υβριδικές αρχιτεκτονικές, αλλά ο συνδυασμός μπορεί να αυξήσει το κόστος, την πολυπλοκότητα και την επιφάνεια επίθεσης. Επομένως, η επιλογή πρέπει να γίνεται με βάση την κρίσιμη επιχειρησιακή εφαρμογή και τα αποδεκτά trade-offs. Η ανάπτυξη μεθόδων που συνθέτουν τεχνολογίες χωρίς να υποβαθμίζουν την εφικτότητα, την επεξηγησιμότητα ή την ασφάλεια αποτελεί σαφές ερευνητικό κενό που μεταφέρεται στο Κεφάλαιο 6.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 – ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΑ ΚΕΝΑ & ΜΕΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΚΑΤΕΥΘΥΝΣΕΙΣ

6.1 Κύρια ευρήματα της ανασκόπησης

Η βιβλιογραφική επισκόπηση ανέδειξε ότι το πεδίο της Διαχείρισης Επιχειρησιακών Διαδικασιών (Business Process Management – BPM) στο πλαίσιο της Βιομηχανίας 4.0 βρίσκεται σε φάση έντονης ωρίμανσης αλλά και σαφούς αναδιάταξης, καθώς οι παραδοσιακές προσεγγίσεις μοντελοποίησης και βελτιστοποίησης διαδικασιών επεκτείνονται ώστε να ενσωματώνουν δεδομένα πραγματικού χρόνου, κυβερνο-φυσικές υποδομές και αλγοριθμική υποστήριξη αποφάσεων (Liao et al., 2017; Mendling et al., 2020). Συνολικά, τα άρθρα συγκλίνουν στο ότι η αξία της BPM στη Βιομηχανία 4.0 δεν περιορίζεται στη «χαρτογράφηση» ροών, αλλά μετατοπίζεται προς έναν ρόλο ενορχήστρωσης (orchestration) ανθρώπων, μηχανών και πληροφοριακών συστημάτων, με στόχο την ευθυγράμμιση λειτουργικών στόχων, την αυτοματοποίηση και τη διαρκή βελτίωση βάσει μετρήσιμων δεικτών (Dumas et al., 2018; Vom Brocke & Rosemann, 2015).

Ειδικότερα, σε συνέχεια της κατηγοριοποίησης του Κεφαλαίου 4 και της συγκριτικής αξιολόγησης του Κεφαλαίου 5, η ανασκόπηση καταδεικνύει τέσσερις κυρίαρχες τάσεις. Πρώτον, αναπτύσσονται IoT-aware και event-driven προσεγγίσεις BPM, όπου γεγονότα από αισθητήρες, μηχανές και CPS τροφοδοτούν δυναμικά την εκτέλεση ροών εργασίας (Atzori et al., 2010; Rajkumar et al., 2010). Δεύτερον, ενισχύεται η data-driven διάσταση μέσω process mining, καθώς τα event logs και τα λειτουργικά (operational) δεδομένα χρησιμοποιούνται για την ανακάλυψη, συμμόρφωση και βελτιστοποίηση της πραγματικής διαδικασιακής συμπεριφοράς (van der Aalst, 2016). Τρίτον, η τεχνητή νοημοσύνη εισέρχεται ως μηχανισμός πρόβλεψης, ανίχνευσης ανωμαλιών και υποστήριξης αποφάσεων σε KPI-driven περιβάλλοντα, με έμφαση στη βιομηχανική συντήρηση και στον ποιοτικό έλεγχο (Russell & Norvig, 2021; Lee et al., 2014). Τέταρτον, οι cloud υποδομές και οι ψηφιακές πλατφόρμες επιταχύνουν την κλιμάκωση και τη διασύνδεση των BPMS με ετερογενή οικοσυστήματα ERP/MES/SCADA, αλλά ταυτόχρονα αυξάνουν την εξάρτηση από τη διαλειτουργικότητα, τη διακυβέρνηση δεδομένων και την ασφάλεια (Buyya et al., 2009; Fernández-Caramés & Fraga-Lamas, 2018).

Παράλληλα, η ανασκόπηση και ιδίως η ανά οικογένεια ανάλυση των Κεφαλαίων 4 και 5, επιβεβαιώνει ότι η ερευνητική παραγωγή είναι κατακερματισμένη ως προς την ορολογία, τα επίπεδα ανάλυσης και τις αξιολογήσεις, γεγονός που δυσκολεύει τη μεταφορά συμπερασμάτων μεταξύ κλάδων και περιπτώσεων χρήσης (Piccarozzi et al., 2018; Szelągowski & Berniak-Woźny, 2024). Οι περισσότερες προτάσεις παρουσιάζονται ως αρχιτεκτονικά πλαίσια ή proof-of-concept, ενώ λιγότερες εργασίες προσφέρουν μακροχρόνια εμπειρική αξιολόγηση σε πραγματικές εγκαταστάσεις μεγάλης κλίμακας ή συγκριτικές μελέτες υπό κοινά κριτήρια (Kamble et al., 2018; Santos et al., 2017).

Πίνακας 6.1 – Ερευνητικά κενά και αντίστοιχες κατευθύνσεις

Κατηγορία	Ερευνητικό κενό	Συνέπεια στην πράξη	Κατεύθυνση έρευνας
Τεχνολογικό	Διαλειτουργικότητα IoT/CPS με BPMS και σημασιολογική ευθυγράμμιση	Ασυνέχεια ροών και χειροκίνητες γέφυρες	Αρχιτεκτονικές αναφορές, πρότυπα και σημασιολογικά επίπεδα
Τεχνολογικό	Προσαρμογή κατά την εκτέλεση με έλεγχο καθυστέρησης	Καθυστερημένες ή μη ασφαλείς αντιδράσεις	Συντονισμός edge/fog-cloud και ενορχήστρωση βάσει γεγονότων
Μεθοδολογικό	Έλλειψη κοινών KPIs, datasets και πρωτοκόλλων αξιολόγησης	Δύσκολη σύγκριση και χαμηλή επαναληψιμότητα	Κοινά πρωτόκολλα benchmarking και ανοικτά αποθετήρια
Μεθοδολογικό	Ανεπαρκής σύνδεση Process Mining με βελτιστοποίηση αποφάσεων	Βελτιώσεις χωρίς σαφή αιτιολόγηση ή γνώση trade-offs	Decision-aware BPM, αιτιώδης ανάλυση και prescriptive analytics
Τεχνολογικό και οργανωσιακό	Ασφάλεια, ιδιωτικότητα και ιδιοκτησία δεδομένων σε συνδεδεμένες διαδικασίες	Κίνδυνος επιθέσεων, διαρροών και ασαφούς ευθύνης	Τεχνικά αντίμετρα, διοίκηση ασφάλειας και διακυβέρνηση δεδομένων
Τεχνολογικό	Ενσωμάτωση ψηφιακών διδύμων με μοντέλα διαδικασιών	Περιορισμένη προσομοίωση και πρόβλεψη σεναρίων	Process-aware digital twins και βελτιστοποίηση μέσω προσομοίωσης
Μεθοδολογικό	Εστίαση σε μία τεχνολογία ή φάση αντί για ολιστική κάλυψη	Κενά μεταξύ μοντελοποίησης, εκτέλεσης, παρακολούθησης και βελτίωσης	Ολιστικά πλαίσια κάλυψης του κύκλου ζωής BPM
Οργανωσιακό	Ελλιπείς ρόλοι, δεξιότητες και κουλτούρα διαδικασιών	Αντίσταση στην αλλαγή και αποστασματοική υιοθέτηση	Διακυβέρνηση BPM, εκπαίδευση και διαχείριση αλλαγής
Οργανωσιακό	Έλλειψη ελαφριών προσεγγίσεων για ΜμΕ	Αδυναμία υιοθέτησης με περιορισμένους πόρους	Κλιμακωτά πρότυπα υιοθέτησης και εργαλεία ωριμότητας για ΜμΕ

6.2 Ερευνητικά κενά

Τα κενά που εντοπίστηκαν, τα οποία προκύπτουν από τη συγκριτική αποτίμηση των οικογενειών προσεγγίσεων στα Κεφάλαια 4 και 5 (ιδίως από τα κριτήρια στα οποία οι οικογένειες εμφάνισαν μέτριες ή χαμηλές τιμές), μπορούν να ομαδοποιηθούν σε τρεις διαστάσεις: τεχνολογικά, μεθοδολογικά και οργανωσιακά, όπως φαίνεται στον παραπάνω πίνακα. Η διάκριση αυτή είναι χρήσιμη, επειδή η επιτυχία της BPM στη Βιομηχανία 4.0 απαιτεί ταυτόχρονα ικανή τεχνική υποδομή, συνεκτικές μεθόδους σχεδιασμού/αξιολόγησης και οργανωσιακή ετοιμότητα για αλλαγή (Brettel et al., 2014; Schumacher et al., 2016).

