



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΙΩΑΝΝΙΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΤΗΛΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ
ΠΜΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΔΙΚΤΥΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΚΑΙ ΠΙΛΟΤΙΚΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΨΗΦΙΑΚΟΥ
ΔΙΑΒΑΤΗΡΙΟΥ ΠΡΟΪΟΝΤΟΣ (DPP) ΓΙΑ ΤΗΝ ΤΕΚΜΗΡΙΩΣΗ ΚΑΙ
ΑΥΤΟΜΑΤΟΠΟΙΗΣΗ ΣΥΝΤΗΡΗΣΕΩΝ ΣΕ ΚΤΙΡΙΑ ΚΑΙ
ΥΠΟΔΟΜΕΣ

Κωνσταντίνος Γκούβας

Επιβλέπων: Χρυσόστομος Στύλιος Καθηγητής

Συνεπιβλέπων: Δρ. Φοίβος Ψαρομμάτης

Άρτα, Ιανουάριος, 2026

**ADAPTATION AND PILOT IMPLEMENTATION OF THE
DIGITAL PRODUCT PASSPORT (DPP) FOR THE
DOCUMENTATION AND AUTOMATION OF MAINTENANCE IN
BUILDINGS AND INFRASTRUCTURE**

Εγκρίθηκε από τριμελή εξεταστική επιτροπή

Άρτα, 29 Ιανουαρίου 2026

ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗΣ

1. Επιβλέπων καθηγητής
Χρυσόστομος Στύλιος
Καθηγητής
2. Μέλος επιτροπής
Λιάγκου Βάσια
Αναπληρώτρια Καθηγήτρια
3. Μέλος επιτροπής
Δρ. Φοίβος Ψαρομμάτης

© Γκουβας, Κωνσταντίνος, 2026.

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος. All rights reserved.

Δήλωση μη λογοκλοπής

Δηλώνω υπεύθυνα και γνωρίζοντας τις κυρώσεις του Ν. 2121/1993 περί Πνευματικής Ιδιοκτησίας, ότι η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία είναι εκ ολοκλήρου αποτέλεσμα δικής μου ερευνητικής εργασίας, δεν αποτελεί προϊόν αντιγραφής ούτε προέρχεται από ανάθεση σε τρίτους. Όλες οι πηγές που χρησιμοποιήθηκαν (κάθε είδους, μορφής και προέλευσης) για τη συγγραφή της περιλαμβάνονται στη βιβλιογραφία.

Γκούβας, Κωνσταντίνος

Υπογραφή

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή κ. Χρυσόστομο Στύλιο για την καθοδήγηση, τη στήριξη και την άμεση ανταπόκρισή του σε κάθε δυσκολία που προέκυψε. Η συμβολή του υπήρξε ιδιαίτερα πολύτιμη, όχι μόνο κατά την εκπόνηση της διπλωματικής εργασίας, αλλά και καθ' όλη τη διάρκεια του μεταπτυχιακού προγράμματος.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον Δρ. κ. Φοίβο Ψαρομμάτη, του οποίου η υποστήριξη από το στάδιο της ανάθεσης έως και την ολοκλήρωση της εργασίας υπήρξε καθοριστική. Οι παρατηρήσεις, οι κατευθύνσεις και η διαρκής διαθεσιμότητά του συνέβαλαν ουσιαστικά στη διαμόρφωση και ολοκλήρωση της παρούσας μελέτης.

Ιδιαίτερη μνεία αξίζει στη μεγάλη οικογένεια της Ελληνικής Πολεμικής Αεροπορίας. Εκφράζω την ειλικρινή μου ευγνωμοσύνη στους συναδέλφους μου για την κατανόηση, τη στήριξη και τη συνεργασία τους καθ' όλη τη διάρκεια του προγράμματος.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω από καρδιάς την οικογένειά μου. Τις τρεις κόρες μου, που στερήθηκαν τον χρόνο μου το τελευταίο διάστημα, καθώς και τη σύζυγό μου, Αφροδίτη, για την αμέριστη κατανόηση, υπομονή και παρότρυνσή της. Χωρίς τη στήριξή τους, η ολοκλήρωση του παρόντος μεταπτυχιακού προγράμματος δεν θα ήταν εφικτή.

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η παρούσα εργασία διερευνά τη δυνατότητα εφαρμογής της έννοιας του Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος (Digital Product Passport – DPP) στη διαχείριση κτιριακών υποδομών και τεχνικών συστημάτων των Ενόπλων Δυνάμεων της Ελλάδας. Η μελέτη εστιάζει κυρίως στις διαδικασίες συντήρησης, στη διασφάλιση της ιχνηλασιμότητας και στη συμμόρφωση με σύγχρονα κανονιστικά και οργανωτικά πλαίσια. Κεντρικός στόχος είναι η διερεύνηση ενός ενοποιημένου ψηφιακού πλαισίου που επιτρέπει τη σύνδεση στατικών δεδομένων περιουσιακών στοιχείων με δυναμικές πληροφορίες λειτουργίας, συντήρησης και κατάστασης.

Η μεθοδολογία βασίζεται στον σχεδιασμό και την πιλοτική υλοποίηση μιας εφαρμογής DPP, η οποία ενσωματώνει δεδομένα από συστήματα ERP, αναφορές σε μοντέλα BIM και βασικές ροές δεδομένων IoT. Η αξιολόγηση της λειτουργικής κατάστασης των συσκευών και της συνολικής επιχειρησιακής εικόνας πραγματοποιείται μέσω μηχανισμών βασισμένων σε κανόνες, ειδοποιήσεις και ιστορικά αρχεία συντήρησης, χωρίς τη χρήση αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης ή προγνωστικών μοντέλων. Η επιλογή αυτή αποσκοπεί στη διατήρηση της διαφάνειας, της ερμηνευσιμότητας και της αποδοχής του συστήματος σε περιβάλλοντα αυξημένων απαιτήσεων ασφάλειας.

Τα αποτελέσματα της πιλοτικής εφαρμογής καταδεικνύουν ότι το DPP μπορεί να λειτουργήσει ως κεντρικός μηχανισμός ενοποίησης δεδομένων κύκλου ζωής, συμβάλλοντας στη μείωση του διοικητικού φόρτου, στη βελτίωση της τεκμηρίωσης των παρεμβάσεων συντήρησης και στην ενίσχυση της επιχειρησιακής εποπτείας των υποδομών. Παράλληλα, αναδεικνύονται οι περιορισμοί της πιλοτικής προσέγγισης, καθώς και οι δυνατότητες μελλοντικής επέκτασης του συστήματος, όπως η ενσωμάτωση προγνωστικής συντήρησης και μηχανισμών ενίσχυσης της ακεραιότητας των δεδομένων.

Λέξεις-κλειδιά: Ψηφιακό Διαβατήριο Προϊόντος, Διαχείριση Υποδομών, Συντήρηση Κτιρίων, IoT, ERP–B

ABSTRACT

This thesis explores the application of the Digital Product Passport (DPP) concept to the management of building infrastructure and technical systems within the Greek Armed Forces. The focus is placed on maintenance processes, lifecycle traceability, and alignment with contemporary regulatory requirements. The study investigates whether a unified digital framework can effectively connect static asset documentation with dynamic information related to operation, maintenance activities, and system status.

The research is based on the design and pilot implementation of a DPP-oriented application that integrates data from ERP systems, references to BIM models, and limited IoT data streams. The pilot does not employ artificial intelligence or predictive algorithms; instead, device condition and operational status are evaluated through rule-based indicators, alert mechanisms, and historical maintenance records. This approach was selected to ensure transparency, interpretability, and suitability for environments with heightened security constraints.

The findings indicate that the DPP framework can serve as a central mechanism for lifecycle data integration, supporting improved documentation of maintenance actions, reduced administrative effort, and enhanced operational oversight of infrastructure assets. At the same time, the pilot implementation highlights existing limitations related to scale and data maturity, while outlining clear pathways for future system evolution, including the potential integration of predictive maintenance techniques and enhanced data integrity mechanisms.

Keywords: Digital Product Passport, Infrastructure Management, Building Maintenance, IoT, ERP–BIM Integration

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	iv
ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	v
ABSTRACT	vi
ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ	vii
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ	x
ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ/ΕΙΚΟΝΩΝ.....	xi
ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ.....	xii
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	xiii
1. Θεωρητικό Υπόβαθρο.....	1
1.1 Τι είναι το Ψηφιακό Διαβατήριο Προϊόντος (DPP)	1
1.2 Παγκόσμιο και Ευρωπαϊκό Τοπίο Πολιτικής.....	3
1.3 Χρησιμότητα και Προοπτικές των Ψηφιακών Διαβατηρίων Προϊόντων.....	6
1.4 Τεχνολογίες που Υποστηρίζουν το DPP	9
1.5 Εφαρμογές DPP σε Κατασκευές και Υποδομές.....	12
1.6 Προκλήσεις και Εμπόδια στην Υλοποίηση των Ψηφιακών Διαβατηρίων Προϊόντων (DPPs).....	15
2. Απαιτήσεις Ελληνικών Ενόπλων Δυνάμεων.....	18
2.1 Χαρακτηριστικά Υποδομών & Κτιρίων Στρατιωτικών Χώρων.....	18
2.2 Θέματα Ασφάλειας και Διαθεσιμότητας.....	21
2.3 Συμμόρφωση με Κανονιστικά και Θεσμικά Πλαίσια	23
2.4 Προκλήσεις για την Εφαρμογή του DPP στις Ελληνικές Ένοπλες Δυνάμεις	25
2.4.1 Περιορισμοί Ασφαλείας.....	25
2.4.2 Υφιστάμενα (Παρωχημένα) Πληροφοριακά Συστήματα και Υποδομές.....	28
3. Προτεινόμενη Αρχιτεκτονική.....	32
3.1 Διάγραμμα Συστήματος.....	32

3.2 Τεχνολογίες που θα Χρησιμοποιηθούν	36
3.3 Μοντέλο Δεδομένων DPP	39
3.4 Σύνδεση με ERP ή BIM Πλατφόρμες.....	48
3.4.1 Μηχανισμός Διασύνδεσης ERP–BIM–DPP	52
3.5 Υπολογισμός Λειτουργικού Δείκτη Κινδύνου (Risk Index)	54
3.6 Ρόλοι Χρηστών και Επίπεδα Αλληλεπίδρασης με το DPP	57
4. Πιλοτική Εφαρμογή.....	59
4.1 Επιλογή Περιοχής/Κτιρίου για Δοκιμή	61
4.2 Συλλογή Δεδομένων	65
4.2.1 Αρχικός Κατάλογος και Χαρτογράφηση Περιουσιακών Στοιχείων.....	65
4.2.2 Συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο	67
4.3 Δημιουργία DPP και Ενσωμάτωση Maintenance Data	69
4.4 Κανόνες, Ειδοποιήσεις και Ροές Υποστήριξης Συντήρησης	72
4.5 Σενάρια Χρήσης (Use Cases).....	75
4.5.1 Κοινές Εργασίες συντήρησης.....	76
4.5.2 Διαδικασίες επείγουσας επισκευής	78
5. Υλοποίηση και Παρουσίαση της Πιλοτικής Εφαρμογής Ψηφιακού Διαβατηρίου	
Προϊόντος.....	83
5.1 Σκοπός και ρόλος της εφαρμογής στην πιλοτική υλοποίηση	83
5.2 Αρχιτεκτονική της Εφαρμογής και Τεχνολογική Υλοποίηση	84
5.2.1 Γενική αρχιτεκτονική συστήματος.....	84
5.2.2 Δομή και λογική του JavaFX Client.....	86
5.2.3 Ασφάλεια και Έλεγχος Πρόσβασης στον JavaFX Client.....	88
5.2.4 Backend Αρχιτεκτονική και Διαχείριση Επιχειρησιακής Λογικής	90
5.3 Διαλειτουργικότητα με BIM και Συσχέτιση Περιουσιακών Στοιχείων	93
5.4 Κύριες λειτουργικές ενότητες της εφαρμογής	95
5.4.1 Πίνακας Επισκόπησης Συστήματος (Dashboard) και Εκτίμηση Κινδύνου	95
5.4.2 Διαχείριση και Προβολή Συσκευών (Devices).....	103

5.4.3 Ιστορικό Συντήρησης (Maintenance Logs).....	104
5.4.4 Συμβάντα και ειδοποιήσεις (Alerts)	105
5.5 Ενσωμάτωση δεδομένων IoT στην εφαρμογή	107
5.6 Υπολογισμός συνολικής κατάστασης και δεικτών κινδύνου.....	109
5.7 Συνοπτική αξιολόγηση λειτουργικότητας εφαρμογής	112
6. Αξιολόγηση και Μελλοντικές Προοπτικές.....	113
6.1 Οφέλη από την Υιοθέτηση του DPP.....	113
6.1.1 Αύξηση της Λειτουργικής Αποδοτικότητας	113
6.1.2 Βελτιωμένη Διαφάνεια και Ιχνηλασιμότητα.....	116
6.2 Προτάσεις για Μελλοντική Επέκταση	119
6.2.1 Τεχνητή Νοημοσύνη και Προγνωστική Συντήρηση	119
6.2.2 Χρήση Τεχνολογιών Blockchain για Ενίσχυση Ακεραιότητας και Διαλειτουργικότητας.....	120
6.2.3 Μελλοντική επέκταση του DPP σε όλους τους κλάδους των Ενόπλων Δυνάμεων.....	122
6.3 Περιορισμοί και Μεθοδολογικές Παραδοχές.....	124
6.4 Σύνοψη των Βασικών Ευρημάτων	127
7 Συμπέρασμα.....	130
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ.....	132

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1.1 Χρησιμότητα των Ψηφιακών Διαβατηρίων Προϊόντων.....	7
Πίνακας 1.2. Προοπτικές των Ψηφιακών Διαβατηρίων Προϊόντων.....	8
Πίνακας 1.3. Τεχνολογίες που Υποστηρίζουν τα Ψηφιακά Διαβατήρια Προϊόντων.....	10
Πίνακας 1.4 Παραδείγματα εφαρμογής Ψηφιακών Διαβατηρίων Προϊόντων σε κατασκευές και υποδομές.....	14
Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικά Κτιρίων και Υποδομών Στρατιωτικών Χώρων.....	21
Πίνακας 4.1 Σενάρια Χρήσης.....	76
Πίνακας 6.1 Περιορισμοί, Επιπτώσεις και Μελλοντική Αντιμετώπιση της Προτεινόμενης Προσέγγισης DPP.....	128

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΩΝ/ΕΙΚΟΝΩΝ

Διάγραμμα 3.1: Προτεινόμενη Υβριδική Αρχιτεκτονική Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντων (DPP) για Στρατιωτικές Υποδομές.....	34
Διάγραμμα 3.2: Εννοιολογικό μοντέλο δεδομένων του Digital Product Passport (DPP).....	41
Διάγραμμα 3.3. Τεχνική διασύνδεση συστημάτων ERP και BIM με τον πυρήνα του Digital Product Passport (DPP) μέσω επιπέδου ολοκλήρωσης.....	54
Διάγραμμα 4.1 Λογική αρχιτεκτονική πιλοτικής εφαρμογής DPP σε στρατιωτική Υποδομή.....	61
Διάγραμμα 4.2 Διάγραμμα Ροής Πιλοτικής Εφαρμογής DPP.....	65
Διάγραμμα 5.1 Εννοιολογική απεικόνιση του ρόλου της εφαρμογής στην πιλοτική υλοποίηση του Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος (DPP).....	84
Διάγραμμα 5.2 Γενική Αρχιτεκτονική της Εφαρμογής.....	87
Διάγραμμα 5.3 Δομή και αρχιτεκτονική του JavaFX Client στο πλαίσιο του DPP.....	88
Διάγραμμα 5.4 Διαστρωματωμένη αρχιτεκτονική backend της πιλοτικής εφαρμογής DPP.....	92
Διάγραμμα 5.5: Διάγραμμα ροής λειτουργίας του Dashboard της πιλοτικής εφαρμογής DPP	98
Εικόνα 5.1 Πίνακας Επισκόπησης Συστήματος (Dashboard) και Εκτίμηση Κινδύνου..	97
Διάγραμμα 5.6 Ροή αλληλεπίδρασης χρήστη με το DPP μέσω σάρωσης QR και διαχείρισης συντήρησης.....	103
Εικόνα 5.2 Διαχείριση και προβολή συσκευών.....	104
Εικόνα 5.3 Ιστορικό συντήρησης (Maintenance Logs).....	106
Εικόνα 5.4 Συμβάντα και ειδοποιήσεις (Alerts).....	107
Διάγραμμα 5.7 Διάγραμμα ροής δεδομένων IoT στην πιλοτική εφαρμογή του Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος.....	109
Διάγραμμα 5.8: Εννοιολογικό διάγραμμα υπολογισμού του συνολικού Δείκτη Κινδύνου (Risk Index).....	110
Εικόνα 5.5 Καμπύλη Κορεσμού.....	112

ΠΙΝΑΚΑΣ ΣΥΝΤΟΜΟΓΡΑΦΙΩΝ

ΨΔΠ.....	Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος
DPP.....	Digital Product Passport
ESPR.....	Βιώσιμα Προϊόντα της Ευρωπαϊκής Ένωσης
IoT.....	Internet of Things(Διαδικτύου των Πραγμάτων)
BIM.....	Building Information Modeling
BMS.....	Building Management System (Συστήματα Διαχείρισης Κτιρίων)
CMMS	Computerized Maintenance Management System
nZEB	Nearly Zero Energy Buildings
HVAC.....	Heating, ventilation, and air conditioning
NCEAP.....	New Circular Economy Action Plan
GDPR.....	General Data Protection Regulation.
AES.....	Advanced Encryption Standard
ERP.....	Enterprise Resource Planning

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Τα τελευταία χρόνια, η προοδευτική μετάβαση στην ψηφιακή εποχή έχει μεταβάλει σημαντικά τον τρόπο που οι οργανισμοί διαχειρίζονται τις υποδομές και τα περιουσιακά τους στοιχεία. Η ανάγκη για καλύτερη τεκμηρίωση, αποδοτικότερη συντήρηση και μεγαλύτερη διαφάνεια στις διαδικασίες έχει ωθήσει ακόμη και τους στρατιωτικούς οργανισμούς να επανεξετάσουν τα συστήματα παρακολούθησης και διαχείρισης κρίσιμων εγκαταστάσεων. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, η ιδέα του Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος (Digital Product Passport – DPP) αναδεικνύεται ως μια νέα προσέγγιση για τη συστηματική αποθήκευση και ιχνηλάτηση πληροφοριών σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής των προϊόντων και υποδομών.

Το DPP αποτελεί βασικό εργαλείο της Ευρωπαϊκής Πράσινης Συμφωνίας και συνδέεται άμεσα με τη μετάβαση στην κυκλική οικονομία. Όπως αναφέρεται στον Κανονισμό Ecodesign για Βιώσιμα Προϊόντα της Ευρωπαϊκής Ένωσης, το DPP στοχεύει στη συγκέντρωση, αποθήκευση και διάχυση κρίσιμων πληροφοριών σχετικά με ένα προϊόν, από την παραγωγή έως την απόσυρσή του (European Commission, 2022). Η εισαγωγή του DPP βρίσκεται στον πυρήνα της ευρωπαϊκής στρατηγικής για την ψηφιακή μετάβαση και την κυκλική οικονομία, όπως προβλέπεται και από το Digital Europe Programme και τον κανονισμό για βιώσιμα προϊόντα (ESPR). Σύμφωνα με πρόσφατες έρευνες (Psarommatis & May, 2024; Wagner, 2023; Löndahl et al., 2023), η εφαρμογή του DPP ενισχύει την ιχνηλασιμότητα, διευκολύνει την ανακύκλωση και υποστηρίζει τη συμμόρφωση με τις περιβαλλοντικές πολιτικές, προσφέροντας παράλληλα ένα πιο διαφανές και βιώσιμο μοντέλο παραγωγής. Με αυτόν τον τρόπο, το DPP λειτουργεί ως κόμβος πληροφοριών που διευκολύνει τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την επισκευή, την ανακαίνιση, την επαναχρησιμοποίηση ή την ανακύκλωση προϊόντων.

Η συντήρηση των στρατιωτικών εγκαταστάσεων είναι κρίσιμη για τη διατήρηση της επιχειρησιακής ετοιμότητας και της ασφάλειας των Ενόπλων Δυνάμεων. Παρ' όλα αυτά, οι υφιστάμενες διαδικασίες βασίζονται ακόμη σε έντυπα αρχεία και χειροκίνητη τεκμηρίωση, γεγονός που συχνά οδηγεί σε καθυστερήσεις, αυξημένο διοικητικό φόρτο και δυσκολία στην παρακολούθηση του ιστορικού των εργασιών. Ειδικά στις Ελληνικές Ένοπλες Δυνάμεις, όπου οι υποδομές καλύπτουν ένα μεγάλο εύρος εγκαταστάσεων, από διοικητικά κτίρια έως εξειδικευμένες στρατιωτικές εγκαταστάσεις, η αξιοποίηση ενός DPP θα μπορούσε να

προσφέρει σημαντική βελτίωση στον σχεδιασμό και στη λήψη αποφάσεων για τη συντήρηση.

Ένα προσαρμοσμένο DPP για στρατιωτικά περιβάλλοντα μπορεί να συγκεντρώνει και να συνδέει τεκμηρίωση, οδηγίες, ιστορικά συντήρησης και δεδομένα λειτουργίας για κρίσιμα συστήματα. Η ενσωμάτωση τεχνολογιών του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) στο DPP ενισχύει ακόμη περισσότερο αυτή τη δυνατότητα, παρέχοντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για την κατάσταση των εγκαταστάσεων (Kumar et al., 2023). Όπως δείχνουν παραδείγματα από εφαρμογές «έξυπνων πόλεων», η αξιοποίηση αισθητήρων και cloud πλατφορμών μπορεί να οδηγήσει σε πολύτιμες πληροφορίες απόδοσης (Kumar et al., 2023). Παράλληλα, διεθνώς οι στρατιωτικοί οργανισμοί, στο πλαίσιο της προσπάθειας για ενεργειακή ανθεκτικότητα, αναπτύσσουν μικρής κλίμακας δίκτυα τοπικής παραγωγής ενέργειας, δίνοντας έμφαση στην αξιοπιστία και την ασφάλεια (Stamp et al., 2015). Σε αυτό το πεδίο, η χρήση ενός DPP μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στην παρακολούθηση της ενεργειακής απόδοσης κρίσιμων εγκαταστάσεων.