6.2.1 Τεχνολογικά κενά

Το πιο επίμονο τεχνολογικό κενό αφορά τη διαλειτουργικότητα μεταξύ επιπέδων παραγωγής και επιχειρησιακών συστημάτων. Διευκρινίζεται ότι ο βαθμός 4 που απέδωσε η συγκριτική αξιολόγηση (Κεφάλαιο 5) στις IoT/CPS-based προσεγγίσεις ως προς τη διαλειτουργικότητα αφορά τη σχετική τους υπεροχή έναντι των άλλων οικογενειών και υπό τυπικές συνθήκες· δεν αναιρεί το γεγονός ότι, σε απόλυτους όρους, παραμένουν ανοικτές προκλήσεις τυποποίησης και σημασιολογικής ευθυγράμμισης, οι οποίες δικαιολογούν την αποτύπωση της διαλειτουργικότητας ως ερευνητικού κενού. Παρότι τα CPS και οι αισθητήρες IoT παράγουν συνεχή ροή δεδομένων, η ενσωμάτωση αυτών των δεδομένων σε εκτελέσιμα μοντέλα BPM συχνά παραμένει *ad hoc*, χωρίς τυποποιημένες διεπαφές και σημασιολογική ευθυγράμμιση (Rajkumar et al., 2010; Kamble et al., 2018). Επιπλέον, η αξιοποίηση *real-time* (πραγματικού χρόνου) δεδομένων για *προσαρμοστική εκτέλεση* (runtime adaptation) συναντά περιορισμούς σε καθυστέρηση (latency), αξιοπιστία δικτύων και ποιότητα δεδομένων, ειδικά σε κατανεμημένα εργοστάσια με παλαιό εξοπλισμό (Lu, 2017; Santos et al., 2017). Τέλος, η ενσωμάτωση *ψηφιακών διδύμων* (*digital twins*) ως «ζωντανών» αναπαραστάσεων διαδικασιών είναι πολλά υποσχόμενη, αλλά παραμένει ερευνητικά ανοιχτή ως προς το πώς ορίζεται η αντιστοίχιση μοντέλου–πραγματικότητας και πώς επικυρώνεται σε πολυπαραγοντικές συνθήκες παραγωγής (Fuller et al., 2020; Czvetkó et al., 2023).

6.2.2 Μεθοδολογικά κενά

Σε μεθοδολογικό επίπεδο, η ανασκόπηση εντόπισε *έλλειμμα κοινών κριτηρίων αξιολόγησης και επαναληψιμότητας*. Μελέτες προτείνουν πλαίσια ή αρχιτεκτονικές χωρίς να παρέχουν μετρήσιμους δείκτες αποτελεσματικότητας, συγκρίσιμα σύνολα δεδομένων (datasets) ή δημόσια διαθέσιμα πρωτόκολλα αξιολόγησης, γεγονός που δυσκολεύει τη συσσώρευση γνώσης (Kitchenham & Charters, 2007; Tranfield et al., 2003). Ακόμη, αρκετές εργασίες εστιάζουν σε μία τεχνολογία (π.χ. IoT ή AI), η οποία τυπικά ενισχύει κυρίως μία φάση ή δραστηριότητα του κύκλου ζωής BPM, για παράδειγμα, το IoT ενισχύει την εκτέλεση και την παρακολούθηση, το process mining την ανάλυση/βελτιστοποίηση και η AI τη λήψη αποφάσεων και όχι το σύνολο του κύκλου ζωής, με αποτέλεσμα να παραβλέπονται κρίσιμες συνδέσεις μεταξύ μοντελοποίησης, εκτέλεσης, παρακολούθησης και συνεχούς βελτίωσης (Dumas et al.,

2018; Mendling et al., 2020). Τέλος, η σύζευξη process mining και προγνωστικής ανάλυσης με επιχειρησιακές αποφάσεις (decision-aware BPM) παραμένει άνιση: υπάρχουν ισχυρά αποτελέσματα σε ανίχνευση αποκλίσεων και bottlenecks, αλλά λιγότερα σε αιτιώδη εξήγηση, βελτιστοποίηση υπό περιορισμούς και διαχείριση *trade-offs* (van der Aalst, 2016; Szelągowski & Berniak-Woźny, 2024).

6.2.3 Οργανωσιακά κενά

Σε οργανωσιακό επίπεδο, αναδεικνύεται ότι οι τεχνικές λύσεις δεν αποδίδουν *χωρίς επαρκή ετοιμότητα αλλαγής, σαφή ρόλους και κουλτούρα process thinking*. Η μετάβαση σε Industry 4.0 συνεπάγεται ανασχεδιασμό εργασίας, επανακατάρτιση προσωπικού και νέα μοντέλα διακυβέρνησης δεδομένων, ιδιαίτερα όταν η BPM μετατρέπεται σε «μηχανισμό ελέγχου» που αλληλεπιδρά με αυτόνομες μηχανές (Brettel et al., 2014; Schumacher et al., 2016). Επιπλέον, η υιοθέτηση cloud-based BPMS και η ανταλλαγή δεδομένων κατά μήκος της εφοδιαστικής αλυσίδας δημιουργούν *προκλήσεις εμπιστοσύνης, συμμόρφωσης και ιδιοκτησίας δεδομένων*, ενώ τα *ζητήματα κυβερνοασφάλειας* κλιμακώνονται όσο αυξάνεται η συνδεσιμότητα (Fernández-Caramés & Fraga-Lamas, 2018; Kerremans, 2020). Τέλος, η βιβλιογραφία δείχνει ότι οι ΜμΕ αντιμετωπίζουν *δυσανάλογα εμπόδια κόστους και δεξιοτήτων*, με αποτέλεσμα να χρειάζονται «ελαφριά» πρότυπα υιοθέτησης και εργαλεία ωριμότητας ειδικά προσαρμοσμένα σε περιορισμένους πόρους (Kamble et al., 2018; Santos et al., 2017).

6.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Οι εννέα κατευθύνσεις που συνοψίζονται στον Πίνακα 6.1 αναλύονται χωριστά στις επόμενες υποενότητες, ώστε να υπάρχει πλήρης αντιστοίχιση μεταξύ πίνακα και κυρίως κειμένου. Οι κατευθύνσεις δεν αποτελούν ανεξάρτητη λίστα τεχνολογιών, αλλά απαντήσεις σε συγκεκριμένα τεχνολογικά, μεθοδολογικά και οργανωσιακά κενά που προέκυψαν από τα Κεφάλαια 4 και 5.

6.3.1 Αρχιτεκτονικές αναφοράς και σημασιολογική διαλειτουργικότητα

Η πρώτη κατεύθυνση αφορά κοινές αρχιτεκτονικές αναφοράς που συνδέουν BPMS με ERP, MES, SCADA, IoT gateways και CPS. Δεν αρκεί η τεχνική μεταφορά μηνυμάτων· απαιτείται κοινή σημασιολογία για γεγονότα, πόρους, καταστάσεις και δείκτες. Η έρευνα πρέπει να αξιολογήσει πρότυπα διεπαφών, σημασιολογικά μοντέλα και μηχανισμούς αντιστοίχισης παλαιού εξοπλισμού, ώστε η ίδια επιχειρησιακή έννοια να ερμηνεύεται με συνέπεια σε όλη τη ροή (Rajkumar et al., 2010· Kamble et al., 2018).