Επιπλέον, χάρη στην τεχνολογία BIM (Building Information Modeling), ο τρόπος με τον οποίο σχεδιάζονται και απεικονίζονται τα κατασκευαστικά έργα έχει μεταμορφωθεί. Η ενσωμάτωση δεδομένων BIM στο DPP θα μπορούσε να επεκτείνει σημαντικά το πεδίο εφαρμογής του, ενσωματώνοντας πληροφορίες για τη γεωμετρία και τα υλικά κάθε υποδομής. Αυτή η ενοποίηση προσφέρει δυνατότητες ανάλυσης φθοράς, παρακολούθησης της δομικής υγείας και πρόβλεψης αναγκών συντήρησης (Toyin & Mewomo, 2022).

Παρά τη διεθνή πρόοδο σε θέματα εφαρμογής DPP στη βιομηχανία, υπάρχει περιορισμένη έρευνα σχετικά με την προσαρμογή του σε στρατιωτικά περιβάλλοντα. Η περιορισμένη έρευνα οφείλεται κυρίως στη δυσκολία πρόσβασης σε δεδομένα στρατιωτικών εγκαταστάσεων και στην ανάγκη συμμόρφωσης με αυστηρά πρωτόκολλα ασφάλειας και διαβάθμισης πληροφοριών. Επομένως, η προσαρμογή του DPP σε αυτό το πλαίσιο απαιτεί ειδική προσέγγιση. Η παρούσα εργασία επιχειρεί να καλύψει αυτό το κενό.

Το ερευνητικό ερώτημα που καθοδηγεί τη μελέτη είναι το εξής:

Σε ποιο βαθμό η προσαρμογή και πιλοτική εφαρμογή ενός Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος μπορεί να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα, τη διαφάνεια και τη βιωσιμότητα των διαδικασιών συντήρησης σε στρατιωτικές υποδομές;

Οι επιμέρους στόχοι της εργασίας περιλαμβάνουν την ανάλυση της υφιστάμενης κατάστασης ως προς τη συντήρηση των υποδομών, τη μελέτη του θεσμικού πλαισίου και των τεχνολογικών απαιτήσεων του DPP, τον σχεδιασμό και την πρόταση κατάλληλης αρχιτεκτονικής συστήματος, την υλοποίηση μιας πιλοτικής εφαρμογής σε επιλεγμένο ενδεικτικό σενάριο στρατιωτικής υποδομής και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων με σκοπό την εξαγωγή χρήσιμων συμπερασμάτων.

Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων, ακολουθήθηκε πολυεπίπεδη μεθοδολογική προσέγγιση. Αρχικά πραγματοποιήθηκε εκτενής βιβλιογραφική έρευνα σχετικά με το DPP, το θεσμικό πλαίσιο και τις τεχνολογίες που το υποστηρίζουν (IoT, BIM). Στη συνέχεια, αναλύθηκαν οι επιχειρησιακές απαιτήσεις των Ενόπλων Δυνάμεων και σχεδιάστηκε ένα πρότυπο DPP μοντέλο, ειδικά διαμορφωμένο για το στρατιωτικό περιβάλλον, το οποίο εφαρμόστηκε πιλοτικά σε επιλεγμένη υποδομή, ώστε να αξιολογηθεί η αποτελεσματικότητά του. Η παρούσα μελέτη βασίζεται σε πιλοτικό και ενδεικτικό σενάριο εφαρμογής. Τα κτιριακά και λειτουργικά χαρακτηριστικά που παρουσιάζονται δεν αντιστοιχούν σε πραγματική εγκατάσταση, αλλά χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για την αξιολόγηση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής και της μεθοδολογίας του συστήματος.

Η συμβολή της παρούσας εργασίας έγκειται στην ανάπτυξη ενός ολοκληρωμένου πλαισίου που συνδυάζει το DPP με τεχνολογίες BIM και IoT, προσαρμοσμένου στις απαιτήσεις στρατιωτικών υποδομών, προσφέροντας ένα πρότυπο για μελλοντικές εφαρμογές στον τομέα της συντήρησης και της βιώσιμης διαχείρισης περιουσιακών στοιχείων.

Η εργασία αποτελείται από πέντε κεφάλαια. Στο πρώτο κεφάλαιο παρουσιάζεται το θεωρητικό υπόβαθρο που αφορά το DPP, τις σχετικές τεχνολογίες και τις πρακτικές συντήρησης. Το δεύτερο κεφάλαιο επικεντρώνεται στις απαιτήσεις και ιδιαιτερότητες των Ελληνικών Ενόπλων Δυνάμεων. Στο τρίτο κεφάλαιο αναπτύσσεται η προτεινόμενη αρχιτεκτονική του συστήματος και το μοντέλο δεδομένων του DPP. Το τέταρτο κεφάλαιο περιγράφει την πιλοτική εφαρμογή σε επιλεγμένη υποδομή, ενώ στο πέμπτο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα, τα συμπεράσματα και οι προτάσεις για μελλοντικές επεκτάσεις.

1. Θεωρητικό Υπόβαθρο

1.1 Τι είναι το Ψηφιακό Διαβατήριο Προϊόντος (DPP)

Η έννοια του Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος (DPP) έχει κερδίσει έδαφος στα ευρωπαϊκά πλαίσια πολιτικής, ιδίως στο πλαίσιο πρωτοβουλιών όπως η ευρωπαϊκή πράσινη συμφωνία και το σχέδιο δράσης για την κυκλική οικονομία, καθώς επιχειρεί να καλύψει το διαχρονικό έλλειμμα διαφάνειας και ιχνηλασιμότητας στον κύκλο ζωής των προϊόντων. Οι δύο αυτές στρατηγικές προσδιορίζουν το DPP ως ένα καινοτόμο ψηφιακό εργαλείο για τη συγκέντρωση και τυποποίηση πληροφοριών σχετικά με τις τεχνικές προδιαγραφές ενός προϊόντος, τη σύνθεση των υλικών, τη δυνατότητα επισκευής, τη δυνατότητα αποσυναρμολόγησης και τον κατάλληλο χειρισμό στο τέλος του κύκλου ζωής του, δηλαδή λειτουργεί ως ένα δομημένο αποθετήριο δεδομένων (Kim et al.,2023).

Από λειτουργική άποψη, προορισμός του DPP είναι να διατηρεί δεδομένα αναγνώσιμα από υπολογιστή, τα οποία αποθηκεύονται είτε σε ασφαλείς διακομιστές είτε σε υποδομές cloud, επιτρέποντας την πρόσβαση σε εξουσιοδοτημένα ενδιαφερόμενα μέρη καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του προϊόντος ή του περιουσιακού στοιχείου. Το πλαίσιο αυτό όχι μόνο υποστηρίζει τη συμμόρφωση με τις περιβαλλοντικές οδηγίες, αλλά επιβάλλει την ιχνηλασιμότητα του προϊόντος σε όλα τα στάδια του κύκλου ζωής του, από την κατασκευή έως τον παροπλισμό του προϊόντος. Ενώ οι πρώτες ιδέες αφορούσαν σε μεγάλο βαθμό καταναλωτικά αγαθά και παραγωγικές εκροές, οι αρχές του είναι εξίσου κατάλληλες για υποδομές και κτιριακά περιουσιακά στοιχεία. Το κλειδί βρίσκεται στην επέκταση των πεδίων δεδομένων του διαβατηρίου ώστε να λαμβάνονται υπόψη τα αρχιτεκτονικά χαρακτηριστικά, το ιστορικό εγκατάστασης, τα αρχεία καταγραφής συντήρησης και οι μετρήσεις επιδόσεων που σχετίζονται με τη διαχείριση των εγκαταστάσεων. Μια τέτοια προσαρμογή θα επέτρεπε τη δυναμική ενημέρωση των πληροφοριών κάθε φορά που ένα στοιχείο του συστήματος επισκευάζεται ή αναβαθμίζεται.

Η αρχιτεκτονική ενός DPP περιλαμβάνει συνήθως διασυνδεδεμένες βάσεις δεδομένων όπου τα δεδομένα μπορούν να αντληθούν από πολλαπλά λειτουργικά υποσυστήματα, όπως συστήματα

διαχείρισης κτιρίων (BMS), συστήματα διαχείρισης ηλεκτρονικής συντήρησης (CMMS) και αισθητήρες IoT, για να παρουσιάσουν ένα ενιαίο προφίλ του περιουσιακού στοιχείου (D'Orazio & Bernardini, 2023). Τα δεδομένα του διαβατηρίου είναι προσβάσιμα μέσω ασφαλών διαδικτυακών διεπαφών και δύνανται να συσχετίζονται με φυσικούς φορείς αναγνώρισης, όπως κωδικούς QR ή ετικέτες NFC, διευκολύνοντας την άμεση πρόσβαση στις πληροφορίες κατά τη διάρκεια επιτόπιων επιθεωρήσεων, εργασιών συντήρησης ή ελέγχων συμμόρφωσης. Αυτό επιτρέπει τη διαφάνεια και την παρακολούθηση των προϊόντων, συμβάλλοντας στην κατεύθυνση της κυκλικής οικονομίας και της βιωσιμότητας (Korpelaar et al., 2023). Το DPP συμβάλλει στη μετάβαση από τη γραμμική στην κυκλική οικονομία, διευκολύνοντας την αναγνώριση και την ανάκτηση κρίσιμων πρώτων υλών μέσω της επαναχρησιμοποίησης και της ανακύκλωσης.

Η ικανότητα διαφάνειας που ενσωματώνεται σε ένα DPP επεκτείνεται επίσης στην παρακολούθηση των περιβαλλοντικών επιδόσεων. Με την καταγραφή των προφίλ κατανάλωσης ενέργειας παράλληλα με τα δομικά χαρακτηριστικά και το ιστορικό των συντηρήσεων, καθίσταται ευκολότερη η ευθυγράμμιση με τους στόχους βιωσιμότητας ή τις κατευθυντήριες γραμμές για συγκεκριμένους τομείς, όπως τα πρότυπα για κτίρια με σχεδόν μηδενική κατανάλωση ενέργειας (nZEB) (Corticos, 2018). Ενώ πολλά συστήματα αυτοματισμού κτιρίων είναι ικανά να παρακολουθούν ενεργά συστήματα, όπως τα συστήματα ελέγχου HVAC ή φωτισμού, οι παθητικές απώλειες ενέργειας συχνά παραγνωρίζονται. Τα κατάλληλα δομημένα αρχεία DPP θα μπορούσαν να καλύψουν αυτό το κενό, εξασφαλίζοντας ότι οι εν λόγω ανεπάρκειες επισημαίνονται κατά τη διάρκεια των ελέγχων. Μια σημαντική σχεδιαστική παραδοχή είναι ότι το DPP δεν θα πρέπει να θεωρείται αποκλειστικά ως ένα στατικό αποθετήριο, αλλά ως μέρος ενός εξελισσόμενου κοινωνικού-τεχνικού οικοσυστήματος που μεταβάλλεται δυναμικά σε συνάρτηση με την τεχνολογική πρόοδο και τις κανονιστικές αλλαγές. Η εισαγωγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο από συσκευές παρακολούθησης με δυνατότητα IoT (Kumar et al., 2023), οι αλγόριθμοι αυτοματοποιημένης ανίχνευσης σφαλμάτων και τα εργαλεία οπτικοποίησης για την αντιστοίχιση εικονικών μοντέλων σε φυσικά εξαρτήματα (Xiao et al., 2024) ενισχύουν τη χρηστικότητα.

Σε ευρύτερα πλαίσια υποδομών, όπως οι στρατιωτικές εγκαταστάσεις, η εισαγωγή ενός DPP ευθυγραμμίζεται άμεσα με τις τεχνολογίες έξυπνων κτιρίων, αυτοματοποιημένες διαδικασίες

λειτουργίας και συντήρησης, αγωγούς προγνωστικής ανάλυσης και συστήματα ανατροφοδότησης ελέγχου προσανατολισμένους στον κύκλο ζωής (Hakimi et al., 2024). Ενσωματώνοντας πλήρη ιστορικά αρχεία μαζί με δυναμικές λειτουργικές μετρήσεις σε ένα δομημένο προφίλ περιουσιακού στοιχείου, τα συστήματα αυτά προωθούν την τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων, υποστηρίζοντας παράλληλα την ανθεκτικότητα και την επιχειρησιακή ετοιμότητα σε περιβάλλοντα με αυξημένους περιορισμούς πόρων και ασφάλειας.

Αυτή η σύγκλιση της περιβαλλοντικής υπευθυνότητας με γνώμονα την πολιτική και την αποδοτικότητα της συντήρησης (με βάση την τεχνολογία) καταδεικνύει γιατί η υιοθέτηση του DPP παραμένει σήμερα στην πρώτη γραμμή των στρατηγικών ψηφιακού μετασχηματισμού για χαρτοφυλάκια περιουσιακών στοιχείων μεγάλης κλίμακας.

1.2 Παγκόσμιο και Ευρωπαϊκό Τοπίο Πολιτικής

Η πορεία των πολιτικών εξελίξεων στην Ευρώπη κατά την τελευταία δεκαετία αντικατοπτρίζει μια ισχυρή σύγκλιση μεταξύ των περιβαλλοντικών στόχων και των μηχανισμών τεχνολογικής ολοκλήρωσης, με το DPP να αποτελεί βασικό μέσο στο πλαίσιο αυτής της σύγκλισης. Η Ευρωπαϊκή Πράσινη Συμφωνία και το επικαιροποιημένο σχέδιο δράσης για την κυκλική οικονομία (NCEAP) διατυπώνουν ένα όραμα που αποσκοπεί στην αποσύνδεση της οικονομικής ανάπτυξης από την κατανάλωση πόρων, ενσωματώνοντας τις απαιτήσεις βιωσιμότητας στο σχεδιασμό, τη χρήση και τις διαδικασίες λήξης της ζωής των προϊόντων (Löndahl et al., 2023). Στο πλαίσιο αυτό, τα DPP δεν αντιμετωπίζονται ως προαιρετικές προσθήκες αλλά ως τυποποιημένα ψηφιακά συνοδευτικά προϊόντων και περιουσιακών στοιχείων, με σκοπό την παρακολούθηση της κανονιστικής συμμόρφωσης και την πρακτική εφαρμογή της κυκλικότητας. Η ενσωμάτωση των DPP σε νομοθετικά μέσα, όπως ο προτεινόμενος κανονισμός για τον Οικολογικό Σχεδιασμό Βιώσιμων Προϊόντων (ESPR), σηματοδοτεί μια επέκταση που ξεφεύγει από τα στενά όρια των παραδοσιακών κατηγοριών προϊόντων. Ο κεντρικός στόχος είναι η ευρύτερη εφαρμογή τους σε όλους τους βιομηχανικούς τομείς, συμπεριλαμβανομένων των κατασκευών και των υποδομών. Ο ESPR ενεργεί ως κεντρικός ρυθμιστικός άξονας για τη στρατηγική DPP της ΕΕ, παρέχοντας το νομικό υπόβαθρο για την ενσωμάτωση μηχανισμών παρακολούθησης πλούσιων σε δεδομένα καθ' όλη τη

διάρκεια του κύκλου ζωής των προϊόντων και των υποδομών. Ο κανονισμός αυτός διευρύνει τις προηγούμενες αρχές του οικολογικού σχεδιασμού, οι οποίες ιστορικά επικεντρώνονταν σε αγαθά που σχετίζονται με την ενέργεια, προς όλα σχεδόν τα φυσικά αντικείμενα που κυκλοφορούν στην ενιαία αγορά.

Παράλληλα με τις τεχνικές προδιαγραφές, όπως οι βαθμολογίες επιδιορθωσιμότητας ή η περιεκτικότητα σε ανακυκλωμένα υλικά, η πολιτική συζήτηση δίνει πλέον έμφαση στην ακριβή αναφορά του αποτυπώματος άνθρακα και στη διαφάνεια της αλυσίδας εφοδιασμού. Για τα περιουσιακά στοιχεία υποδομής, τα οποία παραμένουν σε λειτουργία για δεκαετίες, η ευθυγράμμιση με τις παραπάνω οδηγίες προϋποθέτει την ενσωμάτωση μακροχρόνιων προγραμματισμένων εργασιών συλλογής δεδομένων και διαλειτουργικών αρχιτεκτονικών αποθήκευσης, οι οποίες είναι ικανές να προσαρμόζονται στις εκάστοτε αναθεωρήσεις των κανονισμών. Στην πράξη, οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής της ΕΕ έχουν συνδυάσει αυτούς τους κανονισμούς που εστιάζουν στη βιωσιμότητα με στρατηγικά βιομηχανικά προγράμματα που έχουν σχεδιαστεί για την ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας σε αναδυόμενους τομείς. Για παράδειγμα, η Ευρωπαϊκή Συμμαχία για τις Μπαταρίες (European Battery Alliance) δημιουργήθηκε για να επιταχύνει την έρευνα και την παραγωγική ικανότητα στα κράτη μέλη ως απάντηση στον παγκόσμιο ανταγωνισμό. Στο πεδίο εφαρμογής της εμπίπτει ο κανονισμός για τις μπαταρίες, μια νομοθετική δέσμη που ενσωματώνει ρητά μια ειδική για τις μπαταρίες μορφή DPP που συχνά αναφέρεται ως "διαβατήριο μπαταριών". Η πρωτοβουλία αυτή ενσωματώνει πολλές μεταβιβάσιμες αρχές για ευρύτερες εφαρμογές DPP: λογιστική καταγραφή των εκπομπών του κύκλου ζωής, ιχνηλασιμότητα των κρίσιμων πρώτων υλών, διαγνωστικά επιδόσεων και ενσωμάτωση σε πλαίσια ανακύκλωσης. Ο κανονισμός επιβάλλει ότι κάθε μπαταρία από το 2026 και μετά θα φέρει μαζί της ένα τέτοιο διαβατήριο κατά τη διάρκεια συναλλαγών ή αλλαγών κατάστασης, όπως η επισκευή ή η επαναχρησιμοποίησή της. Η ρύθμιση αυτή καθιστά την ψηφιακή ιχνηλασιμότητα απαραίτητη προϋπόθεση για τη συμμετοχή στην αγορά. Ένα περιβάλλον πολιτικής πολλών επιπέδων αναδύεται όταν εξετάζεται ο τρόπος με τον οποίο τα μέτρα αυτά συνδέονται με άλλες στρατηγικές, όπως η στρατηγική της ΕΕ για τα βιώσιμα χημικά προϊόντα ή το αναθεωρημένο θεματολόγιο για τους καταναλωτές παρέχουν θεματική ενίσχυση προωθώντας τη διαφάνεια των επικίνδυνων ουσιών και ενισχύοντας τη λήψη αποφάσεων από τους καταναλωτές μέσω επαληθευμένων πληροφοριών (Kim et al., 2023).

Σε παγκόσμιο επίπεδο, πρωτοβουλίες με παρόμοιο προσανατολισμό με το DPP υιοθετούνται ή βρίσκονται υπό διερεύνηση σε άλλες ανεπτυγμένες οικονομίες, όπως οι Ηνωμένες Πολιτείες και η Ιαπωνία. Οι πρωτοβουλίες στοχεύουν στη διαφάνεια των εφοδιαστικών αλυσίδων και στην παρακολούθηση του αποτυπώματος άνθρακα των προϊόντων. Η Ιαπωνία, με το όραμά της για εφαρμογή της κυκλικής οικονομίας, όπως και οι Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής με τις πρόσφατες πρωτοβουλίες, με την διαμόρφωση των πρωτοβουλιών να γίνεται εκτός του ευρωπαϊκού πλαισίου, καταδεικνύουν ότι οι συμμαχικές οικονομίες επιδιώκουν συγκλίνουσες προτεραιότητες ως προς τη βιώσιμη παραγωγή και κατανάλωση. Η εξέλιξη αυτή δημιουργεί προϋποθέσεις για την ανάπτυξη διαλειτουργικών, διασυνοριακών συστημάτων διαχείρισης δεδομένων και περιουσιακών στοιχείων. Επίσης, διεθνείς οργανισμοί, όπως ο ΟΟΣΑ και τα Ηνωμένα Έθνη, προωθούν τη δημιουργία κοινών πλαισίων και προτύπων ανταλλαγής δεδομένων, ώστε να ενισχύεται η συνεργασία ανάμεσα σε χώρες και οργανισμούς. Έτσι διευκολύνεται η παγκόσμια διαλειτουργικότητα και η υιοθέτηση κοινών πρακτικών βιωσιμότητας, συμβάλλοντας στη σταδιακή μετάβαση προς μια πιο κυκλική οικονομία.

Παρόλα αυτά, οι πολιτικές αυτές επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τα καθιερωμένα μοντέλα συντήρησης, ειδικά στον χώρο των αμυντικών υποδομών. Αντί για τους παραδοσιακούς κύκλους προγραμματισμένης συντήρησης, προωθούν την ανάγκη για συνεχή παρακολούθηση και ενημέρωση των δεδομένων μέσα από τα DPP σε πραγματικό χρόνο. Οι οργανισμοί καλούνται να συμμετέχουν ενεργά σε διασυνδεδεμένα οικοσυστήματα δεδομένων, στα οποία η ακρίβεια και η επικαιρότητα των πληροφοριών αποτελούν κρίσιμες παραμέτρους λειτουργίας. Ωστόσο, για οργανισμούς που δραστηριοποιούνται σε περιβάλλοντα υψηλής ασφάλειας, όπως οι Ένοπλες Δυνάμεις, η συμμόρφωση με τις νέες απαιτήσεις προϋποθέτει εξισορρόπηση μεταξύ της διαφάνειας (σε ό,τι αφορά τη δημοσιοποίηση περιβαλλοντικών δεδομένων) και της προστασίας επιχειρησιακά ευαίσθητων πληροφοριών. Επιπλέον, τα θεσμικά πλαίσια από μόνα τους δεν επαρκούν για την αποτελεσματική εφαρμογή των DPPs. Η επιτυχία τους εξαρτάται από τη χρήση κοινών προτύπων, οντολογικών μοντέλων και σχημάτων ταξινόμησης, τα οποία διασφαλίζουν την ομοιόμορφη ερμηνεία και ανταλλαγή των δεδομένων μεταξύ όλων των εμπλεκόμενων φορέων (Hakimi et al., 2024).

Συνοψίζοντας, το ευρωπαϊκό πλαίσιο μεταβαίνει σταδιακά από απλές υποχρεώσεις που πηγάζουν από κανονισμούς προς ένα πιο ολοκληρωμένο σύστημα διαχείρισης δεδομένων που

αφορά τα προϊόντα , στο οποίο τα DPP λειτουργούν ως βασικός μηχανισμός διαφάνειας, καινοτομίας και συμμόρφωσης.

1.3 Χρησιμότητα και Προοπτικές των Ψηφιακών Διαβατηρίων Προϊόντων

Όπως αναδείχθηκε στις προηγούμενες ενότητες, ένα DPP συνυπάρχει με το φυσικό προϊόν καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Αυτή η συνύπαρξη επιτρέπει σε πολλούς εμπλεκόμενους να αλληλεπιδρούν με τις πληροφορίες που τους παρέχει το DPP για το εκάστοτε προϊόν. Η χρησιμότητά τους έγκειται στην ικανότητά τους να παρέχουν λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με τη σύνθεση, την περιβαλλοντική επίπτωση και τις δυνατότητες ανακύκλωσης των προϊόντων. Αυτό διευκολύνει την ενημέρωση των καταναλωτών και των επιχειρήσεων, προάγοντας την υπεύθυνη κατανάλωση και την ανακύκλωση (Langley et al., 2023).

Αναλυτικότερα, τα DPP μπορούν να ενισχύσουν τη διαφάνεια και την εμπιστοσύνη στην αγορά, εξασφαλίζοντας ότι παραγωγοί και καταναλωτές έχουν πρόσβαση στις ίδιες πληροφορίες. Παρέχουν λεπτομερείς πληροφορίες για τη σύνθεση προϊόντων, επιτρέποντας τη διαφάνεια στον εφοδιαστικό τομέα και διευκολύνουν την ιχνηλασιμότητα στις πρώτες ύλες και στις διαδικασίες που σχετίζονται με την παραγωγή, βοηθώντας στη διαχείριση των υλικών και τη μείωση αποβλήτων. Ορισμένοι φορείς θα μπορούν να έχουν πρόσβαση και να διαβάζουν δεδομένα, ενώ άλλοι θα μπορούν να γράφουν δεδομένα στο DPP (Walden, Steinbrecher, & Marinkovic, 2021). Οι πληροφορίες που συγκεντρώνονται στα DPP είναι κρίσιμες για τις διαδικασίες ανακύκλωσης, όπως η ικανότητα στην αναγνώριση των υλικών που αποτελείται το προϊόν και οι διαδικασίες ανακύκλωσης, επειδή οι συγκεκριμένες πληροφορίες διευκολύνουν την αποτελεσματική διαλογή και επεξεργασία των υλικών που αποτελούν τα προϊόντα. Σημαντικό ρόλο διαδραματίζουν τα DPP στην υποστήριξη νέων επιχειρηματικών μοντέλων, σε συνδυασμό με την ψηφιακή και πράσινη μετάβαση των επιχειρήσεων, όπου θα επιτρέπουν τη δημιουργία καινοτόμων μοντέλων, όπως η "παραγωγή ως υπηρεσία" (Williams & Shittu, 2022), ενθαρρύνοντας την εκ νέου χρησιμοποίηση και επισκευή αυτών των προϊόντων. Παρατηρούμε ότι η χρήση ενός DPP δημιουργεί μια μεγάλη συλλογή δεδομένων η οποία συνεχώς εμπλουτίζεται. Η συνεχής αυτή ροή και επεξεργασία των δεδομένων από τα

DPP επιτρέπει την παρακολούθηση της απόδοσης προϊόντων σε πραγματικό χρόνο, ενισχύοντας την αποδοτικότητα και τη βιωσιμότητα. Τέλος, τα DPP βοηθούν τις κυβερνήσεις και τους ρυθμιστικούς φορείς να παρακολουθούν τη συμμόρφωση με περιβαλλοντικούς κανονισμούς και να προωθούν τη βιώσιμη ανάπτυξη. Στον Πίνακα 1.1 παρουσιάζονται συνοπτικά οι βασικοί τομείς εφαρμογής και η χρησιμότητα των DPP.

<i>Χρησιμότητα των Ψηφιακών Διαβατηρίων Προϊόντων</i>		
A/A	Τομέας	Περιγραφή
1	Διαφάνεια και Ιχνηλασιμότητα	Παρέχουν πληροφορίες για τη σύνθεση προϊόντων, διευκολύνοντας την ιχνηλασιμότητα στον εφοδιαστικό τομέα.
2	Βελτίωση Διαδικασιών Ανακύκλωσης	Συγκεντρώνουν κρίσιμες πληροφορίες για την ανακύκλωση, διευκολύνοντας τη διαλογή και επεξεργασία.
3	Υποστήριξη Νέων Επιχειρηματικών Μοντέλων	Διευκολύνουν την ανάπτυξη καινοτόμων μοντέλων, όπως η "παραγωγή ως υπηρεσία".
4	Δεδομένα σε Πραγματικό Χρόνο	Επιτρέπουν παρακολούθηση της απόδοσης προϊόντων σε πραγματικό χρόνο, ενισχύοντας την αποδοτικότητα.
5	Στήριξη Πολιτικών και Κανονισμών	Βοηθούν στην παρακολούθηση συμμόρφωσης με περιβαλλοντικούς κανονισμούς και προώθηση βιωσιμότητας.

Πίνακας 1.1. Χρησιμότητα των Ψηφιακών Διαβατηρίων Προϊόντων

Με τον τρόπο αυτό, τα DPP συνδέονται άμεσα με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας, καθώς επιτρέπουν τη διατήρηση της αξίας των προϊόντων, την επέκταση του κύκλου ζωής τους και την ορθολογική αξιοποίηση των πόρων.

Τα DPP προσφέρουν σημαντικές προοπτικές για την αντιμετώπιση των πληροφοριακών εμποδίων στην κυκλική οικονομία, ειδικά στον τομέα των ηλεκτρονικών προϊόντων. Η ανάλυση των DPP δείχνει ότι μπορούν να παρέχουν δομημένες, μηχανικά αναγνώσιμες πληροφορίες που υποστηρίζουν στρατηγικές όπως η ανακύκλωση, η επαναχρησιμοποίηση και ο σχεδιασμός για τη διάρκεια ζωής. Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα των DPP εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη διαθεσιμότητα και την ποιότητα των δεδομένων που περιέχουν, καθώς και από τη συμμόρφωση με τις ρυθμιστικές απαιτήσεις που θα καθορίσουν το περιεχόμενο και την επαλήθευσή τους. Τα DPP μπορούν να μειώσουν τα κόστη επιθεώρησης, να βελτιώσουν τις ικανότητες επιβολής και να διευκολύνουν τη συμμόρφωση με νομικές υποχρεώσεις, εφόσον διασφαλιστεί η ακριβής και αξιόπιστη παροχή πληροφοριών από τους παραγωγούς.

Επίσης, η ανάπτυξη ενός ενιαίου και διαλειτουργικού πλαισίου για τα DPP είναι κρίσιμη, καθώς θα επιτρέψει την ολοκληρωμένη εφαρμογή τους σε διάφορες βιομηχανίες και γεωγραφικές περιοχές, συμβάλλοντας έτσι στη μετάβαση προς μια κυκλική οικονομία. Η ρύθμιση και η συνεργασία μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών θα είναι καθοριστικές για την επιτυχία αυτής της πρωτοβουλίας (Wagner, 2025; European Commission, 2022). Στον Πίνακα 1.2 αποτυπώνονται οι κύριες προοπτικές και αναμενόμενα οφέλη από την ευρεία υιοθέτησή τους.

<i>Προοπτικές των Ψηφιακών Διαβατηρίων Προϊόντων</i>		
A/A	Προοπτική	Περιγραφή
1	Βελτίωση Διαφάνειας	Αυξημένη διαφάνεια για τη σύνθεση και τη ζωή προϊόντων, μειώνοντας την αβεβαιότητα.
2	Ιχνηλασιμότητα Υλικών	Δυνατότητα παρακολούθησης της προέλευσης και της σύνθεσης υλικών, ενισχύοντας την ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση.
3	Αντιμετώπιση Πληροφοριακών Εμποδίων	Συμπλήρωση κενών πληροφορίας, όπως η σύνθεση υλικών και οι οδηγίες αποσυναρμολόγησης, διευκολύνοντας τη διαδικασία ανακύκλωσης.

4	Συμμόρφωση με Κανονισμούς	Βοήθεια στην εκπλήρωση κανονιστικών απαιτήσεων, όπως οι οδηγίες WEEE, διευκολύνοντας τη νομιμότητα
5	Διαχείριση Δεδομένων	Εκσυγχρονισμός της διαχείρισης δεδομένων μέσω της τεχνολογίας blockchain, εξασφαλίζοντας την ακεραιότητα και την ασφάλεια των πληροφοριών.
6	Ενίσχυση Κυκλικής Οικονομίας	Υποστήριξη της μετάβασης σε κυκλικές πρακτικές, όπως η ανακύκλωση και η επαναχρησιμοποίηση, μειώνοντας τη σπατάλη πόρων.

Πίνακας 1.2. Προοπτικές των Ψηφιακών Διαβατηρίων Προϊόντων

Σε ευρωπαϊκό επίπεδο, η πλήρης εφαρμογή των DPP αναμένεται να επιτρέψει τη δημιουργία διαλειτουργικών οικοσυστημάτων δεδομένων, στα οποία θα συμμετέχουν κατασκευαστές, προμηθευτές και καταναλωτές. Η εξέλιξη αυτή, σε συνδυασμό με τις τεχνολογίες blockchain και τεχνητής νοημοσύνης, θα ενισχύσει τη διαφάνεια και την αυτοματοποίηση της διαχείρισης προϊόντων, προσφέροντας νέες δυνατότητες για την κυκλική οικονομία και τη βιώσιμη ανάπτυξη.

1.4 Τεχνολογίες που Υποστηρίζουν το DPP

Η υλοποίηση των DPPs στηρίζεται σε προηγμένες ψηφιακές τεχνολογίες, όπως το IoT, το Blockchain, και οι τεχνικές Big Data Analytics. Το IoT επιτρέπει τη συνεχή συλλογή δεδομένων από προϊόντα μέσω συνδεδεμένων αισθητήρων, προσφέροντας πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο για την κατάσταση και την απόδοση των προϊόντων. Όπως επισημαίνουν στις έρευνες τους οι Çetin et al. (2022) και Gligoric et al. (2019), οι τεχνολογίες αυτές επιτρέπουν την παρακολούθηση της ζωής ενός προϊόντος σε επίπεδο εξαρτημάτων, διευκολύνοντας την ιχνηλασιμότητα και την αξιολόγηση της κυκλικής απόδοσης των προϊόντων.

Η ενσωμάτωση της τεχνολογίας blockchain στα DPPs ενισχύει σημαντικά τη διαφάνεια, την ασφάλεια και την ιχνηλασιμότητα καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος. Το blockchain επιτρέπει την αποκεντρωμένη αποθήκευση και επαλήθευση δεδομένων, διασφαλίζοντας ότι οι πληροφορίες που σχετίζονται με την προέλευση, τη χρήση και την ανακύκλωση των προϊόντων παραμένουν αδιάβλητες και προσβάσιμες μόνο σε εξουσιοδοτημένους φορείς. Επιπλέον, η αξιοποίηση του πλαισίου Hyperledger Fabric και των Αποκεντρωμένων Αναγνωριστικών (DIDs) επιτρέπει τη διασύνδεση δεδομένων μεταξύ διαφορετικών καναλιών και σταδίων του κύκλου ζωής, χωρίς να απαιτείται κεντρική αρχή. Με αυτόν τον τρόπο, το blockchain λειτουργεί ως αξιόπιστη υποδομή για την εφαρμογή του DPP, προωθώντας τη συνεργασία, τη βιωσιμότητα και τη μετάβαση προς ένα πιο ολοκληρωμένο μοντέλο κυκλικής οικονομίας (Kim, Lee, & Kim, 2024).

Τεχνολογίες που Υποστηρίζουν τα Ψηφιακά Διαβατήρια Προϊόντων			
A/A	Τεχνολογία	Λειτουργία	Οφέλη
1	Internet of Things (IoT)	Επιτρέπει τη διασύνδεση συσκευών και αισθητήρων, παρέχοντας συνεχή συλλογή δεδομένων σχετικά με την απόδοση και την κατάσταση του προϊόντος.	Ενισχύει την ιχνηλασιμότητα και την παρακολούθηση προϊόντων σε πραγματικό χρόνο
2	Cloud Computing	Παρέχει ευέλικτους πόρους αποθήκευσης και υπολογιστικής ισχύος για τη διαχείριση μεγάλων όγκων δεδομένων.	Διευκολύνει την πρόσβαση σε δεδομένα από διάφορους ενδιαφερόμενους και μειώνει το κόστος
3	Multi-access Edge Computing (MEC)	Επεξεργάζεται δεδομένα κοντά στην πηγή τους, μειώνοντας την καθυστέρηση και	Επιτρέπει γρήγορη και ασφαλή επεξεργασία δεδομένων, υποστηρίζοντας την αποδοτικότητα.

		βελτιώνοντας την ταχύτητα πρόσβασης.	
4	Distributed Ledger Technologies (DLT) και Blockchain	Παρέχει ασφαλή και διαφανή μέθοδο για τη διατήρηση και κοινή χρήση δομημένων δεδομένων.	Διασφαλίζει την ακεραιότητα των δεδομένων και ενισχύει την εμπιστοσύνη μεταξύ των συμμετεχόντων.
5	Data Analytics και Machine Learning (ML)	Αναλύει μεγάλα σύνολα δεδομένων για να εξάγει σημαντικές πληροφορίες και να εντοπίσει τάσεις.	Υποστηρίζει τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων και βελτιώνει τη διαχείριση του κύκλου ζωής των προϊόντων.
6	Digital Twins (DT)	Δημιουργεί εικονικές αναπαραστάσεις φυσικών προϊόντων, επιτρέποντας την παρακολούθηση και τη βελτίωση της απόδοσής τους.	Διευκολύνει την πρόβλεψη αναγκών και βελτιώσεων σε φυσικά αντικείμενα.
7	Smart Tags και Αισθητήρες	Χρησιμοποιεί RFID, NFC ή QR κωδικούς για την παρακολούθηση προϊόντων καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους.	Αυξάνει την ιχνηλασιμότητα και παρέχει πρόσβαση σε λεπτομερείς πληροφορίες προϊόντων.
8	Data Sharing Platforms	Διευκολύνει την ανταλλαγή δεδομένων και assets μεταξύ διαφόρων ενδιαφερομένων	Προάγει τη συνεργασία και την κοινοχρησία πόρων.

9	Artificial Intelligence (AI)	Υποστηρίζει την αυτοματοποίηση και την ανάλυση δεδομένων για καλύτερες αποφάσεις.	Βελτιώνει τη διαχείριση και την υπηρεσία δεδομένων.
---	------------------------------	---	---

Πίνακας 1.3 Τεχνολογίες που Υποστηρίζουν τα Ψηφιακά Διαβατήρια Προϊόντων

Η επιτυχία των DPPs είναι κρίσιμη για την προώθηση βιώσιμων και κυκλικών μοντέλων οικονομίας, καθώς επιτρέπουν τη συνεργασία μεταξύ των εταιρών και τη μείωση των ανισοτήτων στην πρόσβαση σε ψηφιακά δεδομένα (Langley et al., 2023).

1.5 Εφαρμογές DPP σε Κατασκευές και Υποδομές

Οι κλασικές μέθοδοι κατασκευής βασίζονται σε παραδοσιακές πρακτικές που έχουν χρησιμοποιηθεί για δεκαετίες, περιλαμβάνοντας τη χρήση σκυροδέματος και χάλυβα για τη δημιουργία σταθερών και αξιόπιστων κτιρίων. Η διαδικασία αυτή συχνά απαιτεί εξειδικευμένο εργατικό δυναμικό και εκτενή προγραμματισμό, καθώς οι κατασκευές πραγματοποιούνται επιτόπου, γεγονός που μπορεί να καθυστερήσει την ολοκλήρωση των έργων. Παρά την αποδεδειγμένη αξιοπιστία τους, οι παραδοσιακές μέθοδοι δεν είναι πάντα βιώσιμες, καθώς συχνά οδηγούν σε υψηλά επίπεδα αποβλήτων και αυξημένη κατανάλωση φυσικών πόρων.

Αντίθετα, οι μέθοδοι κυκλικής οικονομίας στην κατασκευή προσφέρουν εναλλακτικές λύσεις, όπως η χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων που διευκολύνουν τη διαδικασία και μειώνουν τον χρόνο κατασκευής. Αυτές οι καινοτόμες προσεγγίσεις επιτρέπουν την αποσυναρμολόγηση και εκ νέου χρησιμοποίηση των υλικών, διατηρώντας την αξία των κτιρίων και μειώνοντας την περιβαλλοντική τους επίπτωση. Η στροφή προς κυκλικές πρακτικές μπορεί να συμβάλει στην ανάπτυξη πιο βιώσιμων πόλεων, ενσωματώνοντας τα οφέλη της τεχνολογίας και της ανακύκλωσης στην κατασκευή. (Mangialardo & Micelli, 2018).

Σημαντικό βήμα προς τις κυκλικές μεθόδους κατασκευής έγινε με την χρήση του Building Information Modeling (BIM). Το BIM ξεκίνησε τη δεκαετία του 1960 με τις πρώτες ψηφιακές αναπαραστάσεις κτιρίων μέσω λογισμικών CAD. Στη δεκαετία του 1990, η έννοια του BIM εδραιώθηκε με την ανάπτυξη εργαλείων που επέτρεψαν τη διαχείριση πληροφοριών για τα

κτίρια. Από το 2000 και μετά, η υιοθέτηση του BIM επεκτάθηκε, καθώς μεγάλες κατασκευαστικές εταιρείες αναγνώρισαν τα οφέλη του. Σήμερα, το BIM θεωρείται πρότυπο στον τομέα της αρχιτεκτονικής και της κατασκευής, ενώ η ενσωμάτωσή του με νέες τεχνολογίες όπως το IoT και το Digital Twin προετοιμάζει το έδαφος για την εποχή του Construction 4.0. Το BIM είναι μια ψηφιακή διαδικασία σχεδίασης και διαχείρισης που επιτρέπει τη δημιουργία και τη διαχείριση ενός ψηφιακού μοντέλου ενός κτιρίου ή υποδομής καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Το BIM συνδυάζει πληροφορίες που αφορούν τον τρόπο κατασκευής, τον χρόνο υλοποίησης και το κόστος με σκοπό να προσφέρει μια ολοκληρωμένη εικόνα του έργου. Με τη χρήση του BIM, οι επαγγελματίες του κλάδου μπορούν να βελτιώσουν τη συνεργασία, να μειώσουν τα λάθη, να επιταχύνουν την κατασκευή και να εξοικονομήσουν κόστος, ενώ παράλληλα διευκολύνονται οι διαδικασίες συντήρησης και διαχείρισης του έργου μετά την ολοκλήρωσή του (Alsofiani, 2024). Στο πλαίσιο αυτό, το BIM δεν λειτουργεί ως υποκατάστατο του DPP, αλλά ως συμπληρωματικό σύστημα χωρικής και τεχνικής πληροφόρησης, το οποίο ενισχύει την αξία του διαβατηρίου προϊόντος σε επίπεδο υποδομών.

Η ποικιλομορφία των τύπων υποδομών και κατασκευών, από αρθρωτά προκατασκευασμένα εξαρτήματα έως στρατιωτικά κτίρια πολιτιστικής κληρονομιάς, περιπλέκει τις προσπάθειες για προσεγγίσεις ενός μεγέθους που ταιριάζει σε όλους. Εδώ, τα διδάγματα από τις πρωτοβουλίες διαλειτουργικότητας BIM δείχνουν πώς τα κοινά πρωτόκολλα ενισχύουν τη συμμετοχή, ενώ παράλληλα μειώνουν τις τριβές των συναλλαγών μεταξύ διαφορετικών περιβαλλόντων λογισμικού (Massafra et al., 2022). Για τη γεφύρωση των κενών μεταξύ των οδηγιών υψηλού επιπέδου και της εκτέλεσης σε επίπεδο πεδίου, τέτοιες προσπάθειες τυποποίησης αποδεικνύονται απαραίτητες. Η σύζευξη μεταξύ των περιβαλλοντικών στόχων της ΕΕ και της βιομηχανικής ψηφιοποίησης οδηγεί σε ένα σημαντικό σημείο: τα ρυθμιστικά τοπία γίνονται προληπτικοί οδηγοί της τεχνικής καινοτομίας αντί να υστερούν σε σχέση με αυτήν. Επιβάλλοντας ψηφιακά διαβατήρια μέσω νομοθεσίας όπως το ESPR ή κλαδικών κανόνων όπως ο κανονισμός για τις μπαταρίες, οι αρχές δημιουργούν σήματα ζήτησης που επιταχύνουν τις ιδιωτικές επενδύσεις σε συμβατές υποδομές, πλατφόρμες cloud για την αποθήκευση συνόλων δεδομένων DPP, δίκτυα IoT ικανά για ζωντανή αναφορά παραμέτρων, αλγορίθμους τεχνητής νοημοσύνης εκπαιδευμένους σε μακροχρόνια προφίλ επιδόσεων (Hakimi et al., 2024). Από τα παραπάνω προκύπτει ότι οι οργανισμοί που αργούν να προσαρμοστούν

κινδυνεύουν να παρωχηθούν όχι μόνο τεχνολογικά αλλά και όσον αφορά την πρόσβαση στην αγορά.