6.3.2 Συντονισμός edge, fog και cloud για προσαρμογή κατά την εκτέλεση

Η δεύτερη κατεύθυνση εστιάζει στη δυναμική εκτέλεση με ελεγχόμενη καθυστέρηση. Κρίσιμα γεγονότα πρέπει να επεξεργάζονται κοντά στη μηχανή μέσω edge ή fog υποδομών, ενώ οι υπολογιστικά βαριές αναλύσεις μπορούν να μεταφέρονται στο νέφος. Απαιτούνται μηχανισμοί που αποφασίζουν πού εκτελείται κάθε δραστηριότητα, πώς αντιμετωπίζεται απώλεια σύνδεσης και τότε μια αυτόματη προσαρμογή πρέπει να ανασταλεί για λόγους safety ή συμμόρφωσης (Lu, 2017· Buyya et al., 2009).

6.3.3 Κοινά πρωτόκολλα αξιολόγησης και ανοικτά αποθετήρια

Η τρίτη κατεύθυνση αφορά τη δημιουργία κοινών KPIs, datasets και πειραματικών πρωτοκόλλων. Χωρίς κοινό ορισμό για lead time, throughput, downtime, defect rate, ενεργειακή κατανάλωση και ακρίβεια αποφάσεων, οι επιδόσεις διαφορετικών προσεγγίσεων δεν είναι συγκρίσιμες. Ανοικτά event logs, συνθετικά βιομηχανικά σενάρια και αναπαραγώγιμος κώδικας θα επέτρεπαν ανεξάρτητη επαλήθευση και συσσώρευση γνώσης (Kitchenham & Charters, 2007· Tranfield et al., 2003).

6.3.4 Decision-aware BPM, αιτιώδης ανάλυση και prescriptive analytics

Η τέταρτη κατεύθυνση επιδιώκει να μετατρέψει τα ευρήματα του Process Mining σε τεκμηριωμένες αποφάσεις. Η απλή ανίχνευση ότι μια διαδρομή καθυστερεί δεν εξηγεί γιατί καθυστερεί ούτε ποια παρέμβαση θα βελτιώσει το σύστημα χωρίς αρνητικές παρενέργειες. Χρειάζονται αιτιώδη μοντέλα, βελτιστοποίηση υπό περιορισμούς και prescriptive analytics που παρουσιάζουν εναλλακτικές ενέργειες, αναμενόμενο όφελος, κόστος και αβεβαιότητα (van der Aalst, 2016· Szelągowski & Berniak-Woźny, 2024).

6.3.5 Ασφάλεια, ιδιωτικότητα και διακυβέρνηση δεδομένων εκ σχεδιασμού

Η πέμπτη κατεύθυνση είναι ταυτόχρονα τεχνική και οργανωσιακή. Σε τεχνικό επίπεδο απαιτούνται ισχυρή αυθεντικοποίηση, κρυπτογράφηση, ακεραιότητα μηνυμάτων, τμηματοποίηση OT/IT και συνεχής ανίχνευση ανωμαλιών. Σε οργανωσιακό επίπεδο χρειάζονται πολιτικές ιδιοκτησίας δεδομένων, κατανομή ευθυνών, διαδικασίες απόκρισης συμβάντων και έλεγχοι συμμόρφωσης. Η μελλοντική έρευνα πρέπει να εξετάσει πώς οι πολιτικές αυτές ενσωματώνονται απευθείας στα μοντέλα και στην εκτέλεση BPM (Fernández-Caramés & Fraga-Lamas, 2018).

6.3.6 Process-aware ψηφιακά δίδυμα

Η έκτη κατεύθυνση αφορά ψηφιακά δίδυμα που δεν αναπαριστούν μόνο μηχανές αλλά και τη λογική της επιχειρησιακής διαδικασίας. Η σύνδεση BPMN,

δεδομένων αισθητήρων και μοντέλων προσομοίωσης μπορεί να επιτρέψει δοκιμή σεναρίων As-Is και To-Be πριν εφαρμοστούν στο φυσικό σύστημα. Κρίσιμα ζητήματα είναι η πιστότητα του μοντέλου, η συνεχής βαθμονόμηση και η επικύρωση ότι μια βελτίωση στη προσομοίωση μεταφέρεται με ασφάλεια στην παραγωγή (Tao et al., 2019· Fuller et al., 2020).

6.3.7 Ολιστικά πλαίσια για ολόκληρο τον κύκλο ζωής BPM

Η έβδομη κατεύθυνση αντιμετωπίζει τον κατακερματισμό ανά τεχνολογία ή δραστηριότητα. Ένα ολιστικό πλαίσιο πρέπει να συνδέει μοντελοποίηση, εκτέλεση, παρακολούθηση, ανάλυση και ανασχεδιασμό, ώστε τα δεδομένα εκτέλεσης να επιστρέφουν με ελεγχόμενο τρόπο στο μοντέλο. Η έρευνα οφείλει να εξετάσει διατήρηση εκδόσεων, ιχνηλασιμότητα αλλαγών, human-in-the-loop εγκρίσεις και μηχανισμούς rollback όταν μια προσαρμογή δεν αποδίδει (Dumas et al., 2018).

6.3.8 Διακυβέρνηση BPM, δεξιότητες και διαχείριση αλλαγής

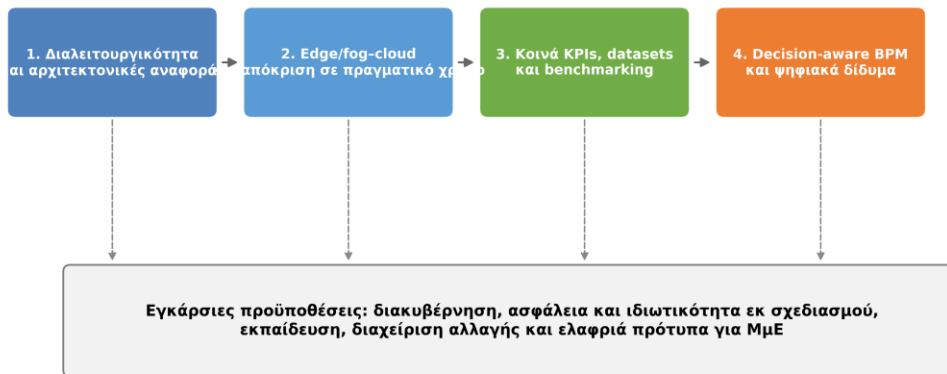
Η όγδοη κατεύθυνση αφορά την οργανωσιακή ικανότητα εφαρμογής. Απαιτούνται σαφείς ρόλοι ιδιοκτήτη διαδικασίας, υπευθύνου δεδομένων, μηχανικού αυτοματισμού και υπευθύνου ασφάλειας, καθώς και κοινός μηχανισμός λήψης αποφάσεων. Προγράμματα εκπαίδευσης και συμμετοχικός ανασχεδιασμός μειώνουν την αντίσταση και βοηθούν το προσωπικό να αντιληφθεί την BPM ως εργαλείο βελτίωσης και όχι ως μηχανισμό επιτήρησης (Schumacher et al., 2016· Brettel et al., 2014).

6.3.9 Ελαφριά και κλιμακωτά πρότυπα υιοθέτησης για ΜμΕ

Η ένατη κατεύθυνση προσαρμόζει τις προηγούμενες προτάσεις στους περιορισμένους πόρους των ΜμΕ. Αντί για πλήρη και ταυτόχρονη αναβάθμιση, προτείνονται κλιμακωτά βήματα: χαρτογράφηση κρίσιμης διαδικασίας, βασική συλλογή δεδομένων, πιλοτική αυτοματοποίηση, αξιολόγηση οφέλους και σταδιακή επέκταση. Απλά εργαλεία ωριμότητας, πρότυπα cloud υπηρεσιών και κοινόχρηστες υποδομές μπορούν να μειώσουν το αρχικό κόστος χωρίς να θυσιάζουν τη διακυβέρνηση και την ασφάλεια (Santos et al., 2017).