Η υιοθέτηση του BIM στα έργα υποδομής αντιμετωπίζει αρκετά εμπόδια που περιορίζουν την αποτελεσματική του εφαρμογή. Αυτά περιλαμβάνουν την αντίσταση στην αλλαγή από τους επαγγελματίες του κλάδου, την έλλειψη εκπαίδευσης και κατάρτισης σχετικά με τις νέες τεχνολογίες και την έλλειψη επίγνωσης για τα οφέλη του BIM. Επιπλέον, οι αντιλήψεις σχετικά με το κόστος εφαρμογής και η προβληματική συνεργασία μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών μπορεί να δημιουργήσουν πρόσθετους φραγμούς. Αυτά τα ζητήματα καθιστούν απαραίτητη την ανάπτυξη στρατηγικών και λύσεων για την υπέρβαση αυτών των εμποδίων και την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων του BIM (Alsofiani, 2024). Στον Πίνακα 1.4 παρουσιάζονται μερικά παραδείγματα σε κατασκευές και υποδομές που έχουν εφαρμοστεί τα DPPs.

Παραδείγματα εφαρμογής Ψηφιακών Διαβατηρίων Προϊόντων σε κατασκευές και υποδομές		
1.	Τυποποιημένα Ημερολόγια Επισκευών	Αυτά τα ημερολόγια επιτρέπουν στους τεχνικούς επισκευών και στους κατασκευαστές να παρακολουθούν τις ιστορικές επισκευές ενός προϊόντος ή μιας κατηγορίας προϊόντων. Αυτό μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα των υπηρεσιών επισκευής και να παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για τη σχεδίαση και την ανάπτυξη νέων προϊόντων.
2.	Δηλώσεις Υλικών από Κατασκευαστές	Οι κατασκευαστές μπορούν να παρέχουν λεπτομέρειες σχετικά με τη σύνθεση των προϊόντων τους, διευκολύνοντας τους εργαζόμενους στην ανακύκλωση να βελτιώσουν τις διαδικασίες ανακύκλωσης. Αυτές οι δηλώσεις είναι κρίσιμες για την αναγνώριση και την επεξεργασία υλικών που περιέχουν κρίσιμες πρώτες ύλες.
3.	Συστήματα Βαθμολόγησης Βιωσιμότητας Προϊόντων	Αυτά τα συστήματα παρέχουν στους καταναλωτές πληροφορίες σχετικά με την περιβαλλοντική επίπτωση των προϊόντων, επιτρέποντας τη σύγκριση προϊόντων με βάση δείκτες βιωσιμότητας και κοινωνικών κριτηρίων. Αυτό

		ενισχύει την ενημέρωση των καταναλωτών και προάγει πιο βιώσιμες αποφάσεις αγοράς.
--	--	---

Πίνακας 1.4 Παραδείγματα εφαρμογής Ψηφιακών Διαβατηρίων Προϊόντων σε κατασκευές και υποδομές

Οι συγκεκριμένες χρήσεις του Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος δείχνουν πώς η ψηφιοποίηση μπορεί να υποστηρίξει τη βιωσιμότητα και την κυκλική οικονομία, βελτιώνοντας τη διαχείριση προϊόντων και την ανακύκλωση. Οι παραπάνω εφαρμογές αποτελούν τη βάση για την ανάπτυξη ενός προσαρμοσμένου μοντέλου DPP για τις στρατιωτικές υποδομές, το οποίο θα παρουσιαστεί στα επόμενα κεφάλαια.

1.6 Προκλήσεις και Εμπόδια στην Υλοποίηση των Ψηφιακών Διαβατηρίων Προϊόντων (DPPs)

Ο Wagner (2025) αναφέρει ότι η επιτυχία των DPP εξαρτάται από μια σειρά παραγόντων που σχετίζονται με την εκπαίδευση των καταναλωτών, την προστασία των δεδομένων και την υποστήριξη των επιχειρήσεων. Οι Psarommatis & May (2024) παρουσιάζουν τα σημαντικά οφέλη στην υλοποίηση των DPP που όμως συνοδεύονται από σημαντικές προκλήσεις.

Εκπαίδευση και Ευαισθητοποίηση Καταναλωτών και Εργαζομένων

Η επιτυχία των DPP απαιτεί πρωτοβουλίες που στόχο θα έχουν την εκπαίδευση των καταναλωτών σχετικά με τη σημασία της επισκευής και της επαναχρησιμοποίησης των προϊόντων. Η εκπαίδευση αυτή είναι απαραίτητη γιατί χωρίς επαρκή εκπαίδευση, οι χρήστες ενδέχεται να μην αξιοποιήσουν πλήρως τις δυνατότητες των DPPs.

Τεχνικές και Οργανωτικές Προκλήσεις

Σημαντικό πρόβλημα είναι και η ενσωμάτωσή τους στα υπάρχοντα συστήματα παραγωγής, κάτι που μπορεί να αποδειχθεί δύσκολο και χρονοβόρο. Πιθανότατα θα απαιτηθεί προσαρμογή στις υποδομές IT και την τεχνολογία της επιχείρησης. Στη νέα αυτή τεχνολογία οι εργαζόμενοι και οι συνεργάτες μπορεί να είναι επιφυλακτικοί και σε αυτό το σημείο θα παίξει σημαντικό ρόλο η ανάγκη για εκπαίδευση και ευαισθητοποίηση που αναφέραμε παραπάνω.

Ασφάλεια και Προστασία Δεδομένων

Λόγω της διακίνησης και χρήσης μεγάλου όγκου πληροφοριών εγείρονται και ζητήματα ασφάλειας δεδομένων. Η προστασία των ευαίσθητων πληροφοριών είναι κρίσιμη, καθώς η διαχείριση δεδομένων μπορεί να περιλαμβάνει ευαίσθητες εμπορικές πληροφορίες. Ο Γενικός Κανονισμός για την Προστασία Δεδομένων (GDPR) της ΕΕ καθορίζει τις απαιτήσεις για την επεξεργασία προσωπικών δεδομένων. Οποιοσδήποτε πληροφορίες που περιλαμβάνονται στα DPP πρέπει να συμμορφώνονται με αυτόν τον κανονισμό, είτε αφορούν προσωπικά δεδομένα (πληροφορίες που μπορεί να ταυτοποιήσουν ένα άτομο) είτε δεδομένα προϊόντων (πληροφορίες σχετικά με την ανακυκλωσιμότητα, την επισκευασιμότητα και τη σύνθεση των προϊόντων), πρέπει να ακολουθούν τον παραπάνω κανονισμό (Westerlund, 2023). Επίσης κατά την ψηφιακή μετάβαση, οι επιχειρήσεις αντιμετωπίζουν αυξανόμενες απειλές από κυβερνοεπιθέσεις, οι οποίες εκμεταλλεύονται τις ευπάθειες των νέων τεχνολογιών που υιοθετούν. Αυτές οι επιθέσεις περιλαμβάνουν phishing, ransomware και άλλες μορφές κακόβουλης δραστηριότητας που στοχεύουν σε ευαίσθητα δεδομένα και πληροφορίες. Η έλλειψη επαρκούς εκπαίδευσης και συμμετοχής των υπαλλήλων σε θέματα κυβερνοασφάλειας μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερους κινδύνους, καθώς οι εργαζόμενοι ενδέχεται να μην είναι σε θέση να αναγνωρίσουν ή να αντιδράσουν σε επιθέσεις. Οι οργανισμοί πρέπει να επενδύσουν σε μέτρα κυβερνοασφάλειας, όπως κρυπτογράφηση και εκπαίδευση, προκειμένου να προστατεύσουν τα ψηφιακά τους περιουσιακά στοιχεία και να διασφαλίσουν τη συνέχεια των επιχειρησιακών διαδικασιών (Saeed et al., 2023). Οι προκλήσεις αυτές εντείνονται περαιτέρω σε αμυντικά περιβάλλοντα, όπου τα δεδομένα προϊόντων μπορεί να αποκτούν επιχειρησιακή σημασία και η προστασία τους υπερβαίνει τις απαιτήσεις της πολιτικής συμμόρφωσης.

Οικονομικές και Νομικές Προκλήσεις

Σε συνέχεια όλων των παραπάνω θα πρέπει να λάβουμε υπόψη και το γεγονός ότι οι εταιρείες συχνά διστάζουν να αποκαλύψουν ευαίσθητα δεδομένα προϊόντων λόγω ανησυχιών ότι θα χάσουν το ανταγωνιστικό τους πλεονέκτημα. Αυτό είναι ιδιαίτερα έντονο σε τομείς με γρήγορες εξελίξεις και σύντομες διάρκειες ζωής προϊόντων. Η προστασία της ιδιωτικότητας και τα σωστά κίνητρα είναι κρίσιμα για τη διαφάνεια στη κοινοποίηση δεδομένων. Οι ασάφειες σχετικά με τη χρήση και την ασφάλιση των δεδομένων μπορεί να περιορίσουν την προθυμία των επιχειρήσεων να συμμετάσχουν. Επιπρόσθετα, είναι απαραίτητο να υπάρχουν πολιτικές

που υποστηρίζουν τις μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις με χρηματοδότηση και τεχνική υποστήριξη, προκειμένου να διασφαλιστεί η δίκαιη και αποτελεσματική εφαρμογή των DPP. Χωρίς αυτή τη στήριξη, οι μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις μπορεί να μην είναι σε θέση να υιοθετήσουν τις απαιτούμενες τεχνολογίες. Σημαντική είναι και μια σταθερή νομική βάση την οποία χρειάζονται οι επιχειρήσεις για να επενδύσουν σε νέες τεχνολογίες. Η νομική αβεβαιότητα που προκύπτει από την αστάθεια των μακροπολιτικών μπορεί να αποθαρρύνει τις επενδύσεις σε διαλειτουργικά συστήματα και στην προετοιμασία για την υλοποίηση των DPP (Wagner, 2025).

Η ανάπτυξη και η υλοποίηση των DPP είναι γεμάτη προκλήσεις. Από την εκπαίδευση των καταναλωτών μέχρι την ανάγκη για υποστήριξη των μικρών και μεσαίων επιχειρήσεων και τη διαχείριση νομικών ζητημάτων, είναι απαραίτητο να διασφαλιστεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που θα επιτρέπει τη βιώσιμη ανάπτυξη και χρήση των DPP στην αγορά.

Η διεθνής συζήτηση γύρω από τα DPP αναδεικνύει τη δυναμική τους ως εργαλείων διαφάνειας, ιχνηλασιμότητας και βιώσιμης διαχείρισης του κύκλου ζωής των προϊόντων και των υποδομών. Ωστόσο, η εφαρμογή αυτής της φιλοσοφίας σε στρατιωτικά περιβάλλοντα δεν μπορεί να εξεταστεί αν δεν λάβουμε υπόψη τις ιδιαίτερες επιχειρησιακές, θεσμικές και τεχνικές συνθήκες που τα χαρακτηρίζουν. Οι στρατιωτικές υποδομές διαφέρουν ουσιωδώς από τα πολιτικά περιβάλλοντα ως προς τις απαιτήσεις ασφάλειας, διαθεσιμότητας, διαλειτουργικότητας και κανονιστικής συμμόρφωσης, ενώ υπόκεινται ταυτόχρονα σε εθνικούς και συμμαχικούς περιορισμούς. Για τον λόγο αυτό, πριν από τον σχεδιασμό και την αξιολόγηση οποιουδήποτε πλαισίου DPP, είναι απαραίτητη η εξέταση των ιδιαίτερων χαρακτηριστικών των ελληνικών στρατιωτικών εγκαταστάσεων, των θεμάτων ασφάλειας και διαθεσιμότητας, καθώς και του θεσμικού πλαισίου που λειτουργούν. Το Κεφάλαιο 2 εστιάζει ακριβώς σε αυτή την ανάλυση, παρουσιάζοντας τις βασικές απαιτήσεις των Ελληνικών Ενόπλων Δυνάμεων που καθορίζουν τις προϋποθέσεις, τους περιορισμούς και τις προκλήσεις για την προσαρμογή και πιλοτική εφαρμογή ενός Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος.

2. Απαιτήσεις Ελληνικών Ενόπλων Δυνάμεων

Το περιεχόμενο του παρόντος κεφαλαίου συντάχθηκε με βάση ανοικτές πηγές και δημοσιευμένες μελέτες. Δεν γίνεται χρήση διαβαθμισμένων δεδομένων ούτε παραβίαση κανονισμών ασφαλείας σύμφωνα με τον Εθνικό Κανονισμό Ασφαλείας (ΕΚΑ) και τις οδηγίες του ΝΑΤΟ σχετικά με την προστασία πληροφοριών (STANAG 4774/4778).

2.1 Χαρακτηριστικά Υποδομών & Κτιρίων Στρατιωτικών Χώρων

Οι στρατιωτικές υποδομές περιλαμβάνουν πολλούς και διαφορετικούς τύπους εγκαταστάσεων που διαφέρουν τόσο ως προς τη φυσική τους μορφή όσο και ως προς το σκοπό της αποστολής των εγκαταστάσεων αυτών. Στον τομέα των Ελληνικών Ενόπλων Δυνάμεων, οι εγκαταστάσεις αυτές εκτείνονται από βάσεις στον αστικό ιστό μέχρι απομακρυσμένα επιχειρησιακά φυλάκια, το καθένα από τα οποία παρουσιάζει διακριτά χαρακτηριστικά υποδομής που διαμορφώνουν το καθεστώς σχεδιασμού, κατασκευής και συντήρησης. Η κατανόηση των διαφορετικών τύπων εγκαταστάσεων είναι κρίσιμη, καθώς κάθε κατηγορία έχει ξεχωριστές ανάγκες ασφάλειας, δεδομένων και τεχνικής υποστήριξης κατά την ενσωμάτωση ψηφιακών συστημάτων όπως το DPP. Στην Ελληνική Πολεμική Αεροπορία κυριαρχούν οι Πτέρυγες Μάχης και οι Σμηναρχίες Μάχης. Τέτοιες βάσεις φιλοξενούν ένα ποικίλο μείγμα χρήσεων γης, κατοικίες για το προσωπικό και τις οικογένειές του, γραφεία για διοικητικές λειτουργίες, εγκαταστάσεις λιανικού εμπορίου που υποστηρίζουν τις καθημερινές ανάγκες διαβίωσης, χώρους αναψυχής για το ηθικό και επιχειρησιακές ζώνες που φιλοξενούν πολεμικές μοίρες, μοίρες συντήρησης, αποθήκες επισκευών ή τεχνικά εργαστήρια (Hellenic Air Force, n.d.). Αντίστοιχα, στον Στρατό Ξηράς, οι στρατιωτικές εγκαταστάσεις περιλαμβάνουν στρατόπεδα, κέντρα εκπαίδευσης και αποθήκες καυσίμων ή πυρομαχικών, με ιδιαίτερες απαιτήσεις ασφάλειας και περιβαλλοντικής παρακολούθησης. Στο Πολεμικό Ναυτικό, οι ναύσταθμοι και τα συνεργεία συντήρησης πλοίων αποτελούν κρίσιμες υποδομές υψηλής ενεργειακής κατανάλωσης και εξειδικευμένων δεδομένων τεχνικής φύσεως (Hellenic National Defence General Staff, n.d.). Αυτή η συγκέντρωση εγκαταστάσεων δημιουργεί πολύπλοκες αλληλεξαρτήσεις μεταξύ των συστημάτων υποδομής π.χ τα δίκτυα μεταφορών εντός της βάσης επηρεάζουν την πρόσβαση

στις εγκαταστάσεις επισκευής . Για την εφαρμογή του DPP αυτό συνεπάγεται ετερογενή σύνολα δεδομένων που εκτείνονται από την περιβαλλοντική παρακολούθηση των εγκαταστάσεων μέχρι την παρακολούθηση του κύκλου ζωής των οπλικών συστημάτων (Πολεμική Αεροπορία, 2023). Για την ολοκλήρωσή της αποστολής της Πολεμικής Αεροπορίας (Πολεμική Αεροπορία, 2023) υπάρχει άμεση εξάρτηση από εξειδικευμένους υλικοτεχνικούς κόμβους. Οι εγκαταστάσεις αυτές διαχειρίζονται τις ροές της εφοδιαστικής αλυσίδας, αποθηκεύουν πυρομαχικά ή ανταλλακτικά, στοιβάζουν υλικό ανθρωπιστικής βοήθειας και συχνά βρίσκονται σε στρατηγικούς κόμβους μεταφορών κοντά σε λιμάνια ή αεροδρόμια. Μια τέτοια εγγύτητα εκθέτει συχνά τις δομές σε θαλάσσιο κλίμα ή σε ειδικές για την αεροπορία καταπονήσεις που απαιτούν μοναδικά δεδομένα ανθεκτικότητας υλικών (Harmon et al., 2014). Οι παράκτιες εγκαταστάσεις επεκτείνουν περαιτέρω την ποικιλομορφία προσθέτοντας δομές υποστήριξης της ναυσιπλοΐας, όπως σταθμούς ραντάρ ή εγκαταστάσεις αποβάθρας για ναυτικές μονάδες (Χανιάς, 2020).

Τα στρατιωτικά κτίρια και οι υποδομές πρέπει να σχεδιάζονται με τρόπο που να εξασφαλίζει υψηλά επίπεδα ασφάλειας και λειτουργικής απόδοσης. Ο Χανιάς (2020) αναφέρεται σε ορισμένα κρίσιμα στοιχεία που πρέπει να χαρακτηρίζουν τα στρατιωτικά κτίρια. Πρωτίστως, οι κατασκευές αυτές οφείλουν να είναι σχεδιασμένες ώστε να αντέχουν σε πιθανές επιθέσεις ή εκρήξεις, ενώ η πρόσβαση σε αυτές πρέπει να ελέγχεται αυστηρά, λόγω της ευαίσθητης φύσης των στρατιωτικών εγκαταστάσεων. Εκτός από την ανθεκτικότητα, ιδιαίτερη σημασία έχει και η ενεργειακή αυτάρκεια. Η αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, όπως ηλιακής ή αιολικής, μπορεί να ενισχύσει την αυτονομία των βάσεων και να μειώσει την εξάρτηση από εξωτερικούς παρόχους, ιδίως σε περιόδους επιχειρησιακής έντασης. Εξίσου καθοριστική είναι και η επιλογή φιλικών προς το περιβάλλον υλικών, τα οποία συμβάλλουν στην ενσωμάτωση των αρχών της αειφορίας στον στρατιωτικό σχεδιασμό. Η σωστή θερμομόνωση εξασφαλίζει άνεση και περιορισμό της ενεργειακής κατανάλωσης, ενώ η αξιοποίηση φυσικών στοιχείων, όπως ο φυσικός αερισμός και ο φωτισμός, ενισχύει περαιτέρω τη βιωσιμότητα των κατασκευών. Τέλος, ο εργονομικός σχεδιασμός των κτιρίων, η εύκολη πρόσβαση σε κρίσιμες εγκαταστάσεις και η πρόβλεψη αντοχής σε καιρικές συνθήκες και σεισμούς αποτελούν καθοριστικούς παράγοντες για την ασφάλεια και τη λειτουργικότητά τους.

Κατηγορία Χαρακτηριστικού	Περιγραφή / Στόχος	Σχέση με το Ψηφιακό Διαβατήριο Προϊόντος (DPP)
Ανθεκτικότητα και Ασφάλεια	Σχεδιασμός για αντοχή σε επιθέσεις, εκρήξεις και φυσικά φαινόμενα. Ελεγχόμενη πρόσβαση στις εγκαταστάσεις.	Το DPP μπορεί να καταγράφει κρίσιμες τεχνικές προδιαγραφές, δεδομένα συντήρησης και πιστοποιήσεις ασφάλειας.
Ενεργειακή Αυτάρκεια	Χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (ηλιακή, αιολική) και μείωση εξάρτησης από εξωτερικούς παρόχους.	Το DPP επιτρέπει την παρακολούθηση της ενεργειακής απόδοσης και της κατανάλωσης, υποστηρίζοντας ενεργειακή διαχείριση σε πραγματικό χρόνο.
Περιβαλλοντική Αειφορία	Επιλογή φιλικών προς το περιβάλλον υλικών και τεχνολογιών με χαμηλό αποτύπωμα άνθρακα.	Το DPP μπορεί να αποθηκεύει δεδομένα σχετικά με τη σύνθεση υλικών και τη δυνατότητα ανακύκλωσης, διευκολύνοντας την κυκλική διαχείριση.
Θερμική και Ενεργειακή Απόδοση	Ενίσχυση θερμομόνωσης, φυσικού φωτισμού και αερισμού για άνεση και εξοικονόμηση ενέργειας.	Μέσω του DPP μπορούν να παρακολουθούνται δείκτες ενεργειακής απόδοσης και να τεκμηριώνονται παρεμβάσεις βελτίωσης.
Εργονομία και Προσβασιμότητα	Ευκολία πρόσβασης σε κρίσιμες εγκαταστάσεις,	Το DPP μπορεί να περιλαμβάνει σχέδια,

	σωστή χωροθέτηση και ασφάλεια κινήσεων.	φωτογραφίες και δεδομένα πρόσβασης, διευκολύνοντας τη διαχείριση και συντήρηση.
Ανθεκτικότητα σε Καιρικές και Σεισμικές Συνθήκες	Σχεδιασμός για αντοχή σε σεισμούς, θερμοκρασιακές μεταβολές και ακραία καιρικά φαινόμενα.	Το DPP μπορεί να τεκμηριώνει τα αποτελέσματα δοκιμών, επιθεωρήσεων και πιστοποιήσεων ανθεκτικότητας

Πίνακας 2.1 Χαρακτηριστικά Κτιρίων και Υποδομών Στρατιωτικών Χώρων.

Ο πίνακας 2.1 συνοψίζει τα κύρια χαρακτηριστικά που θα πρέπει να διαθέτουν οι στρατιωτικές υποδομές σύμφωνα με τον Χανιά (2020) , ενώ παράλληλα δείχνει πώς το DPP μπορεί να λειτουργήσει ως εργαλείο τεκμηρίωσης και διαχείρισης του κύκλου ζωής τους. Η οργανωμένη συλλογή και επεξεργασία δεδομένων μέσω του DPP συμβάλλει ουσιαστικά στη βιωσιμότητα, την ασφάλεια και την αποτελεσματική λειτουργία των στρατιωτικών εγκαταστάσεων.

2.2 Θέματα Ασφάλειας και Διαθεσιμότητας

Η Ελλάδα, ως ιδρυτικό μέλος του NATO από το 1952, κατέχει στρατηγική θέση στη νοτιοανατολική πτέρυγα της Συμμαχίας και συμμετέχει ενεργά σε αποστολές συλλογικής ασφάλειας, καθώς και σε πρωτοβουλίες τεχνολογικής ενοποίησης (NATO, 2024· Υπουργείο Εξωτερικών, 2024). Η ευθυγράμμιση με το NATO και άλλα διεθνή πρότυπα επηρεάζει τον τρόπο με τον οποίο θα πρέπει να σχεδιάζονται, να δομούνται και να αναπτύσσονται τα συστήματα ψηφιακού διαβατηρίου προϊόντων (DPP). Στο πλαίσιο αυτό, ιδιαίτερη βαρύτητα αποκτούν οι κατευθυντήριες οδηγίες του NATO, όπως αποτυπώνονται σε επιλεγμένα STANAG (Standardization Agreements), τα οποία καθορίζουν κοινές τεχνικές και επιχειρησιακές προδιαγραφές μεταξύ των κρατών-μελών. Θα πρέπει να διασφαλιστεί ότι τα συστήματα διαχείρισης υποδομών και περιουσιακών στοιχείων μπορούν να διασυνδεθούν απρόσκοπτα μεταξύ των συμμαχικών δυνάμεων. Αυτό έχει ιδιαίτερη σημασία για τις

εγκαταστάσεις που προορίζονται για κοινή χρήση από συμμαχικά στρατεύματα βάσει των πρωτοκόλλων ετοιμότητας του NATO. Ενδεικτικά, τα STANAG 4774 και STANAG 4778 καθορίζουν τις απαιτήσεις για την εμπιστευτικότητα και την ακεραιότητα των αποθηκευμένων πληροφοριών, διασφαλίζοντας ότι η ανταλλαγή δεδομένων γίνεται με τρόπο αξιόπιστο και προστατευμένο από μη εξουσιοδοτημένη πρόσβαση (Murdock, Lunt, & Ross, n.d.). Ειδικότερα, το STANAG 4774 είναι ένα πρότυπο του NATO που ορίζει το Confidentiality Metadata Label Syntax, θεσπίζοντας ένα δομημένο πρότυπο για την αναπαράσταση ετικετών εμπιστευτικότητας που σχετίζονται με δεδομένα. Το πρότυπο αυτό διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη διασφάλιση της κατάλληλης αναγνώρισης και προστασίας των ευαίσθητων πληροφοριών στο πλαίσιο των επιχειρήσεων του NATO. Καθώς το τοπίο της ανταλλαγής δεδομένων και της ασφάλειας εξελίσσεται, το STANAG 4774 στοχεύει στην ενίσχυση της διαλειτουργικότητας μεταξύ των κρατών μελών του NATO παρέχοντας ένα πλαίσιο για την επισήμανση της εμπιστευτικότητας. Η επιτυχής εφαρμογή του εξαρτάται από την υιοθέτηση συμπληρωματικών προτύπων, όπως το STANAG 4778, το οποίο περιγράφει τον μηχανισμό δέσμευσης μεταδεδομένων. Η εφαρμογή του STANAG 4778 είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση της ορθής εφαρμογής των μεταδεδομένων που αφορούν την εμπιστευτικότητά τους, η οποία είναι ζωτικής σημασίας για τη διαφύλαξη ευαίσθητων πληροφοριών στο επιχειρησιακό περιβάλλον του NATO. Συνολικά, τα πρότυπα αυτά εξασφαλίζουν ασφαλή ανταλλαγή δεδομένων και ενισχύουν την επιχειρησιακή αποτελεσματικότητα του NATO.

Ένα εξίσου σημαντικό STANAG είναι και το 4609 (NATO Digital Motion Imagery Standard) που ορίζει το πλαίσιο για τη διαχείριση και διαμοίραση οπτικών δεδομένων (εικόνας και βίντεο) με ενσωματωμένα μεταδεδομένα σε πραγματικό χρόνο, εξασφαλίζοντας κοινά πρότυπα τεκμηρίωσης και ανάλυσης (NATO Standardization Office, 2021).

Η ενσωμάτωση των προτύπων STANAG στα μεταδεδομένα των DPPs ενισχύει τη δυνατότητα ανταλλαγής δεδομένων που σχετίζονται με τον κύκλο ζωής και τη συντήρηση των στρατιωτικών υποδομών μεταξύ των κρατών-μελών της Συμμαχίας. Για παράδειγμα, η χρήση κοινής ονοματολογίας εξοπλισμού εντός των υποδειγμάτων DPP, βασισμένη στις κωδικοποιήσεις του NATO για την ταξινόμηση προμηθειών, διευκολύνει την άμεση ενσωμάτωση με το NATO Codification System (NCS) και επιτρέπει την αποτελεσματικότερη διακρατική προμήθεια. Όταν τα DPPs συνδυάζονται με μοναδικά

αναγνωριστικά στοιχεία, όπως γραμμωτούς κώδικες που ήδη χρησιμοποιούνται στα έγγραφα διοικητικής μέριμνας του NATO, δημιουργείται μια ανιχνεύσιμη αλυσίδα από την προέλευση του εξαρτήματος έως την τρέχουσα επιχειρησιακή του κατάσταση, η οποία αποτυπώνεται στο διαβατήριο.

Η ελληνική αμυντική πολιτική κινείται ήδη προς αυτή την κατεύθυνση. Στην *Πράσινη Βίβλο του Υπουργείου Εθνικής Άμυνας* (ΥΠΕΘΑ, 2013), δίνεται έμφαση στη συμμόρφωση με τα πρότυπα του NATO για την προστασία του περιβάλλοντος και τη βιώσιμη διαχείριση υποδομών, μέσω της συμμετοχής της Ελλάδας σε ομάδες εργασίας όπως η Environmental Protection Working Group (EPWG) και στην ανάπτυξη σχετικών STANAGs.

Επιπλέον, στους τομείς της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας, που αποκτούν αυξανόμενη σημασία τόσο στις επιχειρησιακές πολιτικές του NATO όσο και στα ευρωπαϊκά πλαίσια, η τεκμηρίωση μέσω DPP της συμμόρφωσης με κριτήρια ενεργειακής απόδοσης ή μεθοδολογίες υπολογισμού του αποτυπώματος άνθρακα διευκολύνει την αμοιβαία αναγνώριση και την αξιοπιστία των σχετικών δεικτών.

2.3 Συμμόρφωση με Κανονιστικά και Θεσμικά Πλαίσια

Οι εθνικοί κανονισμοί που στηρίζουν την εφαρμογή των DPP στις υποδομές των Ελληνικών Ενόπλων Δυνάμεων πρέπει να εναρμονίζονται με τα υφιστάμενα νομικά πλαίσια του αμυντικού τομέα, την εθνική περιβαλλοντική νομοθεσία και τα νομοθετικά μέσα που μεταφέρουν την πολιτική της Ευρωπαϊκής Ένωσης στο εσωτερικό δίκαιο. Η διαδικασία αυτή είναι σύνθετη, καθώς οι στρατιωτικές εγκαταστάσεις, αν και διαθέτουν επιχειρησιακές ιδιαιτερότητες, υπόκεινται σε μεγάλο βαθμό στα γενικά πλαίσια περιβαλλοντικής και νομικής συμμόρφωσης. Η βασική πρόκληση έγκειται στην ενσωμάτωση των αρχιτεκτονικών DPP σε αυτούς τους κανονισμούς, χωρίς να παραβιάζονται οι περιορισμοί ασφαλείας, αλλά και χωρίς να παρεκκλίνουν από τις νόμιμες υποχρεώσεις.

Στο ελληνικό δίκαιο, οι οδηγίες και οι κανονισμοί της Ευρωπαϊκής Ένωσης ενσωματώνονται μέσω νόμων μεταφοράς, προεδρικών διαταγμάτων και υπουργικών αποφάσεων, σύμφωνα με το άρθρο 28 του Συντάγματος. Για παράδειγμα, οι υποχρεώσεις που απορρέουν από τον

Κανονισμό για τον Οικολογικό Σχεδιασμό Βιώσιμων Προϊόντων (ESPR) καθίστανται δεσμευτικές σε εθνικό επίπεδο από τη στιγμή που ενσωματώνονται στο ελληνικό νομικό πλαίσιο, είτε άμεσα είτε μέσω πράξεων εφαρμογής. Αυτό σημαίνει ότι οι δομές μεταδεδομένων που σχετίζονται με το DPP, όπως προβλέπονται από τον ESPR, αποκτούν την ίδια νομική ισχύ στο ελληνικό δίκαιο με εκείνη που ισχύει σε κάθε άλλο κράτος-μέλος της Ευρωπαϊκής Ένωσης.

Σε πρακτικό επίπεδο, τα έργα στρατιωτικών υποδομών ενδέχεται να υπόκεινται σε υποχρεώσεις τεκμηρίωσης δεδομένων που αφορούν τη σύνθεση των υλικών, τους δείκτες ανακύκλωσης, την καταγραφή δεδομένων ενεργειακής απόδοσης ή τις εκτιμήσεις περιβαλλοντικών επιπτώσεων που ορίζονται στους νόμους ευρωπαϊκής προέλευσης — ακόμη και όταν ορισμένα πεδία φιλτράρονται μέσω πρωτοκόλλων διαβαθμισμένης πρόσβασης. Η υποχρέωση παροχής «ψηφιακά προσβάσιμων πληροφοριών για κάθε προϊόν», όπως προβλέπεται από τον ESPR (Westerlund, 2023), καθίσταται μέρος της εθνικής στρατηγικής συμμόρφωσης κατά την κατασκευή νέων εγκαταστάσεων ή την υλοποίηση σημαντικών ανακαινίσεων.

Πέρα από τη νομοθεσία που αφορά την ΕΕ, η ελληνική νομοθεσία για το περιβάλλον προβλέπει αυστηρούς όρους για τη διαχείριση και την ανακύκλωση των δομικών υλικών, μέσω θεσμικών πλαισίων όπως ο Ν. 4819/2021 και η ΚΥΑ 36259/1757/Ε103, που καθορίζουν τα μέτρα για την εναλλακτική διαχείριση αποβλήτων εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΑΕΚΚ), συμπεριλαμβανομένων ειδικών προβλέψεων για επικίνδυνες ουσίες, όπως ο αμίαντος. Επίσης, η ελληνική νομοθεσία για τα απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΑΗΗΕ) μέσω της Κοινής Υπουργικής Απόφασης 23615/651/Ε.103 (ΦΕΚ Β' 1184/2014), καθορίζει τα μέτρα για την εναλλακτική διαχείριση, συλλογή και ανακύκλωση των αποβλήτων αυτών. Τα παραπάνω νομοθετήματα θα αλληλεπιδρούσαν άμεσα με τα σύνολα δεδομένων του DPP που περιγράφουν τις διαδικασίες τερματισμού του κύκλου ζωής των στρατιωτικών κτιρίων. Σε σενάρια όπου σχεδιάζεται η κατεδάφιση εγκαταστάσεων που περιέχουν επικίνδυνα συστατικά, οι κανονισμοί απαιτούν την εκ των προτέρων αναφορά των ποσοτήτων και των τύπων των υλικών, απαίτηση κατάλληλη για αυτοματοποιημένη εξαγωγή από τα αρχεία DPP (Abedi et al., 2024).

Στο πεδίο των δημοσίων προμηθειών, η ελληνική νομοθεσία ορίζεται κυρίως από τον Ν. 4412/2016, ο οποίος εναρμονίζει το εθνικό πλαίσιο με τις Οδηγίες 2014/24/ΕΕ και 2014/25/ΕΕ της Ευρωπαϊκής Ένωσης (Ελληνική Δημοκρατία, 2016). Για τις προμήθειες που σχετίζονται με την άμυνα και την ασφάλεια, εφαρμόζεται ο Ν. 3978/2011, ο οποίος ενσωματώνει την Οδηγία 2009/81/ΕΚ και προβλέπει ειδικές διαδικασίες που διασφαλίζουν την εχεμύθεια και την προστασία των κρίσιμων πληροφοριών (Ελληνική Δημοκρατία, 2011). Επιπλέον, ο Ν. 4782/2021 εισήγαγε διατάξεις για την «πράσινη δημόσια προμήθεια» (Green Public Procurement – GPP), ενισχύοντας την ενσωμάτωση περιβαλλοντικών κριτηρίων και στοιχείων διαφάνειας στις διαδικασίες, σε πλήρη συνάφεια με τις αρχές των Ψηφιακών Διαβατηρίων Προϊόντων (Ελληνική Δημοκρατία, 2021). Η ενσωμάτωση του DPP μπορεί να ικανοποιήσει μέρος αυτών των απαιτήσεων παρέχοντας αρχεία προέλευσης προμηθευτών με δυνατότητα επαλήθευσης, με μοναδικά αναγνωριστικά φορέων που ενσωματώνονται σε ψηφιακούς φορείς όπως οι κωδικοί QR (Westerlund, 2023). Για τους προμηθευτές που λειτουργούν βάσει ρητρών εμπιστευτικότητας λόγω της ευαισθησίας του στρατιωτικού περιεχομένου, το εθνικό πλαίσιο επιτρέπει την επιλεκτική αποκάλυψη κατά τη διάρκεια των ελέγχων συμμόρφωσης. Η υιοθέτηση πολυεπίπεδων μοντέλων πρόσβασης στο πλαίσιο της εφαρμογής του DPP πληροί αυτή την προϋπόθεση, ενώ παράλληλα παρέχει την απαιτούμενη διαφάνεια για τις λειτουργίες ελέγχου.

2.4 Προκλήσεις για την Εφαρμογή του DPP στις Ελληνικές Ένοπλες Δυνάμεις

2.4.1 Περιορισμοί Ασφαλείας

Οι περιορισμοί ασφαλείας που ισχύουν στους στρατιωτικούς χώρους επιβάλλουν αυστηρά, και συχνά διαφοροποιημένα, όρια στον σχεδιασμό, την ανάπτυξη και τη λειτουργία των συστημάτων DPP. Αυτό είναι ιδιαίτερα έντονο σε εφαρμογές υποδομής, όπου ακόμη και φαινομενικά αβλαβή δεδομένα κύκλου ζωής μπορούν, όταν συνδυάζονται με άλλες πηγές πληροφοριών, να αποκαλύψουν τακτικές αδυναμίες ή να θέσουν σε κίνδυνο στρατηγικά περιουσιακά στοιχεία. Στην πράξη, το επίπεδο της ασφαλείας υπαγορεύει τόσο το τι καταγράφεται στο εσωτερικό ενός DPP όσο και τον τρόπο αποθήκευσης, μετάδοσης και

πρόσβασης στις πληροφορίες αυτές (Westerlund, 2023). Ένας σημαντικός περιορισμός αφορά την ταξινόμηση των τεχνικών προδιαγραφών. Τα πεδία δεδομένων που αφορούν ανοχές δομικών φορτίων, σύνθετα υλικά με εξειδικευμένες ιδιότητες αντοχής σε εκρήξεις ή υποσυστήματα κρίσιμα για τη συνέχεια της αποστολής, όπως οι εφεδρικές συστοιχίες παραγωγής ενέργειας, δεν μπορούν να εκτεθούν ελεύθερα σε στρώματα DPP χωρίς να παραβιάζονται οι νόμοι περί εθνικού απορρήτου. Ωστόσο, πλαίσια συμμόρφωσης όπως το ESPR απαιτούν ορισμένα περιβαλλοντικά δεδομένα και δεδομένα που αφορούν την ανακύκλωση να είναι προσβάσιμα σε εξωτερικούς ρυθμιστικούς ελεγκτές. Η ισορροπία μεταξύ αυτών των αντικρουόμενων απαιτήσεων προϋποθέτει μια κλιμακωτή αρχιτεκτονική στην οποία τα πεδία που απευθύνονται στο κοινό φιλτράρονται από ευαίσθητες τεχνικές λεπτομέρειες, ενώ τα ασφαλή εσωτερικά αποθετήρια περιέχουν πλήρη τεχνικά σύνολα δεδομένων, τα οποία είναι προσβάσιμα μόνο μέσω διαπιστευτηρίων που αντιστοιχούν σε επίπεδα εξουσιοδότησης που αφορούν τις ένοπλες δυνάμεις (Langley et al., 2023). Επιπρόσθετα, το πλαίσιο ασφάλειας που διέπει τα στρατιωτικά δεδομένα στην Ελλάδα καθορίζεται από τον Εθνικό Κανονισμό Ασφαλείας (ΕΚΑ), όπως αυτός θεσπίστηκε με την Υπουργική Απόφαση Φ.120/511579/Σ.4510/2024 (ΦΕΚ Β' 2713/2024) του Υπουργείου Εθνικής Άμυνας. Ο ΕΚΑ καθορίζει το πλαίσιο για τον χαρακτηρισμό, τη διαβάθμιση, τη διαχείριση και την προστασία διαβαθμισμένων πληροφοριών, τόσο στο εσωτερικό των Ενόπλων Δυνάμεων όσο και στις συνεργασίες με οργανισμούς του ΝΑΤΟ και της ΕΕ. Η εφαρμογή του στις αρχιτεκτονικές του DPP είναι κρίσιμη, καθώς ορίζει τα επίπεδα εμπιστευτικότητας και τα πρωτόκολλα διαχείρισης των δεδομένων, εξασφαλίζοντας ότι η πρόσβαση στις πληροφορίες γίνεται αποκλειστικά από προσωπικό με το κατάλληλο επίπεδο διαβάθμισης ασφαλείας.

Ένας άλλος περιορισμός προκύπτει από την ενσωμάτωση μόνιμων αναγνωριστικών στα συστατικά. Ενώ οι κωδικοί QR ή οι ετικέτες RFID βοηθούν την επιχειρησιακή ιχνηλασιμότητα συνδέοντας φυσικά αντικείμενα με ψηφιακές καταχωρίσεις (Abedi et al., 2024), γίνονται επίσης ευάλωτοι σε επιθέσεις εάν δεν είναι κρυπτογραφικά ασφαλείς. Η συλλογή αυτών των ετικετών θα μπορούσε να αποκαλύψει τα επίπεδα απογραφής, τους κύκλους ανάπτυξης ή ακόμη και την τρέχουσα θέση των βασικών περιουσιακών στοιχείων. Για να αντιμετωπιστεί αυτό, η κρυπτογράφηση των αναγνωριστικών σε συνδυασμό με συστήματα που θα εναλλάσσουν τα σύμβολα μπορεί να αποτρέψει τη συσχέτιση μεταξύ των κωδικών που

σαρώνονται και της πραγματικής επιχειρησιακής κατάστασης . Επιπλέον, οι διαδικασίες περιορισμένου χειρισμού μπορεί να απαιτούν ορισμένες ετικέτες να παραμένουν ανενεργές, εκτός από τις ελεγχόμενες εργασίες συντήρησης σε ασφαλείς εγκαταστάσεις. Οι νόμοι εθνικής κυριαρχίας των δεδομένων επιφέρουν πρόσθετη πολυπλοκότητα στα σενάρια διασυνοριακής συνεργασίας που αναφέρθηκαν προηγουμένως. Οι πληροφορίες που συλλέγονται αρχικά υπό ελληνική δικαιοδοσία εξακολουθούν να υπόκεινται σε εθνικούς περιορισμούς ακόμη και όταν μοιράζονται με συμμαχικές δυνάμεις. Ως εκ τούτου, τα συστήματα DPP πρέπει να ενσωματώνουν ελέγχους εξαγωγών που φιλτράρουν αυτόματα ή αποκρύπτουν ευαίσθητα χαρακτηριστικά πριν από οποιαδήποτε ανταλλαγή δεδομένων σε δίκτυα συνδεδεμένα με το NATO (Χανιάς, 2020). Η εφαρμογή ελέγχων πρόσβασης σε επίπεδο χαρακτηριστικών, μια δυνατότητα πιο λεπτομερής από τις απλές άδειες σε επίπεδο αρχείων, είναι απαραίτητη για την τήρηση εθνικής κυριαρχίας με παράλληλη διατήρηση της διαλειτουργικότητας.

Οι πολιτικές κυβερνοασφάλειας στο πλαίσιο της στρατιωτικής υποδομής IT εισάγουν περαιτέρω περιορισμούς στη λειτουργία του DPP. Τα συστήματα που χειρίζονται διαβαθμισμένες ή ευαίσθητες μη διαβαθμισμένες πληροφορίες πρέπει να συμμορφώνονται με τις απαιτήσεις ασφαλούς αποθήκευσης: κρυπτογραφημένη αποθήκευση σε κατάσταση ηρεμίας με χρήση εγκεκριμένων αλγορίθμων (π.χ. AES-256), πιστοποίηση ταυτότητας πολλαπλών παραγόντων, συστήματα ανίχνευσης εισβολών και αυστηρές διαδικασίες ελέγχου αλλαγών που διασφαλίζουν ότι δεν πραγματοποιούνται μη εξουσιοδοτημένες τροποποιήσεις (Abedi et al., 2024). Τα μέτρα αυτά ελαχιστοποιούν τους κινδύνους τόσο από εξωτερικές απόπειρες διείσδυσης όσο και από εσωτερικές απειλές ικανές να χειραγωγήσουν δεδομένα DPP.