Ο οδικός χάρτης του Σχήματος 6.1 συνθέτει τις κατευθύνσεις σε διαδοχικά βήματα. Η διαλειτουργικότητα και ο συντονισμός edge/fog–cloud δημιουργούν το τεχνικό θεμέλιο. Τα κοινά πρωτόκολλα αξιολόγησης επιτρέπουν αξιόπιστη σύγκριση, ενώ το decision-aware BPM και τα ψηφιακά δίδυμα προσθέτουν προηγμένες δυνατότητες. Η ασφάλεια, η διακυβέρνηση, οι δεξιότητες και η προσαρμογή στις ΜμΕ διατρέχουν εγκάρσια όλα τα στάδια και δεν αντιμετωπίζονται ως μεταγενέστερες προσθήκες.

Σταδιακός οδικός χάρτης με τεχνολογικές, μεθοδολογικές και οργανωσιακές κατευθύνσεις



Εικόνα 6.1 – Οδικός χάρτης ερευνητικών κατευθύνσεων για BPM στη Βιομηχανία 4.0. Πηγή: Ιδία επεξεργασία βάσει του Πίνακα 6.1.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7 – MINI CASE STUDY

Ως mini case study επιλέχθηκε η διαδικασία “Order-to-Delivery” (από τη λήψη παραγγελίας έως την παράδοση), επειδή αποτελεί χαρακτηριστική end-to-end ροή που εμφανίζεται τόσο σε e-commerce όσο και σε παραδοσιακές επιχειρήσεις διανομής. Η συγκεκριμένη ροή περιλαμβάνει βήματα ελέγχου αποθέματος, συλλογής/συσκευασίας, αποστολής και τιμολόγησης, τα οποία είναι κατάλληλα για ανασχεδιασμό με πρακτικές BPM και τεχνολογίες Industry 4.0 (Dumas et al., 2018; van der Aalst, 2016).

Η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε σε BPMN 2.0 με χρήση του (Modeler). Παρουσιάζονται δύο εκδοχές: (α) As-Is, που αποτυπώνει μια τυπική, περισσότερο χειροκίνητη ροή, και (β) To-Be, που ενσωματώνει αυτοματοποίηση, real-time έλεγχο αποθέματος μέσω WMS/IoT, παράλληλη εκτέλεση κρίσιμων ενεργειών (booking μεταφορέα και έκδοση e-invoice) και ενημέρωση πελάτη για status (Vom Brocke & Rosemann, 2015).

7.1 Επιλογή διαδικασίας (π.χ. “Order-to-Delivery Workflow”)

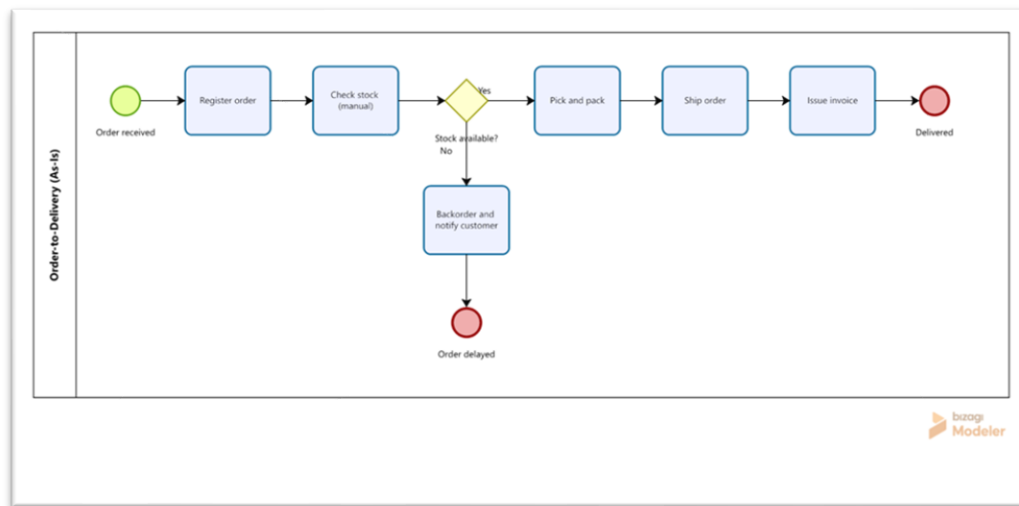
Ως mini case study επιλέχθηκε η διαδικασία “Order-to-Delivery” (από τη λήψη παραγγελίας έως την παράδοση), επειδή αποτελεί χαρακτηριστική end-to-end ροή που εμφανίζεται τόσο σε e-commerce όσο και σε παραδοσιακές επιχειρήσεις διανομής. Η συγκεκριμένη ροή περιλαμβάνει βήματα ελέγχου αποθέματος, συλλογής/συσκευασίας, αποστολής και τιμολόγησης, τα οποία είναι κατάλληλα για ανασχεδιασμό με πρακτικές BPM και τεχνολογίες Industry 4.0 (Dumas et al., 2018; van der Aalst, 2016).

Η μοντελοποίηση πραγματοποιήθηκε σε BPMN 2.0 με χρήση του Bizagi Modeler. Παρουσιάζονται δύο εκδοχές: (α) As-Is, που αποτυπώνει μια τυπική, περισσότερο χειροκίνητη ροή, και (β) To-Be, που ενσωματώνει αυτοματοποίηση, real-time έλεγχο αποθέματος μέσω WMS/IoT, παράλληλη εκτέλεση κρίσιμων ενεργειών (booking μεταφορέα και έκδοση e-invoice) και ενημέρωση πελάτη για status (Vom Brocke & Rosemann, 2015).

7.2 “As-Is” BPMN διάγραμμα

Το As-Is διάγραμμα περιγράφει μια κλασική ακολουθία: καταχώριση παραγγελίας, χειροκίνητος έλεγχος αποθέματος, συλλογή/συσκευασία, αποστολή και έκδοση τιμολογίου. Εάν δεν υπάρχει απόθεμα, δημιουργείται backorder και ο πελάτης

ενημερώνεται, όμως αυτό οδηγεί σε καθυστέρηση παραγγελίας. Η επιλογή αυτή επιτρέπει την ανάδειξη bottlenecks που προκύπτουν από χειροκίνητες επαληθεύσεις και σειριακή εκτέλεση (van der Aalst, 2016).

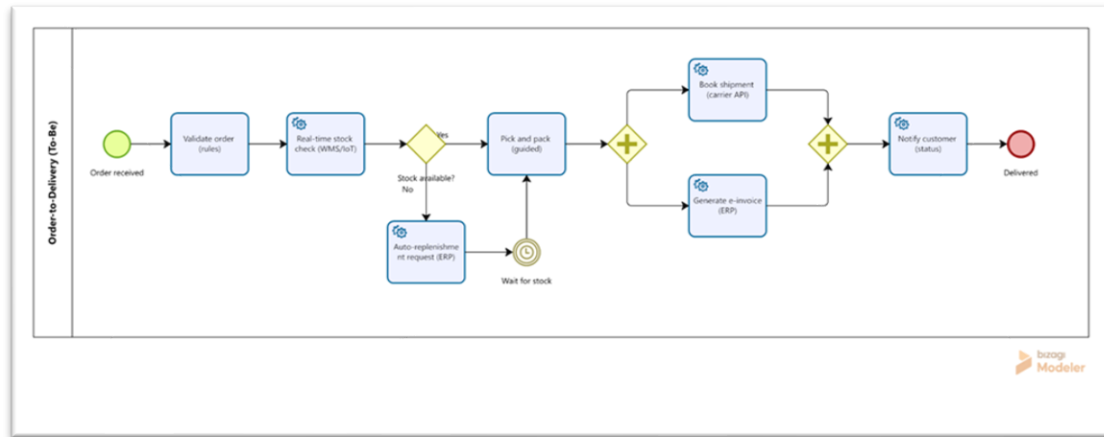


Εικόνα 7.1 – Διαδικασία Order-to-Delivery στην υφιστάμενη κατάσταση (As-Is). Πηγή: Ιδία επεξεργασία με χρήση Bizagi Modeler.