Συνοψίζοντας, οι περιορισμοί ασφαλείας επιβάλλουν η εφαρμογή του DPP στο εσωτερικό των υποδομών των Ελληνικών Ενόπλων Δυνάμεων να λειτουργεί ως σύστημα πολλαπλών επιπέδων πρόσβασης. Σε ένα πρώτο επίπεδο, το σύστημα θα πρέπει να ικανοποιεί τις νόμιμες υποχρεώσεις διαφάνειας που απορρέουν από την περιβαλλοντική νομοθεσία και τις πολιτικές κυκλικής οικονομίας, παρέχοντας επιλεγμένα δεδομένα σε ελεγκτικούς ή ρυθμιστικούς φορείς.

Σε ένα δεύτερο, πιο περιορισμένο επίπεδο, θα πρέπει να διατηρείται η πλήρης τεχνική και επιχειρησιακή πληροφορία, προσβάσιμη μόνο σε εξουσιοδοτημένο στρατιωτικό προσωπικό, πίσω από μηχανισμούς ελεγχόμενης πρόσβασης. Επιπλέον, μπορούν να διαμορφωθούν

εξειδικευμένες προβολές δεδομένων για συμμαχικούς εταίρους, σύμφωνα με τα πρότυπα ασφάλειας και ανταλλαγής πληροφοριών που ορίζει το NATO (Χανιάς, 2020). Η πολυπλοκότητα δεν έγκειται απλώς στην επιβολή δυαδικής πρόσβασης, αλλά στη δυναμική διαμόρφωση της ορατότητας του περιεχομένου ανάλογα με το πλαίσιο, τις αλλαγές ταξινόμησης κατά τη διάρκεια ζωής του περιουσιακού στοιχείου και τις εξελισσόμενες εκτιμήσεις απειλών, διατηρώντας παράλληλα ανέπαφη τη διαλειτουργικότητα, όπου αυτή υποστηρίζει άμεσα την αποτελεσματικότητα της αποστολής, χωρίς να εκθέτει κρίσιμα για την άμυνα τρωτά σημεία.

Σε ένα τέτοιο περιβάλλον, το DPP δεν λειτουργεί απλώς ως αποθήκη δεδομένων, αλλά ως ενεργός μηχανισμός προστασίας επιχειρησιακών πληροφοριών, ικανός να προσαρμόζει τα επίπεδα πρόσβασης και τις επιτρεπόμενες προβολές περιεχομένου σε πραγματικό χρόνο. Αυτό προϋποθέτει την ενσωμάτωση μηχανισμών εξουσιοδότησης βάσει ρόλου και αποστολής, ώστε η πρόσβαση να καθορίζεται όχι μόνο από τη βαθμίδα ασφαλείας αλλά και από τη λειτουργική συνάφεια με την αποστολή.

Παράλληλα, η διατήρηση της διαλειτουργικότητας με συμμαχικά πρότυπα απαιτεί η αρχιτεκτονική του DPP να στηρίζεται σε μοντέλα ελέγχου πρόσβασης συμβατά με τα STANAG και τον Εθνικό Κανονισμό Ασφαλείας, επιτρέποντας την ασφαλή ανταλλαγή δεδομένων χωρίς συμβιβασμούς στην προστασία των εθνικών συμφερόντων.

2.4.2 Υφιστάμενα (Παρωχημένα) Πληροφοριακά Συστήματα και Υποδομές

Η ενσωμάτωση των λειτουργιών του DPP σε στρατιωτικές υποδομές πολλών ετών χρήσης και συναφή πληροφοριακά συστήματα παρουσιάζει ένα σύνθετο σύνολο τεχνικών, οργανωτικών και επιχειρησιακών προκλήσεων. Πολλές εγκαταστάσεις των Ελληνικών Ενόπλων Δυνάμεων αναπτύχθηκαν σε περιόδους όπου η τεκμηρίωση των περιουσιακών στοιχείων βασιζόταν σε αναλογικά αρχεία, χειρόγραφα ημερολόγια ή χάρτινα σχεδιαγράμματα, αλλά και σε ιδιόκτητες ψηφιακές μορφές χωρίς τα σημερινά χαρακτηριστικά διαλειτουργικότητας (Çetin et al., 2023).

Αυτά τα αρχεία είναι συχνά ελλιπή ή ασυνεπή και φυλάσσονται σε διαφορετικά αποθετήρια, καταναμημένα ανά κλάδο ή υπηρεσία.

Η ενοποίηση αυτών των διάσπαρτων πληροφοριών σε ένα ενιαίο DPP απαιτεί σημαντική προεπεξεργασία, η οποία συχνά περιλαμβάνει χειροκίνητη ψηφιοποίηση, για παράδειγμα μέσω οπτικής αναγνώρισης χαρακτήρων (OCR) και στη συνέχεια επεξεργασία φυσικής γλώσσας για την εξαγωγή μεταδεδομένων (Abedi et al., 2024). Ωστόσο, η ακρίβεια της OCR μειώνεται σημαντικά όταν τα έγγραφα είναι κατεστραμμένα ή μη τυποποιημένα, ενώ η επαλήθευση των εξαγόμενων δεδομένων παραμένει χρονοβόρα διαδικασία.

Το τεχνολογικό χάσμα μεταξύ των παλαιών πλατφορμών διαχείρισης περιουσιακών στοιχείων και των σύγχρονων αρχιτεκτονικών DPP περιπλέκει περαιτέρω την ενσωμάτωση. Οι υπάρχουσες διεπαφές, σχεδιασμένες για ανταλλαγή αρχείων μέσω ασφαλών εσωτερικών δικτύων, συχνά δεν υποστηρίζουν ενημερώσεις σε πραγματικό χρόνο από δίκτυα IoT ή μονάδες προληπτικής συντήρησης (Kühn et al., 2025). Η γεφύρωση αυτού του χάσματος απαιτεί ενδιάμεσο λογισμικό (middleware) ικανό να μεταφράζει τα δεδομένα των παλαιών βάσεων σε σύγχρονες οντολογίες διαβατηρίων. Ακόμη και απλές διαδικασίες, όπως η αντιστοίχιση κωδικών εξαρτημάτων με τα πρότυπα κωδικοποίησης του NATO, χρειάζονται προσεκτικά επιμελημένους πίνακες αντιστοίχισης για να αποφευχθούν σφάλματα κατά την αυτοματοποιημένη εισαγωγή.

Οι εξαρτήσεις από υλικό (hardware) ενσωματωμένο στα παλαιά συστήματα προσθέτουν ένα ακόμη επίπεδο δυσκολίας. Οι φυσικοί ελεγκτές εγκαταστάσεων HVAC, δικτύων ηλεκτρικής ενέργειας ή εξειδικευμένου εξοπλισμού μπορεί να είναι «κλειδωμένοι» σε συγκεκριμένους προμηθευτές και ασύμβατοι με σύγχρονα πρωτόκολλα εξαγωγής δεδομένων. Επιπλέον, αρκετές εκδόσεις υλικολογισμικού (firmware) δεν υποστηρίζονται πλέον, καθώς οι κατασκευαστές δεν παρέχουν ενημερώσεις ασφαλείας για παρωχημένες συσκευές (Westerlund, 2023). Στις περιπτώσεις αυτές, η ενσωμάτωση των λειτουργιών DPP ενδέχεται να απαιτεί την εγκατάσταση μετατροπέων πρωτοκόλλου ή την ανάπτυξη παράλληλων αισθητήρων που παρακολουθούν κρίσιμες μεταβλητές απόδοσης χωρίς να επηρεάζουν τις υπάρχουσες διαδικασίες ελέγχου. Παρ' όλα αυτά, οι λύσεις αυτές συνεπάγονται αυξημένες ανάγκες συντήρησης και διαχείρισης.

Τα προβλήματα τυποποίησης των δεδομένων γίνονται εντονότερα σε υποδομές πολλών δεκαετιών που έχουν υποστεί αποσπασματικές αναβαθμίσεις. Μια βάση μπορεί να συνδυάζει συστήματα ενέργειας από τη δεκαετία του 1980 με νεότερες συστοιχίες επικοινωνιών, καθένα με διαφορετικές συμβάσεις ονομασίας εξαρτημάτων, μεταβλητών παρακολούθησης και προτύπων συντήρησης (Abedi et al., 2024). Η εναρμόνιση αυτών των ετερογενών συστημάτων με το DPP, διατηρώντας παράλληλα την απαραίτητη λεπτομέρεια για επιχειρησιακή χρησιμότητα, προϋποθέτει τη δημιουργία ευέλικτων δομών δεδομένων προσαρμοσμένων σε κάθε υποσύστημα αλλά διαλειτουργικών σε επίπεδο εγκατάστασης. Διαφορετικά, οι αναλύσεις που προκύπτουν από το DPP μπορεί να οδηγήσουν σε ελλιπή ή ανακριβή συμπεράσματα, μειώνοντας την αξία του ως εργαλείου υποστήριξης αποφάσεων.

Κατά συνέπεια, ο σχεδιασμός ενός ολοκληρωμένου προγράμματος ενσωμάτωσης του DPP απαιτεί τη θέσπιση σαφών εσωτερικών πρωτοκόλλων ανταλλαγής δεδομένων πριν από οποιαδήποτε τεχνολογική εφαρμογή προς τα έξω. Η αντιμετώπιση των περιορισμών των παλαιών (legacy) συστημάτων απαιτεί μια πολυεπίπεδη και σταδιακή στρατηγική που περιλαμβάνει:

- επιλεκτική ψηφιοποίηση, με προτεραιότητα στα στοιχεία που έχουν τον μεγαλύτερο επιχειρησιακό αντίκτυπο,
- χρήση ενδιάμεσου λογισμικού (middleware) για διασύνδεση χωρίς διατάραξη των υφιστάμενων ροών εργασίας,
- υβριδικές αρχιτεκτονικές ασφάλειας, ώστε ο συγχρονισμός δεδομένων να γίνεται υπό αυστηρή χαρτογράφηση αδειών,
- ευέλικτο και επεκτάσιμο σχεδιασμό δεδομένων, που υποστηρίζει διαφορετικούς τύπους υποσυστημάτων,
- επένδυση στην εκπαίδευση χρηστών με διαφορετικά επίπεδα τεχνογνωσίας, και
- πιλοτικές εφαρμογές σε μη κρίσιμες εγκαταστάσεις, ως περιβάλλοντα δοκιμής (proof of concept) πριν από τη γενικευμένη εφαρμογή στις υποδομές των Ελληνικών Ενόπλων Δυνάμεων (Abedi et al., 2024; Langley et al., 2023; Westerlund, 2023).

Χωρίς μια τέτοια ολοκληρωμένη προσέγγιση, που συνδυάζει τεχνικό σχεδιασμό με οργανωτική προσαρμογή και ενεργή διαχείριση αλλαγών, η μετάβαση στρατιωτικών υποδομών δεκαετιών σε σύγχρονα διαλειτουργικά οικοσυστήματα DPP ενέχει τον κίνδυνο στασιμότητας λόγω μη ρεαλιστικών στόχων συμβατότητας ή αποσπασματικών υλοποιήσεων που δεν αποδίδουν την αναμενόμενη αποτελεσματικότητα στην αυτοματοποίηση της συντήρησης και την ιχνηλασιμότητα της συμμόρφωσης.

Συνοψίζοντας, το θεσμικό και τεχνικό πλαίσιο που εξετάστηκε καταδεικνύει ότι η ενσωμάτωση των DPP στις υποδομές των Ελληνικών Ενόπλων Δυνάμεων δεν αποτελεί απλώς μια ακόμη τεχνολογική καινοτομία, αλλά μια συνολική αλλαγή αντίληψης στη διαχείριση των περιουσιακών στοιχείων, της συντήρησης και της βιωσιμότητας. Πρόκειται για μια πρόκληση που απαιτεί συμβατότητα με τα ευρωπαϊκά και συμμαχικά πρότυπα, όπως ο Κανονισμός ESPR και τα STANAG του NATO, καθώς και έναν νέο τρόπο συνεργασίας μεταξύ των τεχνικών, επιχειρησιακών και διοικητικών φορέων. Η μετάβαση σε αυτό το νέο μοντέλο δεν αφορά μόνο την τεχνολογία, αλλά και τη δημιουργία ενός ενιαίου ψηφιακού οικοσυστήματος, στο οποίο κάθε εγκατάσταση, υποσύστημα ή εξοπλισμός μπορεί να παρακολουθείται, να συντηρείται και να αξιολογείται με βάση ακριβή και επικαιροποιημένα δεδομένα. Ένα τέτοιο πλαίσιο ενισχύει τη διαφάνεια, τη διαλειτουργικότητα και την ασφάλεια των πληροφοριών, ενώ παράλληλα συμβάλλει στη μείωση του κόστους και στην καλύτερη αξιοποίηση των πόρων.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι να διερευνήσει σε ποιο βαθμό το πλαίσιο του DPP μπορεί να εφαρμοστεί και να προσαρμοστεί στο ιδιαίτερο περιβάλλον των ελληνικών στρατιωτικών εγκαταστάσεων. Στόχος είναι να διαμορφωθεί μια μεθοδολογία ενσωμάτωσης που να συνδυάζει τη συμμόρφωση με τα ευρωπαϊκά και νατοϊκά πρότυπα, την ασφάλεια πληροφοριών και τη βιώσιμη λειτουργία των υποδομών.

Μέσα από τη μελέτη αυτή επιχειρείται να τεθούν οι βάσεις για την ανάπτυξη ενός πιλοτικού πλαισίου DPP, ικανού να υποστηρίξει την ψηφιακή παρακολούθηση και τεκμηρίωση του κύκλου ζωής στρατιωτικών κτιρίων, εξοπλισμού και κρίσιμων συστημάτων, ενισχύοντας την αποδοτικότητα και την ανθεκτικότητα των ελληνικών αμυντικών υποδομών στο μέλλον.

3. Προτεινόμενη Αρχιτεκτονική

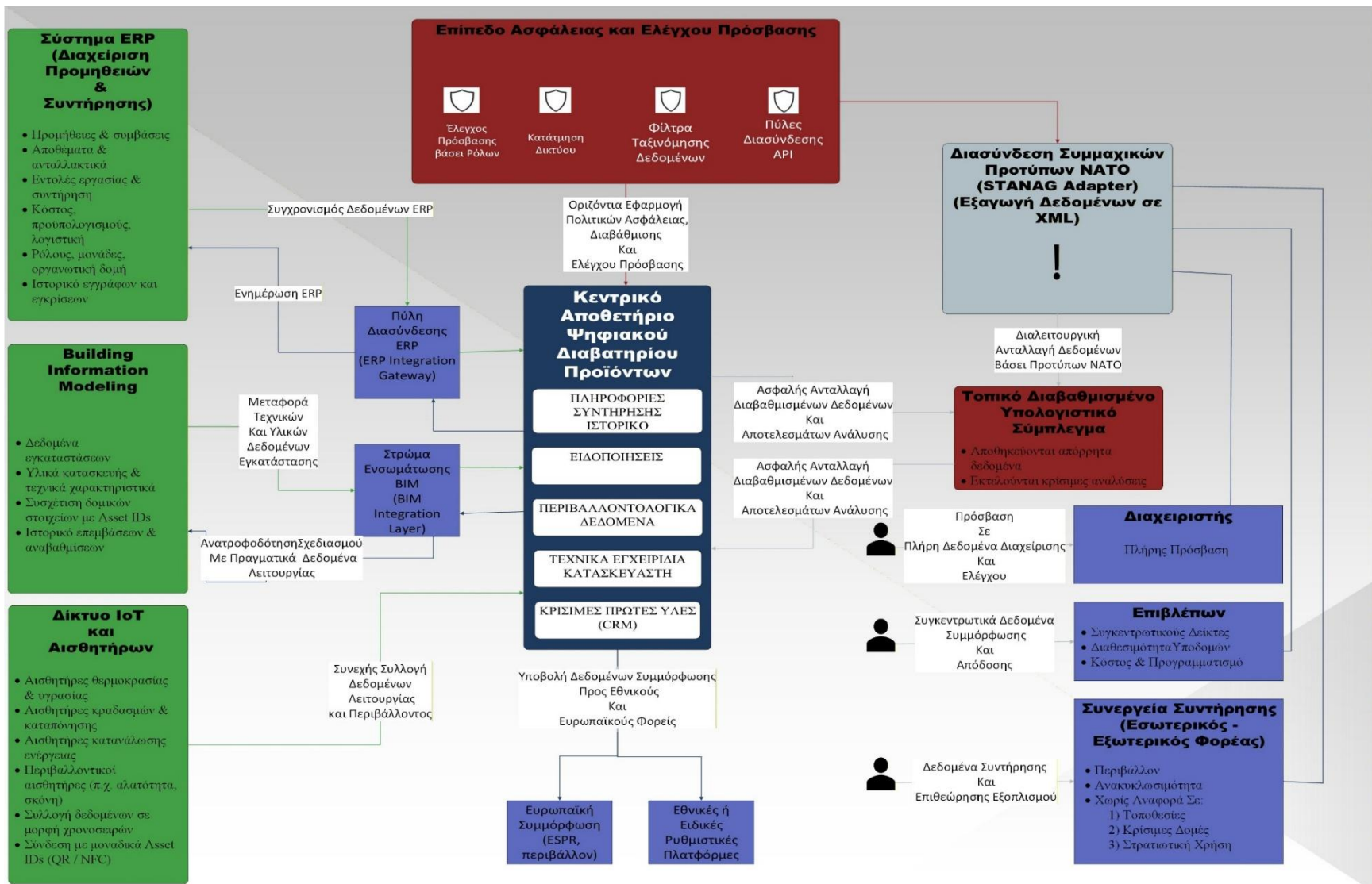
3.1 Διάγραμμα Συστήματος

Το διάγραμμα 3.1 του συστήματος απεικονίζει μια διασυνδεδεμένη και πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική, με κύριο στόχο τη συγκέντρωση, συσχέτιση και ιχνηλασιμότητα της πληροφορίας που αφορά τον κύκλο ζωής των υποδομών και των περιουσιακών στοιχείων, στο πλαίσιο της υλοποίησης του DPP. Κάθε λειτουργικό επίπεδο του οικοσυστήματος ευθυγραμμίζεται με συγκεκριμένες λειτουργικές και κανονιστικές απαιτήσεις, ενσωματώνοντας τις ροές εργασίας διαχείρισης κτιρίων και υποδομών των Ενόπλων Δυνάμεων της Ελλάδας.

Η οπτική διάταξη του διαγράμματος έχει ως στόχο να αποτυπώσει τόσο τη ροή των δεδομένων όσο και τη λογική διακυβέρνησης και ελέγχου πρόσβασης, καθιστώντας εμφανή τον τρόπο με τον οποίο τα υποσυστήματα ανταλλάσσουν πληροφορίες με ασφάλεια, ενώ παράλληλα διασφαλίζεται η πλήρης ιχνηλασιμότητα του κύκλου ζωής, η οποία αποτελεί κεντρικό σχεδιαστικό άξονα της προτεινόμενης πλατφόρμας.

Στον πυρήνα του, το διάγραμμα τοποθετεί τη βάση δεδομένων DPP ως ένα αρθρωτό, κεντρικό αποθετήριο. Συγκεντρώνει και οργανώνει το σύνολο των δεδομένων που αφορούν τον κύκλο ζωής των στρατιωτικών υποδομών και εξοπλισμών. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται ότι κάθε μεταβολή στον σχεδιασμό ή στη δομή της εγκατάστασης αποτυπώνεται με συνέπεια στο DPP. Επιπρόσθετα, υποστηρίζεται η μακροχρόνια διαχείριση στρατιωτικών υποδομών στο πλαίσιο του οποίου τα αρχεία περιουσιακών στοιχείων χωρίζονται σε υπομοντέλα για τεχνικές προδιαγραφές, περιβαλλοντικές επιδόσεις, ιστορικό προληπτικής συντήρησης, σύνθεση υλικών και τεκμηρίωση συμμόρφωσης (Kühn et al., 2025). Μέσω αυτών των υπομοντέλων, διασφαλίζεται η ιχνηλασιμότητα και η διαλειτουργικότητα. Από αυτόν τον κόμβο εκτείνονται οι κύριες διαδρομές ενσωμάτωσης που συνδέουν κρίσιμα εξωτερικά συστήματα.

Στο ένα άκρο του διαγράμματος, η πύλη διασύνδεσης Enterprise Resource Planning (ERP) λειτουργεί ως ενδιάμεσο επίπεδο μεταξύ των υφιστάμενων συστημάτων διαχείρισης πόρων και της πλατφόρμας DPP. Το σύστημα αυτό επιτρέπει την ελεγχόμενη ανταλλαγή δεδομένων των προμηθειών, της συντήρησης και των αποθεμάτων. Επίσης αντιστοιχίζει τους αναγνωριστικούς κωδικούς των περιουσιακών στοιχείων από την εσωτερική αρίθμηση αποθεμάτων με τις καταχωρήσεις DPP (Langley et al., 2023), χωρίς άμεση έκθεση του ERP. Αντίστροφα, οι ειδοποιήσεις κατάστασης που προέρχονται από δίκτυα αισθητήρων μπορούν να δημιουργούν αιτήματα εντολών εργασίας απευθείας στο ERP χωρίς περιττή χειροκίνητη εισαγωγή.