7.3 “To-Be” βελτιστοποιημένο διάγραμμα

Στο To-Be σενάριο, η διαδικασία ανασχεδιάζεται ώστε να μειωθεί ο χρόνος κύκλου (cycle time) και να αυξηθεί η διαφάνεια, με βάση καθιερωμένες πρακτικές ανασχεδιασμού διαδικασιών BPM, όπως η εξάλειψη μη προστιθέμενων αξίας βημάτων, η αυτοματοποίηση χειρωνακτικών εργασιών και η παραλληλοποίηση ανεξάρτητων ενεργειών (Dumas et al., 2018). Στην πράξη, αυτό σημαίνει ότι βήματα που στο As-Is εκτελούνταν χειροκίνητα και σειριακά (π.χ. έλεγχος αποθέματος μέσω τηλεφώνου/email, χειρόγραφη τιμολόγηση) αντικαθίστανται από αυτοματοποιημένες, διασυνδεδεμένες ενέργειες. Η παραγγελία αρχικά επικυρώνεται με κανόνες (business rules), ακολουθεί real-time έλεγχος αποθέματος (WMS/IoT) —ο οποίος μπορεί να ενεργοποιεί και αυτόματο ανεφοδιασμό (auto-replenishment), δηλαδή αυτόματη δημιουργία παραγγελίας αναπλήρωσης όταν το απόθεμα πέσει κάτω από ένα όριο, χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση— και στη συνέχεια “guided” συλλογή/συσκευασία. Έπειτα, ενεργοποιείται παράλληλη εκτέλεση δύο ενεργειών: κράτηση αποστολής μέσω

carrier API και δημιουργία e-invoice μέσω ERP. Τέλος, ο πελάτης ενημερώνεται για την κατάσταση και η ροή ολοκληρώνεται με παράδοση. Η παράλληλη δρομολόγηση (parallel gateway) μειώνει τη σειριακή αναμονή και η αυτοματοποίηση περιορίζει λάθη καταχώρισης (Dumas et al., 2018; Mendling et al., 2020).



Εικόνα 7.2 – Βελτιστοποιημένη διαδικασία Order-to-Delivery (To-Be). Πηγή: Ιδία επεξεργασία με χρήση Bizagi Modeler.

7.4 Πίνακας χρόνου/κόστους

Για να προκύψει συγκριτική αποτίμηση, ορίστηκε ενδεικτικό σενάριο ανά παραγγελία με εκτιμώμενους χρόνους εκτέλεσης ανά βήμα. Οι τιμές είναι υποθετικές (illustrative) και χρησιμοποιούνται για να αποτυπώσουν το “πριν/μετά” της βελτιστοποίησης. Ως κόστος εργασίας θεωρείται ενδεικτικός συντελεστής 25 €/ώρα. Στο To-Be συνυπολογίζεται μικρό λειτουργικό κόστος ανά παραγγελία για τα συστήματα (π.χ. API/ERP/e-invoicing), ώστε να φαίνεται η μετατόπιση από χειρωνακτικό σε ψηφιακό κόστος. Το κόστος κάθε βήματος υπολογίζεται ως (χρόνος σε λεπτά × 25 €/ώρα) / 60, προσαυξημένο κατά ένα σταθερό λειτουργικό κόστος 0,02 € ανά βήμα που αντιστοιχεί στη χρήση των πληροφοριακών συστημάτων (π.χ. κλήσεις API, καταχωρίσεις)· για παράδειγμα, για το βήμα ελέγχου αποθέματος στο As-Is: $(10 \times 25)/60 + 0,02 \approx 4,18 \text{ €}$.

Οι τιμές (κόστους και χρόνους εκτέλεσης) θεωρούνται ρεαλιστικές για ένα τυπικό σενάριο μικρομεσαίας επιχείρησης διανομής με ημι-αυτοματοποιημένες διαδικασίες στο As-Is και πλήρως διασυνδεδεμένα συστήματα στο To-Be· σε διαφορετικά σενάρια (π.χ. πολύ μεγάλος όγκος παραγγελιών ή πλήρως χειροκίνητη αφετηρία) οι απόλυτες τιμές θα διέφεραν, αλλά η σχετική βελτίωση παραμένει ενδεικτική της τάξης μεγέθους (Vom Brocke & Rosemann, 2015).

Πίνακας 7.1 – Ενδεικτικός χρόνος και κόστος ανά παραγγελία στην κατάσταση As-Is και To-Be

Βήμα	As-Is χρόνος (min)	To-Be χρόνος (min)	As-Is κόστος (€/order)	To-Be κόστος (€/order)
<i>Καταχώριση / Επικύρωση παραγγελίας</i>	5	2	2.10	0.93
<i>Έλεγχος αποθέματος</i>	10	1	4.18	0.52
<i>Συλλογή & συσκευασία</i>	20	15	8.35	6.35
<i>Αποστολή / Booking μεταφορέα</i>	15	3	6.27	1.35
<i>Τιμολόγηση (Invoice / e-invoice)</i>	8	2	3.35	0.93
<i>Ενημέρωση πελάτη (status)</i>	0	1	0.02	0.52

Ως προς τις επιμέρους τιμές του To-Be, οι χρόνοι αντανakλούν ημι-αυτοματοποιημένη εκτέλεση και όχι μηδενικό ανθρώπινο χρόνο: η καταχώριση/επικύρωση παραγγελίας (2 λεπτά) παραμένει μη μηδενική επειδή απαιτείται ανθρώπινη επιβεβαίωση

εξαιρέσεων, παρότι οι κανόνες (business rules) εκτελούνται αυτόματα. Ο χρόνος συλλογής/συσκευασίας μειώνεται μόνο κατά 5 λεπτά (από 20 σε 15), διότι παραμένει κατ' ουσίαν φυσική εργασία που απλώς υποβοηθείται («guided picking») και δεν εξαλείφεται. Στην αποστολή (3 λεπτά) και στην τιμολόγηση (2 λεπτά), παρότι χρησιμοποιούνται API και e-invoicing, ο χρόνος δεν είναι μηδενικός λόγω επικύρωσης δεδομένων, αναμονής απόκρισης τρίτων συστημάτων (carrier/ERP) και ελέγχου ορθότητας. Η ενημέρωση πελάτη στο To-Be (1 λεπτό) αφορά την αυτοματοποιημένη αποστολή ειδοποίησης κατάστασης· στο As-Is η αντίστοιχη δραστηριότητα θεωρήθηκε αμελητέα σε χρόνο (πρακτικά ενσωματωμένη σε άλλα βήματα), διατηρεί όμως ένα ελάχιστο σταθερό κόστος συστήματος (0,02 €). Οι τιμές αυτές είναι ενδεικτικές και θα μπορούσαν να είναι ακόμη χαμηλότερες σε πλήρως αυτοματοποιημένο περιβάλλον (π.χ. η ειδοποίηση μέσω email/SMS διαρκεί δευτερόλεπτα), διατηρήθηκαν όμως συντηρητικές ώστε να μην υπερεκτιμηθεί το όφελος.

Με βάση τον Πίνακα 7.1, ο συνολικός χρόνος εκτέλεσης μειώνεται από 58 λεπτά σε 22 λεπτά, δηλαδή κατά περίπου 62%. Διευκρινίζεται ότι ο συνολικός χρόνος του To-Be δεν προκύπτει ως απλό άθροισμα των επιμέρους βημάτων (που θα έδινε 24 λεπτά), αλλά λαμβάνει υπόψη ότι δύο δραστηριότητες η κράτηση αποστολής (booking μεταφορέα) και η έκδοση e-invoice, εκτελούνται παράλληλα μέσω parallel gateway· έτσι, αντί να προστεθούν (3 + 2 λεπτά), προσμετράται μόνο η μεγαλύτερη από τις δύο (3 λεπτά), με αποτέλεσμα ο πραγματικός χρόνος κύκλου να είναι 22 λεπτά. Στο κόστος ανά παραγγελία, η μεταβολή εκτιμάται από 24.27 € σε 10.60 €, δηλαδή κατά περίπου 56%. Η βασική πηγή βελτίωσης είναι η μείωση χειροκίνητων ενεργειών (manual stock check, σειριακή διεκπεραίωση) και η παράλληλη εκτέλεση ενεργειών μέσω gateways, που περιορίζει τον “νεκρό χρόνο” (Dumas et al., 2018· Mendling et al., 2020).