Διάγραμμα 3.1 Προτεινόμενη Υβριδική Αρχιτεκτονική Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντων (DPP) για Στρατιωτικές Υποδομές

Στο άλλο άκρο βρίσκεται το περιβάλλον BIM. Το επίπεδο διασύνδεσης BIM λειτουργεί ως ο συνδεδετικός κρίκος μεταξύ των ψηφιακών μοντέλων κτιρίων και της πλατφόρμας DPP. Τα κατασκευαστικά δεδομένα από το BIM συμπληρώνουν τα πεδία τεχνικών προδιαγραφών. Τα προφίλ ενεργειακής απόδοσης που προέρχονται από προσομοιώσεις καταγράφονται σε κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Alsolfiani, 2024). Το διάγραμμα επισημαίνει με έναν συνεχή βρόχο ανατροφοδότησης τις αλλαγές που προέρχονται από τις επιτόπιες παρεμβάσεις που καταγράφονται αλλού στο σύστημα, με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται η ακρίβεια του μοντέλου στη διάρκεια του χρόνου. Το στρώμα ενσωμάτωσης BIM λειτουργεί ως η βασική γέφυρα μεταξύ των κατασκευαστικών δεδομένων των στρατιωτικών εγκαταστάσεων και του πυρήνα του DPP.

Το δίκτυο IoT και αισθητήρων αποτελεί το υπόστρωμα συλλογής δεδομένων πραγματικού χρόνου για τις στρατιωτικές εγκαταστάσεις. Οι είσοδοι του IoT και του δικτύου αισθητήρων αναπαρίστανται ως κατανεμημένοι κόμβοι συλλογής που μεταδίδουν κρυπτογραφημένες ροές μετρήσεων μέσω πυλών σε υπηρεσίες παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο (Voulgaridis et al., 2024). Αυτοί οι κόμβοι μετρούν περιβαλλοντικές παραμέτρους (θερμοκρασία, υγρασία), δομικά φορτία, κραδασμούς και κατανάλωση ενέργειας. Τα δεδομένα αυτά παράγονται σε μορφή χρονοσειρών και συνδέονται με μοναδικούς αναγνωριστικούς κωδικούς περιουσιακών στοιχείων, επιτρέποντας τη συσχέτισή τους με τα αντίστοιχα ψηφιακά διαβατήρια προϊόντων. Στο κεντρικό αποθετήριο DPP, αξιοποιούνται τόσο για ιστορική τεκμηρίωση όσο και για την υποστήριξη διαδικασιών συντήρησης. Το διάγραμμα δείχνει τα αποτελέσματα υποστήριξης λήψης αποφάσεων που μεταβιβάζονται ταυτόχρονα στο ERP για λογιστικές ενέργειες και αποθηκεύονται σε πεδία του DPP για σκοπούς ελέγχου. Αυτός ο βρόχος ανατροφοδότησης υποστηρίζει τις αποφάσεις επανασχεδιασμού, διατηρώντας παράλληλα ακριβή στατιστικά στοιχεία ανάκτησης για υποβολές κανονιστικών αρχών.

Τα επίπεδα αποθήκευσης δεδομένων χωρίζονται σε δύο μέρη: ένα ασφαλές αποθετήριο στις εγκαταστάσεις φιλοξενεί σύνολα δεδομένων και μηχανές ανάλυσης με περιορισμένους ρόλους, ενώ ένα ομοσπονδιακό αποθετήριο συμμόρφωσης αποθηκεύει γενικευμένες πληροφορίες κύκλου ζωής που απαιτούνται στο πλαίσιο του ESPR (Langley et al., 2023).

Το επίπεδο ασφάλειας και ελέγχου πρόσβασης λειτουργεί ως ενδιάμεσο στρώμα ελέγχου πρόσβασης μεταξύ όλων των υποσυστημάτων και του κεντρικού αποθετηρίου DPP. Η

τοπολογία δικτύου που απεικονίζεται περιλαμβάνει αποστρατιωτικοποιημένες ζώνες με τείχος προστασίας που διαχειρίζονται εισερχόμενες/εξερχόμενες κλήσεις API με μετατροπή πρωτοκόλλου για τη γεφύρωση παλαιών συστημάτων (Çetin et al., 2023). Οι ζώνες αλληλεπίδρασης των χρηστών καταλαμβάνουν ένα άλλο τμήμα του διαγράμματος. Τα συνεργεία συντήρησης έχουν πρόσβαση στις διεπαφές DPP μέσω tablet ή σταθμών εργασίας που λειτουργούν σε ασφαλή τμήματα του intranet κατά τη διάρκεια των επιθεωρήσεων. Οι υπεύθυνοι λήψης αποφάσεων σε επίπεδο διοίκησης αλληλεπιδρούν μέσω ενός πίνακα ελέγχου (Dashboard) στον οποίο συγκεντρώνονται οι δείκτες απόδοσης. Μέσω του παραπάνω μηχανισμού ελέγχου πρόσβασης βάσει ρόλων, διασφαλίζεται ότι κάθε χρήστης ή σύστημα έχει πρόσβαση μόνο στα δεδομένα που αντιστοιχούν στο επίπεδο εξουσιοδότησής του. Παράλληλα, φίλτρα ταξινόμησης δεδομένων επιτρέπουν τη διάκριση μεταξύ ευαίσθητων τεχνικών πληροφοριών και δεδομένων συμμόρφωσης. Ως συνέπεια, υποστηρίζεται η διαφάνεια προς τους εποπτικούς φορείς χωρίς να παραβιάζεται η επιχειρησιακή μυστικότητα. Σε περιπτώσεις που απαιτείται διαλειτουργικότητα του NATO (Χανιάς, 2020), τα ευθυγραμμισμένα σχήματα εξάγουν επιλεγμένα σύνολα δεδομένων σε πακέτα XML συμβατά με τις εκάστοτε STANAG.

Οι οπτικοί σύνδεσμοι τονίζουν ότι η διακυβέρνηση της ασφάλειας διασταυρώνεται με κάθε σύνδεσμο στην αρχιτεκτονική και δεν υπάρχει ως απομονωμένη περιμετρική λειτουργία. Με τη ρητή δομή αυτών των κόμβων και ροών δεδομένων στο διάγραμμα του συστήματος, γίνεται εμφανές πώς οι επιχειρησιακές ανάγκες, που κυμαίνονται από την συντήρηση υποδομών κρίσιμης σημασίας για την αποστολή έως την επαληθεύσιμη ανακύκλωση υλικών περιορισμένης πρόσβασης, μπορούν να ικανοποιηθούν μέσα σε μια συνεκτική αλλά διαχωρισμένη αρχιτεκτονική. Κάθε σύνδεση διατρέχει στρώματα που έχουν σχεδιαστεί για εναρμόνιση μεταξύ ετερογενών πηγών, ενώ επιβάλλει τμηματοποίηση βάσει διαβάθμισης σε επίπεδο χαρακτηριστικών. Αυτή η οπτική άρθρωση δεν χρησιμεύει απλώς ως αναπαράσταση των τρεχουσών δυνατοτήτων, αλλά ως σχέδιο ικανό να προσαρμοστεί σε μελλοντικές νομοθετικές επεκτάσεις ή σε απαιτήσεις λειτουργίας που ενσωματώνονται σε συμμαχίες, χωρίς να θέτει σε κίνδυνο τις στρατιωτικές προτεραιότητες ασφάλειας.

3.2 Τεχνολογίες που θα Χρησιμοποιηθούν

Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική βασίζεται σε ένα σύνολο τεχνολογιών που έχουν επιλεγεί ώστε να ικανοποιούν ταυτόχρονα τις απαιτήσεις λειτουργικής αποδοτικότητας, ασφάλειας και ακεραιότητας δεδομένων στο πλαίσιο της διαχείρισης στρατιωτικών υποδομών. Η ακεραιότητα των δεδομένων του DPP διασφαλίζεται μέσω του τρόπου σχεδιασμού και λειτουργίας της εφαρμογής. Κάθε καταχώριση και ενημέρωση πραγματοποιείται αποκλειστικά μέσω του κεντρικού backend, με χρονική σήμανση και ελεγχόμενα δικαιώματα πρόσβασης ανά ρόλο χρήστη. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται μη εξουσιοδοτημένες αλλαγές και διατηρείται η συνέπεια των δεδομένων σε όλο τον κύκλο ζωής των περιουσιακών στοιχείων. Στην παρούσα πιλοτική υλοποίηση δεν χρησιμοποιούνται καταναεμημένοι μηχανισμοί αμετάβλητης καταγραφής (όπως blockchain), ωστόσο η αρχιτεκτονική επιτρέπει τη μελλοντική ενσωμάτωσή τους εφόσον απαιτηθεί. Η προσέγγιση αυτή ευθυγραμμίζεται με τις πρακτικές που εφαρμόζονται σε ελεγχόμενα στρατιωτικά περιβάλλοντα, όπου η ασφάλεια, η διαθεσιμότητα και η συμμόρφωση υπερισχύουν της πλήρους αποκέντρωσης.

Όσον αφορά την ανίχνευση και την παρακολούθηση, τα δίκτυα του IoT αποτελούν ένα ουσιαστικό υπόστρωμα για την συλλογή δεδομένων. Οι αισθητήρες τοποθετούνται σε κτίρια και συσκευές για να παρακολουθούν περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως θερμοκρασία, υγρασία και άλλες κρίσιμες παραμέτρους. Επιπλέον η χρήση IoT συσκευών για τη σύνδεση των προϊόντων με το διαδίκτυο, επιτρέπει τη συνεχή ροή δεδομένων που σχετίζονται με την κατάσταση και την απόδοση του προϊόντος. Γενικότερα, οι αισθητήρες υποστηρίζουν την παρακολούθηση του κύκλου ζωής των προϊόντων, παρέχοντας δεδομένα για τη συντήρηση, την επισκευή και την ανακύκλωση, συμβάλλοντας στη μείωση των αποβλήτων (Voulgaridis et al., 2024).

Οι αισθητήρες σε κτιριακά και μηχανολογικά συστήματα συλλέγουν μετρήσεις σε πραγματικό χρόνο (θερμοκρασία, υγρασία, δονήσεις). Κάθε σύνολο μετρήσεων συνδέεται με συγκεκριμένο εξάρτημα ή τμήμα της εγκατάστασης μέσω ενός μοναδικού αναγνωριστικού, το οποίο αποδίδεται μέσω ετικετών QR ή NFC (Domskienė & Gaidule, 2024). Με αυτόν τον τρόπο, οι πραγματικές συνθήκες λειτουργίας «δένονται» άμεσα με το αντίστοιχο DPP του περιουσιακού

στοιχείου. Οι αρχικές μετρήσεις των αισθητήρων μεταφέρονται μέσω ασφαλών συνδέσεων, όπου κρυπτογραφούνται ώστε να προστατεύεται η εμπιστευτικότητα και η ακεραιότητά τους. Αφού συγκεντρωθούν, τα δεδομένα αποθηκεύονται στο κεντρικό σύστημα DPP και αξιοποιούνται για την τεκμηριωμένη παρακολούθηση της κατάστασης των περιουσιακών στοιχείων. Στην παρούσα πιλοτική υλοποίηση, η αξιοποίηση των δεδομένων περιορίζεται στην υποστήριξη διαδικασιών καταγραφής, ελέγχου και τεκμηρίωσης της συντήρησης, βάσει ιστορικών δεδομένων και προκαθορισμένων τεχνικών ορίων λειτουργίας. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την έγκαιρη αναγνώριση αποκλίσεων από τις προβλεπόμενες συνθήκες λειτουργίας, χωρίς την εφαρμογή τεχνικών προγνωστικής συντήρησης ή αλγορίθμων τεχνητής νοημοσύνης. Η φιλοξενία δεδομένων βασίζεται σε πολυεπίπεδες λύσεις υπολογιστικού νέφους (cloud computing). Οι λύσεις υπολογιστικού νέφους προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα στην εφαρμογή των DPP. Στο πλαίσιο των στρατιωτικών εγκαταστάσεων, η χρήση cloud υλοποιείται σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα (on-premise clusters ή hybrid cloud) όπου τα ευαίσθητα πεδία του DPP αποθηκεύονται σε ασφαλείς ζώνες, ενώ τα μη διαβαθμισμένα δεδομένα μπορούν να διαμοιραστούν για κανονιστική συμμόρφωση, έτσι μπορούν να διασφαλίσουν την εύκολη πρόσβαση σε πληροφορίες σχετικά με τα προϊόντα, αναφορές ανακύκλωσης και χαρακτηριστικά βιωσιμότητας σε πραγματικό χρόνο. Αυτό ενισχύει τη διαφάνεια και την εμπιστοσύνη των χρηστών, καθώς μπορούν να ελέγχουν και να συγκρίνουν προϊόντα με βάση αξιόπιστα δεδομένα. Επιπλέον, οι λύσεις νέφους διευκολύνουν την αναβάθμιση και τη συντήρηση των DPP, επιτρέποντας τη συνεχή ενημέρωση των στοιχείων που σχετίζονται με τη βιωσιμότητα, την ανακυκλωσιμότητα και άλλες κρίσιμες πληροφορίες. Τέλος, η δυνατότητα συνδυασμού δεδομένων από διαφορετικές πηγές στο νέφος ενισχύει τη συνεργασία μεταξύ διαφόρων ενδιαφερομένων φορέων, προάγοντας καινοτόμες επιχειρηματικές πρακτικές και προωθώντας την κυκλική οικονομία (Westerlund, 2023). Οι ομοσπονδιακές αρχιτεκτονικές (federated architectures) υλοποιούν πολιτικές κατανεμημένης αποθήκευσης με γεωγραφικά κριτήρια, εξασφαλίζοντας υψηλή διαθεσιμότητα και δυνατότητα άμεσης αποκατάστασης μετά από καταστροφές. Η προστασία των δεδομένων σε όλα τα επίπεδα επιτυγχάνεται μέσω κρυπτογράφησης at-rest, με χρήση σύγχρονων συμμετρικών αλγορίθμων και διαδικασιών ανταλλαγής κλειδιών που συμμορφώνονται με αμυντικά πρότυπα πιστοποίησης.

Το middleware ενσωμάτωσης αναλαμβάνει τη γεφύρωση legacy ERP συστημάτων με το μοντέλο DPP, εφαρμόζοντας δυναμικούς μετασχηματισμούς και αντιστοιχίσεις πεδίων, ώστε

τα παλιά σχήματα δεδομένων να προσαρμόζονται στις οντολογίες του DPP χωρίς απώλεια πιστότητας ή ασυνέχειες στη ροή πληροφοριών (Langley et al., 2023). Στο επίπεδο που αφορά τον συντονισμό του σχεδιασμού, οι πλατφόρμες BIM παρέχουν έναν εξαιρετικά αποτελεσματικό μηχανισμό συντονισμού, διευκολύνοντας την επικοινωνία και τη συνεργασία μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων σε έργα υποδομής. Μέσω της δυνατότητας οπτικοποίησης του σχεδιασμού σε τρεις διαστάσεις, οι χρήστες μπορούν να κατανοήσουν καλύτερα τη σχέση μεταξύ των διαφόρων στοιχείων του έργου, μειώνοντας έτσι τις πιθανότητες λαθών και παρανοήσεων. Επιπλέον, οι πλατφόρμες BIM επιτρέπουν την ενημέρωση σε πραγματικό χρόνο και την άμεση ανταλλαγή δεδομένων, γεγονός που ενισχύει την αποδοτικότητα των διαδικασιών σχεδιασμού. Αυτός ο συντονισμός οδηγεί σε καλύτερη ανίχνευση προβλημάτων, βελτιωμένη διαχείριση χρόνου και πόρων, και τελικά σε πιο βιώσιμες κατασκευαστικές πρακτικές, ώστε αλλαγές που γίνονται σε BIM ή ERP να ενημερώνουν άμεσα το αντίστοιχο προφίλ DPP του περιουσιακού στοιχείου (Alsofiani, 2024). Οι μοναδικοί αναγνωριστικοί κωδικοί περιουσιακών στοιχείων, οι οποίοι χρησιμοποιούνται με συνέπεια σε όλα τα συστήματα ERP και BIM, αποτελούν θεμέλιο για την αξιόπιστη διασύνδεση των δεδομένων κατά την ανάπτυξη ενός DPP. Οι κωδικοί αυτοί επιτρέπουν την ακριβή αντιστοίχιση πληροφοριών που προέρχονται από διαφορετικά υποσυστήματα (όπως τεχνικές προδιαγραφές, ιστορικά συντήρησης, αλλαγές υλικών ή χωρικά χαρακτηριστικά BIM) εξασφαλίζοντας ότι κάθε ενημέρωση που πραγματοποιείται σε ένα σύστημα αντανακλάται με συνέπεια και στο DPP.

Η ομογενοποίηση των αναγνωριστικών σε βάθος δεκαετιών κύκλου ζωής μειώνει σφάλματα, αποτρέπει διπλοεγγραφές και επιτρέπει τη δημιουργία πλήρους και αξιόπιστου “ψηφιακού ιστορικού” για κάθε περιουσιακό στοιχείο. Έτσι, οι οργανισμοί μπορούν να παρακολουθούν με ακρίβεια την πραγματική κατάσταση των υποδομών, να βελτιστοποιούν τις διαδικασίες συντήρησης και να υποστηρίζουν τεκμηριωμένες αποφάσεις κατά την αναβάθμιση ή την αντικατάσταση εξοπλισμού (Langley et al., 2023).

Με τη χρήση ασφαλών API εφαρμόζονται έλεγχοι πρόσβασης σε επίπεδο χαρακτηριστικών, ώστε οι εμπορικά ευαίσθητες πληροφορίες των προμηθευτών ή οι απόρρητες τεχνικές προδιαγραφές να παραμένουν προστατευμένες, ενώ τα δεδομένα συμμόρφωσης συνεχίζουν να διακινούνται απρόσκοπτα προς τους εποπτικούς φορείς. Στο φυσικό επίπεδο, η αρχιτεκτονική

υποστηρίζει διεπαφές χρήστη προσαρμοσμένες σε διαφορετικούς ρόλους. Τα συνεργεία συντήρησης χρησιμοποιούν ανθεκτικά tablets συνδεδεμένα σε ασφαλές εσωτερικό δίκτυο για σάρωση και ενημέρωση εξοπλισμού, οι διαχειριστές έχουν πρόσβαση σε πίνακες ελέγχου που συγκεντρώνουν δείκτες απόδοσης από πολλαπλές εγκαταστάσεις, ενώ εξασφαλίζεται η ασφάλεια των δεδομένων πριν αυτά εξέλθουν από τα προστατευμένα δίκτυα (Westerlund, 2023).

Το κεντρικά συντονισμένο σύστημα ταυτοποίησης και εξουσιοδότησης εξασφαλίζει ότι οι έλεγχοι ορατότητας παραμένουν συνεπείς σε όλα τα υποσυστήματα, ανεξάρτητα από το σημείο πρόσβασης. Συνολικά, η προτεινόμενη αρχιτεκτονική βασίζεται στη συλλογή και κεντρική διαχείριση δεδομένων μέσω τεχνολογιών IoT, στη συνεκτική διασύνδεση πληροφοριών μέσω συστημάτων BIM και ERP και στη χρήση ελεγχόμενων υποδομών υπολογιστικού νέφους ή on-premise εγκαταστάσεων για την ασφαλή αποθήκευση και επεξεργασία των δεδομένων του DPP. Η αρχιτεκτονική στοχεύει στη δημιουργία ενός αξιόπιστου και πλήρους ψηφιακού αποτυπώματος του κύκλου ζωής των περιουσιακών στοιχείων, υποστηρίζοντας τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων συντήρησης χωρίς αυτοματοποιημένους μηχανισμούς πρόβλεψης ή αμετάβλητης καταγραφής.

Ένα τέτοιο σύστημα επιτρέπει τη διατήρηση ακριβούς τεκμηρίωσης της στρατιωτικής υποδομής και την υποστήριξη οργανωμένων διαδικασιών συντήρησης και ελέγχου, καλύπτοντας παράλληλα τις κανονιστικές απαιτήσεις της κυκλικής οικονομίας, χωρίς να παραβιάζονται οι απαιτήσεις επιχειρησιακής ασφάλειας και μυστικότητας που χαρακτηρίζουν τις στρατιωτικές εγκαταστάσεις.

3.3 Μοντέλο Δεδομένων DPP

Το μοντέλο δεδομένων του DPP αποτελεί τον δομικό πυρήνα της προτεινόμενης πλατφόρμας, καθώς καθορίζει τον τρόπο με τον οποίο οργανώνονται, συσχετίζονται και εξελίσσονται τα δεδομένα καθ' όλη τη διάρκεια ζωής των περιουσιακών στοιχείων. Το μοντέλο έχει σχεδιαστεί με στόχο τη σαφή διάκριση μεταξύ πληροφοριών που παραμένουν σταθερές στον χρόνο και δεδομένων που μεταβάλλονται δυναμικά κατά τη λειτουργία και τη συντήρηση των υποδομών.