7.5 Συγκριτική αξιολόγηση

Η σύγκριση As-Is/To-Be δεν περιορίζεται μόνο στο χρόνο. Στην πράξη, η μετάβαση σε To-Be επηρεάζει τρεις κρίσιμες διαστάσεις: (i) ποιότητα/ακρίβεια, (ii) ορατότητα και έλεγχο (monitoring), (iii) εμπειρία πελάτη (customer experience, εμπειρία του πελάτη). Ο real-time έλεγχος αποθέματος μειώνει περιπτώσεις λανθασμένης

διαθεσιμότητας, ενώ η “guided” συλλογή/συσκευασία μειώνει λάθη picking. Παράλληλα, η ενσωμάτωση με carrier APIs και ERP επιτρέπει συνεπή ιχνηλασιμότητα (traceability) και αυτοματοποίηση τυποποιημένων ενεργειών (van der Aalst, 2016; Vom Brocke & Rosemann, 2015).

Σε επίπεδο Industry 4.0, το To-Be μοντέλο είναι πιο συμβατό με data-driven λογική: οι μετρήσεις (KPIs) μπορούν να τροφοδοτούν συνεχή βελτιστοποίηση (continuous improvement) μέσω process mining ή αναλυτικών dashboards· εδώ τα ευρήματα του process mining σε συνδυασμό με τους δείκτες (KPIs) είναι αυτά που οδηγούν τη βελτιστοποίηση, καθώς το process mining αποκαλύπτει τα πραγματικά μοτίβα και τις αποκλίσεις, ενώ τα KPIs ποσοτικοποιούν την επίδοση. Περαιτέρω βελτιστοποίηση θα μπορούσε να επιτευχθεί με χρήση Τεχνητής Νοημοσύνης π.χ. προγνωστική πρόβλεψη ζήτησης για δυναμικό ανεφοδιασμό, ή έξυπνη δρομολόγηση αποστολών και με αξιοποίηση λύσεων υπολογιστικού νέφους για ελαστική κλιμάκωση σε περιόδους αιχμής. Με αυτόν τον τρόπο, ο οργανισμός περνά από “στατική τεκμηρίωση” σε δυναμική διαχείριση ροών, όπου οι αποφάσεις υποστηρίζονται από δεδομένα και όχι από ad-hoc εκτιμήσεις (van der Aalst, 2016; Mendling et al., 2020).

Πρέπει ωστόσο να σημειωθεί ότι η μετάβαση από το As-Is στο To-Be δεν είναι δωρεάν: απαιτεί επενδύσεις σε υλοποίηση αυτοματοποιημένων δραστηριοτήτων, διασυνδέσεις μεταξύ συστημάτων (WMS, ERP, carrier APIs), ενίσχυση της υποδομής και εκπαίδευση του προσωπικού στα νέα εργαλεία. Επομένως, η σκοπιμότητα της μετάβασης θα πρέπει να αξιολογείται με όρους απόδοσης επένδυσης (ROI – return on investment): δεδομένου ότι τα οφέλη (μείωση χρόνου κατά ~62% και κόστους κατά ~56% ανά παραγγελία) είναι σαφή και επαναλαμβανόμενα, εφόσον το αρχικό κόστος μετάβασης παραμένει ανεκτό, ακόμη και για μια μικρομεσαία επιχείρηση, η επένδυση αποσβένεται σχετικά γρήγορα και καθίσταται συμφέρουσα. Ιδίως για ΜμΕ, προτείνεται σταδιακή υιοθέτηση (ξεκινώντας από τα βήματα με το μεγαλύτερο όφελος) ώστε να κατανέμεται το κόστος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8 – ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

8.1 Κύρια ευρήματα και συνεισφορά

Η παρούσα εργασία ανέδειξε ότι το Business Process Management (BPM) λειτουργεί ως «ραχοκοκαλιά» συντονισμού σε περιβάλλοντα ψηφιακού μετασχηματισμού, επειδή μεταφράζει τη στρατηγική σε ροές εργασίας, κανόνες, ρόλους και μετρήσιμους στόχους, δημιουργώντας κοινή γλώσσα ανάμεσα σε τεχνικές και διοικητικές ομάδες (Dumas, La Rosa, Mendling, & Reijers, 2018; Vom Brocke & Rosemann, 2015).

Στο επίπεδο της ανάλυσης και κατηγοριοποίησης, το Κεφάλαιο 4 ανέπτυξε τρισδιάστατη ταξινόμηση που διαχωρίζει την τεχνολογική βάση, τη δραστηριότητα του κύκλου ζωής BPM και τη λειτουργία ή εφαρμογή στη Βιομηχανία 4.0. Η διάκριση αυτή επιτρέπει σε μία προσέγγιση να περιγράφεται με πολλαπλές, ανεξάρτητες ετικέτες σε κάθε διάσταση. Η συγκριτική ανάλυση του Κεφαλαίου 5 έδειξε ότι οι οικογένειες έχουν συμπληρωματικές ισχυρές πλευρές, ενώ η εφικτότητα υλοποίησης, η επεξηγησιμότητα και η ασφάλεια παραμένουν ουσιώδεις περιορισμοί.

Σε τεχνολογικό επίπεδο, αναδείχθηκε η μετάβαση από παραδοσιακό BPM προς BPM με ενισχυμένη ευφυΐα (AI-enhanced BPM), όπου τεχνικές όπως η εξόρυξη διαδικασιών, η ανίχνευση ανωμαλιών και η προγνωστική ανάλυση επιτρέπουν στις διαδικασίες να «μαθαίνουν» από τα δεδομένα και να αναπροσαρμόζονται σε πραγματικό χρόνο (van der Aalst, 2016; Mendling et al., 2020).

Παράλληλα, στο πλαίσιο Industry 4.0, η εργασία ανέδειξε ότι η αξία του BPM μεγιστοποιείται όταν λειτουργεί ως μηχανισμός ενοποίησης κυβερνο-φυσικών συστημάτων (CPS), αισθητήρων, πλατφορμών δεδομένων και επιχειρησιακών εφαρμογών (ERP/CRM/WMS), επιτρέποντας end-to-end ορατότητα και τυποποιημένη διακυβέρνηση (Liao, Deschamps, Loures, & Ramos, 2017; Dumas et al., 2018).

Τέλος, το mini case study του Κεφαλαίου 7 τεκμηρίωσε πρακτικά ότι η μετάβαση από As-Is σε To-Be διαδικασίες μπορεί να αποδώσει χειροπιαστά οφέλη (μείωση καθυστερήσεων, περιορισμό χειροκίνητων βημάτων, καλύτερη ενημέρωση πελάτη), εφόσον η βελτίωση βασίζεται σε κανόνες, σημεία ελέγχου και αυτοματοποίηση κρίσιμων ενεργειών (Recker, 2020; Dumas et al., 2018) ενώ συνοδεύεται από κατάλληλες επενδύσεις. Για επιχειρήσεις με μικρό προϋπολογισμό, συνίσταται μια σταδιακή μετάβαση στο To-Be μοντέλο.

8.2 Περιορισμοί

Οι περιορισμοί της εργασίας οργανώνονται σε πέντε κατηγορίες: δεδομένα, γενίκευση, υλοποίηση, ασφάλεια και συμμόρφωση, καθώς και ενσωμάτωση Τεχνητής Νοημοσύνης. Η διάκριση αυτή χρησιμοποιείται τόσο στο κυρίως κείμενο όσο και στον Πίνακα 8.1, ώστε να μην υπάρχει ασυνέπεια μεταξύ της αναλυτικής συζήτησης και της συνοπτικής αποτύπωσης.

Πρώτον, δεν χρησιμοποιήθηκαν πραγματικά event logs ή ιστορικά KPI από οργανισμό. Οι βαθμολογίες του Κεφαλαίου 5 προκύπτουν από συστηματική κωδικοποίηση της βιβλιογραφίας και όχι από άμεση μέτρηση παραγωγικής επίδοσης. Δεύτερον, οι εφαρμογές και το mini case study είναι ενδεικτικά και δεν μπορούν να γενικευθούν χωρίς πρόσθετες μελέτες σε διαφορετικούς κλάδους και μεγέθη επιχειρήσεων. Τρίτον, ένα BPMN μοντέλο δεν ισοδυναμεί με εκτελέσιμο σύστημα· απαιτούνται κανόνες, δεδομένα, APIs, δοκιμές και μηχανισμοί παρακολούθησης.

Τέταρτον, η εργασία αναλύει την ασφάλεια και τη συμμόρφωση αλλά δεν υλοποιεί πλήρες threat model ούτε δοκιμές σε παραγωγικό OT/IT περιβάλλον. Πέμπτον, η ενσωμάτωση TN παραμένει περιορισμένη σε βιβλιογραφική αξιολόγηση: δεν εκπαιδεύτηκε μοντέλο με πραγματικά δεδομένα και δεν αξιολογήθηκαν εμπειρικά η ακρίβεια, η μεροληψία, η μετατόπιση δεδομένων ή η επεξηγησιμότητα. Οι περιορισμοί αυτοί δεν αναιρούν τον συνθετικό σκοπό της εργασίας, αλλά οριοθετούν με σαφήνεια το επίπεδο των συμπερασμάτων.

Πίνακας 8.1 – Περιορισμοί της εργασίας και τρόποι μείωσής τους σε μελλοντική επέκταση

Κατηγορία περιορισμού	Τι σημαίνει στην παρούσα εργασία	Τι θα το μείωνε σε επόμενη φάση
Δεδομένα	Απουσία πραγματικών event logs και ιστορικού KPI.	Συλλογή logs από ERP/WMS/CRM και ανάλυση Process Mining.
Γενίκευση	Οι εφαρμογές και τα αποτελέσματα του case study είναι ενδεικτικά.	Πολλαπλές μελέτες περίπτωσης σε διαφορετικούς κλάδους και μεγέθη οργανισμών.
Υλοποίηση	Το BPMN δεν αποτελεί από μόνο του εκτελέσιμη ροή.	Υλοποίηση σε BPMS με κανόνες, δεδομένα, APIs, δοκιμές και παρακολούθηση.
Ασφάλεια και συμμόρφωση	Δεν πραγματοποιήθηκαν threat modeling και δοκιμές σε παραγωγικό OT/IT περιβάλλον.	Έλεγχοι πρόσβασης, τμηματοποίηση, auditing, risk assessment και δοκιμές ανθεκτικότητας.
Τεχνητή Νοημοσύνη	Δεν εκπαιδεύτηκε ή αξιολογήθηκε μοντέλο με πραγματικά δεδομένα.	Εμπειρική αξιολόγηση ακρίβειας, επεξηγησιμότητας, μεροληψίας και μετατόπισης δεδομένων.

8.3 Εμπειρίες και πρακτικές παρατηρήσεις

Οι παρατηρήσεις που ακολουθούν προκύπτουν από την πρακτική εμπειρία μοντελοποίησης κατά την εκπόνηση του mini case study του Κεφαλαίου 7 (σχεδίαση των As-Is/To-Be διαγραμμάτων στο Bizagi) σε συνδυασμό με τις καλές πρακτικές που

εντοπίστηκαν στη βιβλιογραφία. Η εμπειρία της μοντελοποίησης ανέδειξε ένα διαχρονικό μάθημα: το διάγραμμα δεν είναι «έργο τέχνης», είναι συμβόλαιο κατανόησης. Όταν οι ρόλοι, τα γεγονότα εκκίνησης/λήξης και οι αποφάσεις (gateways) δεν ορίζονται με ακρίβεια, ένα BPMN διάγραμμα καταλήγει να περιγράφει ευχές και όχι λειτουργία.

Η εκπόνηση της συστηματικής ανασκόπησης ανέδειξε επίσης ότι η μεγαλύτερη δυσκολία δεν είναι η συγκέντρωση πολλών πηγών αλλά η διατήρηση σταθερών ορισμών και κανόνων κωδικοποίησης. Η ρητή διάκριση πρωτογενών μελετών και υποστηρικτικών ανασκοπήσεων, η τήρηση ενιαίου παρονομαστή 18 μελετών και η εφαρμογή της ίδιας μεθόδου μέσου όρου σε όλα τα επίπεδα ήταν απαραίτητες για να αποφευχθούν αριθμητικές και εννοιολογικές ασυνέπειες. Η εμπειρία αυτή υπογραμμίζει ότι η διαφάνεια του πρωτοκόλλου είναι εξίσου σημαντική με τα τελικά ευρήματα.

Στην πράξη, η πιο συχνή παγίδα είναι η υπερφόρτωση του μοντέλου με λεπτομέρειες που ανήκουν σε επίπεδο εργασιακών οδηγιών (work instructions) και όχι σε επίπεδο επιχειρησιακής διαδικασίας. Η καλή πρακτική είναι να κρατάμε το βασικό «σκελετό» ορατό και να μεταφέρουμε τις λεπτομέρειες σε τεκμηρίωση, κανόνες και δεδομένα (Dumas et al., 2018).

Δεύτερη πρακτική παρατήρηση είναι ότι τα πραγματικά οφέλη εμφανίζονται όταν ο οργανισμός συμφωνήσει πρώτα σε μετρικές (KPI definitions) και πηγές δεδομένων. Χωρίς κοινό ορισμό για χρόνο κύκλου, χρόνο αναμονής, ποσοστά σφαλμάτων ή ρυθμό επανεργασιών, η «βελτιστοποίηση» γίνεται θέμα γνώμης και όχι απόδειξης (van der Aalst, 2016).

Τρίτον, η αυτοματοποίηση πρέπει να εφαρμόζεται εκεί όπου υπάρχει “περισσότερος πόνος”: σε σημεία συμφόρησης, σε χειροκίνητα βήματα που παράγουν λάθη και σε ενημερώσεις κατάστασης προς πελάτες/χρήστες. Στο To-Be μοντέλο της μελέτης περίπτωσης, η σύνδεση με αποθήκη (WMS/IoT) για έλεγχο αποθέματος, η παραγωγή e-invoice από ERP και η κράτηση αποστολής μέσω carrier API αποτελούν παραδείγματα «στρατηγικής αυτοματοποίησης», όχι απλής ψηφιοποίησης (Liao et al., 2017; Mendling et al., 2020).

Τέλος, από πλευράς εργαλείων, αν και ένας οργανισμός συνήθως βασίζεται σε μία ενιαία σουίτα BPMS (οπότε ο BPMN modeler είναι κατά κανόνα μοναδικός), η εμπειρία έδειξε ότι σε περιπτώσεις μετάβασης μεταξύ εργαλείων ή ανταλλαγής μοντέλων με τρίτους (π.χ. συμβούλους, ακαδημαϊκό περιβάλλον) η εξαγωγή/εισαγωγή BPMN μεταξύ διαφορετικών εργαλείων μπορεί να επιφέρει σφάλματα XML ή ασυμβατότητες. Πρακτικά, αυτό σημαίνει ότι χρειάζονται: (α) έλεγχος συμβατότητας BPMN 2.0, (β) μικρά και καθαρά namespaces (χώροι ονομάτων), (γ) δοκιμή import/export από νωρίς, ώστε να μη χάνεται χρόνος όταν το διάγραμμα έχει ήδη μεγαλώσει.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ahmad, T., & Van Looy, A. (2020). Business Process Management and Digital Innovations: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 12(17), 6827.
- Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787–2805.
- AWS. (n.d.). AWS Step Functions. Amazon Web Services.
- Bosch Group. (2022). *Smart manufacturing with ARIS BPM and IoT integration in Industry 4.0*. Retrieved from <https://www.bosch.com/stories/industry-4-0/>
- Braun, V., & Clarke, V. (2006). Using thematic analysis in psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2), 77–101.
- Brettel, M., Friederichsen, N., Keller, M., & Rosenberg, M. (2014). How virtualization, decentralization and network building change the manufacturing landscape: An Industry 4.0 Perspective. *International Journal of Mechanical, Industrial Science and Engineering*, 8(1), 37–44.
- Brocke, J. vom, & Rosemann, M. (2015). *Handbook on Business Process Management 1–2* (2nd ed.). Springer.
- Buyya, R., Yeo, C. S., Venugopal, S., Broberg, J., & Brandic, I. (2009). Cloud computing and emerging IT platforms: Vision, hype, and reality for delivering computing as the 5th utility. *Future Generation Computer Systems*, 25(6), 599–616.
- Czvetkó, T., Kummer, A., Ruppert, T., & Abonyi, J. (2023). Data-driven business process management-based development of Industry 4.0 solutions. *Journal of Industrial Information Integration*, 40, 100499.
- Dallasega, P., Rauch, E., & Linder, C. (2018). Industry 4.0 as enabler for a collaborative and decentralized production in a smart supply chain. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 144–150.
- Dumas, M., La Rosa, M., Mendling, J., & Reijers, H. A. (2018). *Fundamentals of Business Process Management* (2nd ed.). Springer.
- Fatorachian, H., & Kazemi, H. (2021). *Impact of Industry 4.0 on supply chain performance*. *Production Planning & Control*, 32(1), 63–81.
- Fernández-Caramés, T. M., & Fraga-Lamas, P. (2018). A review on human-centered IoT-connected smart labels for Industry 4.0. *IEEE Access*, 6, 25939–25957.
- Fernández-Caramés, T. M., & Fraga-Lamas, P. (2018). A review on the application of blockchain to the next generation of cybersecure industry 4.0 smart factories. *IEEE Access*, 7, 45201–45218.

- Fraunhofer IPA. (2021). *Business Process Management in the Context of Industry 4.0 – A Research Agenda*. Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation.
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., & Barlow, C. (2020). Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*, 8, 108952–108971
- Ghobakhloo, M. (2020). *Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability*. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119869
- Hammer, M., & Champy, J. (1993). *Reengineering the Corporation: A Manifesto for Business Revolution*. Harper Business.
- Hitpass, B., & Astudillo, H. (2019). Editorial: Industry 4.0 Challenges for Business Process Management and Electronic-Commerce. *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research*, 14(1), 1–2.
- Hofstede, A. H. M. ter, Aalst, W. M. P. van der, Adams, M., & Russell, N. (Eds.). (2010). *Modern business process automation: YAWL and its support environment* (1st ed.). Springer.
- IBM. (2024). What is Industry 4.0?
- Ivanov, D., Dolgui, A., & Sokolov, B. (2021). The impact of digital technology and Industry 4.0 on the ripple effect and supply chain risk analytics. *International Journal of Production Research*, 59(5), 1626–1642.
- Kamble, S. S., Gunasekaran, A., & Gawankar, S. A. (2018). Sustainable Industry 4.0 framework. *International Journal of Production Research*, 56(1–2), 102–116.
- Kerremans, M. (2020). Hype Cycle for Business Process Management, 2020. *Gartner Research*.
- Kerremans, M., Harmon, P., & Dumas, M. (2022). *Future of Business Process Management: Towards Hyperautomation*. Gartner Research.
- Khider, H., Meziane, A., & Hammoudi, S. (2024). The Future of BPM in the Era of Industry 4.0: Exploring New Opportunities for Innovation. *International Journal of Information Systems and Digital Transformation*, 12(1), 1–18.
- Kitchenham, B., & Charters, S. (2007). *Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering*. EBSE Technical Report, Keele University.
- Ko, R. K. L., Lee, S. S. G., & Lee, E. W. (2009). Business process management (BPM) – An overview. *Business Process Management Journal*, 15(1), 10–28
- Kusiak, A. (2018). Smart manufacturing must embrace big data. *Nature*, 554(7691), 23–25.

- 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
- Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.-A. (2014). A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*, 3, 18–23.
- Liakos, C., Panagopoulos, A. C., & Karkazis, P. (2022). Smart Business Processing in Industry 4.0. *Proceedings of the 26th Pan-Hellenic Conference on Informatics (PCI)*.
- Liao, Y., Deschamps, F., Loures, E. D. F. R., & Ramos, L. F. P. (2017). Past, present and future of Industry 4.0 – A systematic literature review and research agenda.
- Lu, Y. (2017). Industry 4.0: A survey on technologies, applications and open research issues. *Journal of Industrial Information Integration*, 6, 1–10
- Marrella, A., Dumas, M., & Federici, M. (2023). *Process Mining for Industry 4.0: Opportunities and Challenges*. *Computers in Industry*, 148, 103807
- Mendling, J., et al. (2020). (Selected works on BPM and digital innovation/AI-enhanced BPM).
- Mendling, J., Pentland, B. T., & Recker, J. (2020). *Building a complementary agenda for business process management and digital innovation*. *European Journal of Information Systems*, 29(3), 208–219.
- Microsoft. (n.d.). Power Automate documentation. Microsoft Learn.
- Moher, D., Liberati, A., Tetzlaff, J., Altman, D. G., & The PRISMA Group. (2009). Preferred reporting items for systematic reviews and meta-analyses: The PRISMA Statement. *PLOS Medicine*, 6(7), e1000097.
- Monostori, L., Kádár, B., Bauernhansl, T., et al. (2016). Cyber-physical systems in manufacturing. *CIRP Annals*, 65(2), 621–641.
- Nguyen, H. D., Tran, K. P., Zeng, X., Koehl, L., & Perwuelz, A. (2019). Industrial Internet of Things, Big Data, and Artificial Intelligence in the Smart Factory: A Survey and Perspective. *Proceedings of the ISSAT International Conference on Data Science in Business, Finance and Industry*.
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, 372, n71.
- Panagopoulos, A. C., Liakos, C., & Karkazis, P. (2022). Smart factories and BPMN in real-time environments. *ACM Proceedings, PCI 2022*.
- Petticrew, M., & Roberts, H. (2006). *Systematic Reviews in the Social Sciences: A Practical Guide*. Blackwell Publishing.

- Piccarozzi, M., Aquilani, B., & Gatti, C. (2018). Industry 4.0 in Management Studies: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 10(10), 3821.
- Puspitasari, T., & Susyanti, J. (2024). Review of Literature Studies Regarding the Implementation of Business Process Management. *Green Inflation*, 1(3).
- Rajkumar, R., Lee, I., Sha, L., & Stankovic, J. (2010). Cyber-Physical Systems: The next computing revolution. In *Proceedings of the 47th Design Automation Conference* (pp. 731–736).
- Recker, J. (2020). *Scientific Research in Information Systems: A Beginner's Guide* (2nd ed.). Springer.
- Russell, S. J., & Norvig, P. (2021). *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (4th ed.). Pearson.
- Santos, R., Loures, E., & Piechnicki, F. (2017). Opportunities assessment for exploring Industry 4.0 in Brazilian manufacturing industry. *IFAC-PapersOnLine*, 50(1), 12334–12339.
- 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.
- Siemens AG. (2021). *Digital Enterprise: Implement now with the Digital Enterprise Portfolio*. Retrieved from <https://new.siemens.com/global/en/company/topic-areas/digital-enterprise.html>
- Sisinni, E., Saifullah, A., Han, S., Jennehag, U., & Gidlund, M. (2018). Industrial Internet of Things: Challenges, opportunities, and directions. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14(11), 4724–4734
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333–339.
- Stjepić, A. M., Ivančić, L., & Suša Vugec, D. (2020). Mastering digital transformation through business process management: Investigating alignments, goals, orchestration, and roles. *Journal of Entrepreneurship, Management and Innovation*, 16(1), 123–148
- Szelągowski, M., & Berniak-Woźny, J. (2024). BPM challenges, limitations and future development directions – A systematic literature review. *Business Process Management Journal*, 30(2), 505–557.
- Titi Puspitasari & Susyanti. (2024). *Review of Literature Studies Regarding the Implementation of Business Process Management*.
- 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.

- Tupa, J., & Steiner, F. (2019). Industry 4.0 and business process management. *Tehnički glasnik*, 13(4), 349–355.
- van der Aalst, W. M. P. (2016). *Process Mining: Data Science in Action* (2nd ed.). Springer.
- Vom Brocke, J., & Rosemann, M. (Eds.). (2015). *Handbook on Business Process Management 1: Introduction, Methods, and Information Systems* (2nd ed.). Springer.
- Wamba, S. F., Akter, S., Edwards, A., Chopin, G., & Gnanzou, D. (2017). How ‘big data’ can make big impact. *International Journal of Production Economics*, 165, 234–246.
- Zhou, K., Liu, T., & Zhou, L. (2015). Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. In *2015 12th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)* (pp. 2147–2152). IEEE.