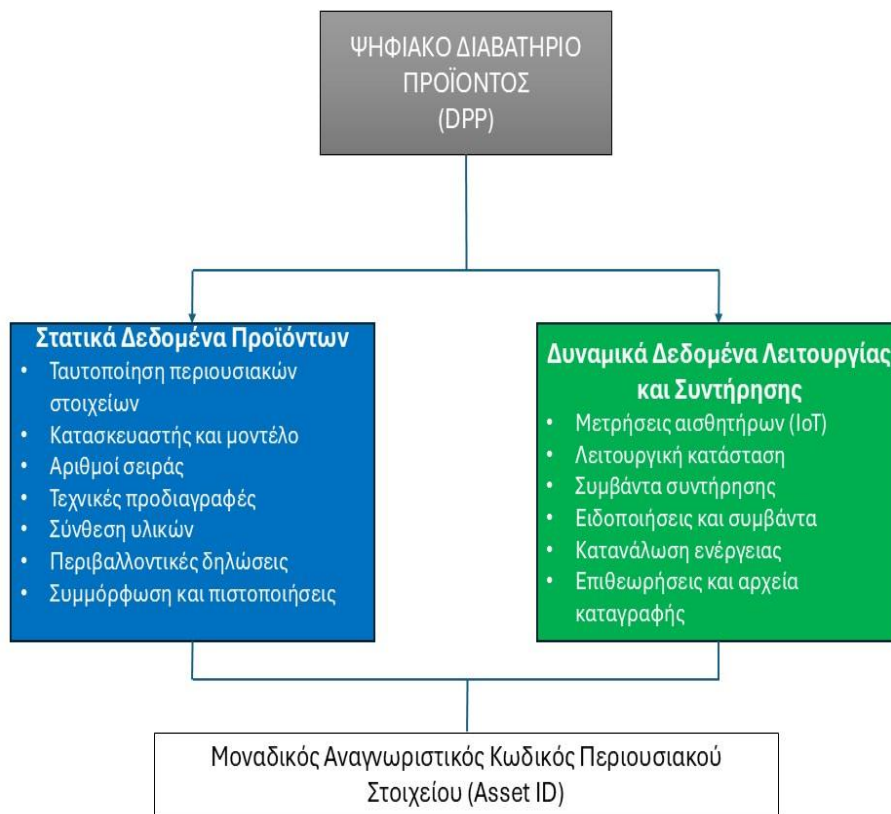
Συγκεκριμένα, το μοντέλο δομείται σε δύο συμπληρωματικά επίπεδα:

1. Στατικά δεδομένα προϊόντων, τα οποία αποτυπώνουν την ταυτότητα, τη σύνθεση και τα βασικά τεχνικά χαρακτηριστικά κάθε περιουσιακού στοιχείου, και

2. Δυναμικά δεδομένα λειτουργίας και συντήρησης, τα οποία καταγράφουν τη συμπεριφορά, την κατάσταση και το ιστορικό παρεμβάσεων κατά τον επιχειρησιακό κύκλο ζωής.

Τα δύο αυτά επίπεδα συνδέονται μέσω μόνιμων και μοναδικών αναγνωριστικών, επιτρέποντας τη συνεπή ιχνηλασιμότητα και τη διαλειτουργικότητα με εξωτερικά συστήματα, όπως ERP και BIM. Στις επόμενες υποενότητες παρουσιάζονται αναλυτικά τα χαρακτηριστικά και ο ρόλος κάθε κατηγορίας δεδομένων στο πλαίσιο της αρχιτεκτονικής DPP

Το Διάγραμμα 3.2 παρουσιάζει το εννοιολογικό μοντέλο δεδομένων του Digital Product Passport (DPP).



Διάγραμμα 3.2 Εννοιολογικό μοντέλο δεδομένων του Digital Product Passport (DPP)

3.3.1 Στατικά δεδομένα προϊόντων

Τα στατικά δεδομένα προϊόντων στο πλαίσιο του DPP περιλαμβάνουν το σύνολο των σταθερών χαρακτηριστικών που δύσκολα μεταβάλλονται και καθορίζουν την ταυτότητα, τη σύνθεση και τα βασικά χαρακτηριστικά ενός φυσικού περιουσιακού στοιχείου καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Αυτά τα σημεία δεδομένων προέρχονται συνήθως από τα στάδια του σχεδιασμού και της κατασκευής και παραμένουν σταθερά, εκτός εάν πραγματοποιηθεί σκόπιμη τροποποίηση του εξαρτήματος ή της εγκατάστασης. Η αξιοπιστία τους στο χρόνο τα καθιστά θεμελιώδη για τη διαλειτουργικότητα μεταξύ πλατφόρμων, την πιστοποίηση συμμόρφωσης και την ακριβή ιχνηλασιμότητα. Στο πλαίσιο των στρατιωτικών υποδομών, τα στατικά σύνολα δεδομένων είναι ιδιαίτερα σημαντικά, καθώς παρέχουν μια ενοποιημένη, έγκυρη αναφορά για τεχνικές λεπτομέρειες που διαφορετικά θα μπορούσαν να είναι διάσπαρτες σε παλαιότερα συστήματα τεκμηρίωσης (Cetin et al., 2023). Η ανάπτυξη και η υιοθέτηση αναγνωρισμένων προτύπων μεταδεδομένων είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική ενσωμάτωση των στατικών δεδομένων με τα συστήματα ERP και BIM. Το όφελος είναι στη συνοχή δεδομένων, δηλαδή στη χρήση κοινών προτύπων ώστε να εξασφαλίζεται ότι τα δεδομένα είναι συμβατά και κατανοητά σε όλα τα συστήματα. Οφέλη επίσης έχουμε και στην ευκολία ενημέρωσης όπου οι αναγνωρισμένοι κωδικοί περιουσιακών στοιχείων, όπως ο αριθμός μοντέλου, ο κωδικός κατασκευαστή και οι σειριακοί αριθμοί, επιτρέπουν την εύκολη και γρήγορη ενημέρωση των δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Τέλος τα στατικά δεδομένα διευκολύνουν τη συνεργασία και την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών και πλατφορμών (Langley et al., 2023).

Όσον αφορά την αρχιτεκτονική υλοποίηση, τα στατικά πεδία δεδομένων προϊόντων θα πρέπει να συμπληρώνονται κατά την αρχική προμήθεια από τον κατασκευαστή σε δομημένους και προσδιορισμένους τρόπους κωδικοποίησης, όπως αρχεία ISO 10303 STEP. Η διαδικασία εισαγωγής των δεδομένων συνοδεύεται από αυτοματοποιημένους ελέγχους εγκυρότητας, ώστε να αποφεύγονται ασυνέπειες και σφάλματα καταχώρισης. Κατά τη διάρκεια αυτών των ελέγχων επαληθεύεται, για παράδειγμα, ότι τα δηλωμένα υλικά αντιστοιχούν σε προκαθορισμένες και εγκεκριμένες κατηγορίες, καθώς και ότι οι τιμές διαστάσεων ή αντοχών βρίσκονται εντός αποδεκτών ορίων για κάθε τύπο εξαρτήματος ή εγκατάστασης. Τα στατικά σύνολα δεδομένων που προκύπτουν από αυτή τη διαδικασία λειτουργούν ως η επικύρωση για όλες τις επόμενες

αναλύσεις. Ειδικότερα, τα στατικά σύνολα δεδομένων που προκύπτουν από αυτή τη διαδικασία λειτουργούν ως σημείο αναφοράς για όλες τις επόμενες διαδικασίες τεκμηρίωσης και αξιολόγησης της κατάστασης των περιουσιακών στοιχείων. Η ύπαρξη αξιόπιστων και ορθά επικυρωμένων τεχνικών χαρακτηριστικών, όπως ονομαστικές θερμοκρασίες λειτουργίας, είναι απαραίτητη για την ορθή ερμηνεία των μεταγενέστερων λειτουργικών καταγραφών και των ιστορικών συντήρησης (Kühn et al., 2025).

Οι απαιτήσεις ασφάλειας, σε συνδυασμό με τις λειτουργικές ανάγκες των στρατιωτικών υποδομών, καθιστούν αναγκαία την αποθήκευση ανά τμήματα ορισμένων στατικών πεδίων δεδομένων. Σε αυτό το πλαίσιο, οι δημόσιες ή ρυθμιστικές διεπαφές συμμόρφωσης μπορούν να παρέχουν γενικές πληροφορίες, όπως δείκτες περιβαλλοντικής απόδοσης ή ποσοστά ανακυκλωσιμότητας, προκειμένου να καλυφθούν οι υποχρεώσεις που απορρέουν από το πλαίσιο του ESPR (Westerlund, 2023).

Αντίθετα, πιο ευαίσθητα στοιχεία, όπως λεπτομερή κατασκευαστικά σχέδια ή ιδιότητες συνθέσεις υλικών, αποθηκεύονται σε διαβαθμισμένα αποθετήρια με αυστηρούς περιορισμούς πρόσβασης (Abedi et al., 2024). Οι μηχανισμοί ελέγχου πρόσβασης σε επίπεδο χαρακτηριστικών διασφαλίζουν ότι οι κρίσιμες τεχνικές προδιαγραφές παραμένουν προστατευμένες. Ταυτόχρονα επιτρέπεται η ασφαλής διάθεση λιγότερο ευαίσθητων αναγνωριστικών δεδομένων σε συνεργατικά περιβάλλοντα, όπως τα κοινά προγράμματα διαχείρισης εγκαταστάσεων του NATO (Χανιάς, 2020).

Οι μηχανισμοί ελέγχου εκδόσεων που ενσωματώνονται στον σχεδιασμό του αποθετηρίου επιτρέπουν τη συστηματική καταγραφή κάθε εξουσιοδοτημένης μεταβολής σε βάθος χρόνου. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η παρακολούθηση αλλαγών που πραγματοποιούνται ακόμη και μετά από πολλά χρόνια, όπως για παράδειγμα η αναδρομική αναβάθμιση του κύριου δομικού υλικού ενός κτιρίου, ενώ ταυτόχρονα διατηρούνται προηγούμενες εκδόσεις για λόγους ελέγχου, επαλήθευσης ή τεχνικής διερεύνησης υπό ελεγχόμενες συνθήκες. Για την υποστήριξη της διαλειτουργικότητας μεταξύ των διαφορετικών οικοσυστημάτων λογισμικού που χρησιμοποιούνται στη διαχείριση αμυντικών περιουσιακών στοιχείων, είναι απαραίτητη η χρήση μόνιμων και μοναδικών αναγνωριστικών. Τα αναγνωριστικά αυτά λειτουργούν ως συνδετικός κρίκος μεταξύ των στατικών αρχείων προϊόντων και των δυναμικών ενοτήτων που αποτυπώνουν επιχειρησιακά δεδομένα κατά τη διάρκεια της λειτουργίας. Μέσω αυτής της σύνδεσης καθίσταται

εφικτή η υλοποίηση συγχρονισμένων ροών εργασίας ERP–BIM, όπου στατικά δεδομένα που προέρχονται από τις παραγγελίες και τα μητρώα του ERP αντιστοιχίζονται άμεσα με λειτουργικές οντότητες στα μοντέλα BIM, ενισχύοντας τη συνοχή και την ακρίβεια της τεκμηρίωσης (Alsofiani, 2024).

Για να επιτευχθεί ακρίβεια αντίστοιχη με εκείνη που απαιτείται σε κρίσιμους τομείς, όπως η υγειονομική περίθαλψη, η διαχείριση κτιρίων σε ζώνες υψηλής ασφάλειας δεν μπορεί να βασίζεται σε υπερβολικά απλουστευμένους ορισμούς στατικών ιδιοτήτων. Το επίπεδο λεπτομέρειας των δεδομένων πρέπει να σχεδιάζεται με γνώμονα τις μελλοντικές περιπτώσεις χρήσης, χωρίς όμως να δημιουργεί αδικαιολόγητους κινδύνους αποκάλυψης ευαίσθητων πληροφοριών.

Ενδεικτικά, η δημόσια καταγραφή ενός γενικού χαρακτηρισμού, όπως «δομικό πλαίσιο χωρίς σίδηρο », επαρκεί για σκοπούς τεκμηρίωσης ανακυκλωσιμότητας και περιβαλλοντικής συμμόρφωσης, ενώ τα ακριβή μεταλλουργικά χαρακτηριστικά μπορούν να διατηρούνται σε εσωτερικά, διαβαθμισμένα αποθετήρια. Με αυτόν τον τρόπο ικανοποιούνται οι κανονιστικές απαιτήσεις χωρίς να εκτίθενται λεπτομέρειες που θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν σε σενάρια αντίστροφης μηχανικής (Westerlund, 2023). Αντίστοιχη προσέγγιση μπορεί να εφαρμοστεί και στα γεωχωρικά δεδομένα, όπου η μη χρήση ακριβών συντεταγμένων περιορίζει τον κίνδυνο εκμετάλλευσης, διατηρώντας παράλληλα την απαιτούμενη ακρίβεια για αναλύσεις logistics και περιβαλλοντικής συμμόρφωσης (Wagner, 2025).

Στην καθημερινή λειτουργία των στρατιωτικών εγκαταστάσεων, τα στατικά δεδομένα προϊόντων υποστηρίζουν άμεσα το έργο των μηχανικών πεδίου κατά τις επιθεωρήσεις. Μέσω ετικετών QR ή NFC, παρέχεται γρήγορη πρόσβαση σε επικυρωμένες πληροφορίες, όπως ημερομηνίες εγκατάστασης, οριακές τιμές αντοχής ή παρουσία επικίνδυνων ουσιών, μειώνοντας την εξάρτηση από παρωχημένα έντυπα αρχεία. Η προσέγγιση αυτή βελτιώνει τον συντονισμό μεταξύ διαφορετικών ειδικοτήτων, καθώς τα συνεργεία συντήρησης αντλούν δεδομένα από ένα ενιαίο και αξιόπιστο σημείο αναφοράς, αντί για αποσπασματικές τοπικές καταγραφές που ενδέχεται να αποκλίνουν με την πάροδο του χρόνου.

Από την πλευρά της περιβαλλοντικής διακυβέρνησης, τα στατικά πεδία δεδομένων αποτυπώνουν τον αρχικό σχεδιασμό του κύκλου ζωής. Δηλώσεις αποτυπώματος άνθρακα που συνδέονται με την αρχική κατασκευή (Psarommatitis & May, 2024), αρχικές βαθμολογίες ενεργειακής απόδοσης

και οδηγίες αποσυναρμολόγησης καθορίζουν το πλαίσιο συμμόρφωσης πριν η λειτουργική φθορά μεταβάλει τα χαρακτηριστικά απόδοσης. Αυτό επιτρέπει τη συστηματική σύγκριση μεταξύ επιδόσεων που έχουν σχεδιαστεί και πραγματικών επιδόσεων. Η παραπάνω σύγκριση αποτελεί κρίσιμο στοιχείο για την αξιολόγηση πολιτικών κυκλικής οικονομίας.

Η μακροχρόνια αξιοπιστία των στατικών δεδομένων προϋποθέτει ισχυρές στρατηγικές αρχειοθέτησης. Η αναπαραγωγή δεδομένων σε γεωγραφικά κατανεμημένους κόμβους μειώνει την έκθεση σε τοπικές βλάβες ή επιθέσεις, ενώ οι μηχανισμοί κρυπτογραφικής επαλήθευσης διασφαλίζουν την ακεραιότητα κατά την ανάκτηση (Abedi et al., 2024).

Συνολικά, τα στατικά δεδομένα προϊόντων λειτουργούν ως σταθερό σημείο αναφοράς στο οικοσύστημα του DPP, πάνω στο οποίο βασίζονται με ασφάλεια οι δυναμικές ενημερώσεις σε βάθος χρόνου (Kühn et al., 2025). Μέσα από μια προσεκτικά σχεδιασμένη αρχιτεκτονική, που ισορροπεί τη διαφάνεια με τις απαιτήσεις ασφάλειας, τα δεδομένα αυτά συνδέουν τον αρχικό σχεδιαστικό σκοπό με την επιχειρησιακή πραγματικότητα των στρατιωτικών υποδομών. Τα στατικά δεδομένα αποτελούν τη σταθερή βάση πάνω στην οποία δομούνται τα δυναμικά λειτουργικά δεδομένα που αναλύονται στην επόμενη ενότητα

3.3.2 Δυναμικά Δεδομένα Λειτουργίας και Συντήρησης

Τα δυναμικά λειτουργικά δεδομένα αναφέρονται στο συνεχώς ενημερωμένο σύνολο παραμέτρων, συμβάντων και μετρήσεων που περιγράφουν την απόδοση, το ιστορικό χρήσης και τις περιβαλλοντικές αλληλεπιδράσεις ενός περιουσιακού στοιχείου στο πέρασμα του χρόνου. Σε αντίθεση με τα στατικά δεδομένα που αναφέρονται λεπτομερώς στην ενότητα 3.2.1, τα δεδομένα αυτά εξελίσσονται ανάλογα με τις συνθήκες λειτουργίας, τις παρεμβάσεις συντήρησης και τις αλλαγές στο περιβάλλον.

Μέσα σε μια αρχιτεκτονική DPP προσαρμοσμένη για στρατιωτικές υποδομές, αυτά τα σύνολα δεδομένων αποτελούν το ζωντανό αρχείο της κατάστασης ενός κτιρίου ή ενός εξαρτήματος. Τα δεδομένα αυτά είναι απαραίτητα για δραστηριότητες όπως ο προγραμματισμός συντηρήσεων, οι αξιολογήσεις ετοιμότητας και η υποβολή εκθέσεων συμμόρφωσης στο πλαίσιο των

εξελισσόμενων πολιτικών πλαισίων. Το εύρος των δυναμικών εισροών εκτείνεται από αυτοματοποιημένες ροές αισθητήρων έως χειροκίνητα καταχωρημένα αρχεία δραστηριοτήτων.

Τα δίκτυα με δυνατότητα IoT που είναι ενσωματωμένα σε όλες τις εγκαταστάσεις, τα οποία περιλαμβάνουν αισθητήρες θερμοκρασίας, αισθητήρες δόνησης σε περιστρεφόμενα μηχανήματα, μετρητές τάσης σε δομικά στοιχεία και μετρητές κατανάλωσης ενέργειας, παράγουν χρονοσειρές υψηλής συχνότητας που εισάγονται στα λειτουργικά υπομοντέλα του DPP (Voulgaridis et al., 2024). Οι δομές δεδομένων φιλοξενούν αυτές τις συνεχείς ροές διατηρώντας χρονολογικά ιστορικά παραμέτρων, όπως θερμοκρασίας λειτουργίας, εύρη υγρασίας κ.α (Kühn et al., 2025). Οι αποκλίσεις από τις καθιερωμένες βασικές γραμμές μπορούν να επισημαίνονται αυτόματα, δημιουργώντας εναύσματα για ροές εργασιών συντήρησης χωρίς ανθρώπινη παρέμβαση. Ωστόσο, σε κρίσιμες υποδομές οι αποκλίσεις αυτές, δύνανται να αξιολογούνται από το τεχνικό προσωπικό, λειτουργώντας ως τεκμηριωμένα εναύσματα για τον προγραμματισμό ελέγχων ή παρεμβάσεων συντήρησης. Αυτή η διαδικασία όχι μόνο επιταχύνει την ανίχνευση βλαβών, αλλά επιτρέπει επίσης την λεπτομερή ανάλυση τάσεων που είναι απαραίτητη σε στρατιωτικά περιβάλλοντα όπου τα προφίλ αποστολών και οι περιβαλλοντικές συνθήκες ποικίλλουν δραστικά μεταξύ των αποστολών.

Οι χειροκίνητες ενημερώσεις παραμένουν κρίσιμες όπου η χρήση οργάνων είναι πρακτικά αδύνατη ή όπου πρέπει να καταγραφεί ποιοτικό πλαίσιο, για παράδειγμα περιγράφοντας ζημιές από ακραία καιρικά φαινόμενα ή σημειώνοντας αποκλίσεις που παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια οπτικών επιθεωρήσεων σε ασφαλείς περιοχές που δεν είναι προσβάσιμες σε δικτυακές συσκευές (Çetin et al., 2023). Αυτές οι καταχωρήσεις μπορεί να καταγράφουν ανωμαλίες που εντοπίζονται στην κατάσταση της πρόσοψης μέσω οπτικής αξιολόγησης ή ασυνήθιστων ακουστικών χαρακτηριστικών μέσα σε κλειστούς χώρους μηχανημάτων. Η ενσωμάτωση φωτογραφικής τεκμηρίωσης ή σχολιασμένων σχηματικών διαγραμμάτων στα αρχεία διαβατηρίων ενισχύει την αξιοπιστία των αποδεικτικών στοιχείων. Ωστόσο, οι μορφές αρχείων και οι ετικέτες μεταδεδομένων πρέπει να συμμορφώνονται με διαλειτουργικά πρότυπα, ώστε οι μηχανές ανάλυσης να μπορούν να τα διασταυρώνουν αποτελεσματικά με ποσοτικά σύνολα δεδομένων (Westerlund, 2023).

Η αλληλεπίδραση μεταξύ των παραπάνω μετρήσεων και των περιβαλλοντικών παραγόντων σημαίνει ότι δύο φαινομενικά πανομοιότυπα περιουσιακά στοιχεία μπορούν να έχουν σημαντικά

διαφορετική προβλεπόμενη διάρκεια ζωής, ανάλογα με το ιστορικό έκθεσής τους που καταγράφεται σε δυναμικά πεδία. Τα προφίλ κατανάλωσης ενέργειας χρησιμεύουν τόσο για την παρακολούθηση της λειτουργικής αποδοτικότητας όσο και για τη συμμόρφωση με τις υποχρεώσεις βιωσιμότητας (Psarommatis & May, 2024). Η συνεχής μέτρηση επιτρέπει στις πλατφόρμες DPP να συντάσσουν καμπύλες δεδομένων που αφορούν ημερήσιες και εποχιακές μετρήσεις. Ανωμαλίες, όπως μια απότομη αύξηση του βασικού φορτίου κατά τη διάρκεια ενός Σαββατοκύριακου σε ένα διοικητικό κτίριο που υποτίθεται ότι είναι αδρανές, μπορούν να οδηγήσουν σε άμεση διερεύνηση. Η αποθήκευση τέτοιων συνόλων δεδομένων κατά τη διάρκεια του χρόνου υποστηρίζει τις συγκρίσεις απόδοσης από έτος σε έτος, προκειμένου να επιβεβαιωθούν οι ισχυρισμοί σχετικά με την απόδοση της επένδυσης σε αναβαθμίσεις ή να εντοπιστεί η σταδιακή υποβάθμιση της απόδοσης του συστήματος (Alsofiani, 2024). Αυτή η σύνδεση των τρεχουσών μετρήσεων με ιστορικές τιμές αναφοράς αποτελεί έναν μηχανισμό ανατροφοδότησης που διασφαλίζει ότι τα προηγούμενα μέτρα αποδοτικότητας συνεχίζουν να αποφέρουν τα επιδιωκόμενα οφέλη υπό πραγματικές συνθήκες χρήσης.

Τα λειτουργικά συμβάντα που καταγράφονται σε δυναμικά δεδομένα επεκτείνονται σε ενέργειες επισκευής, αντικατάσταση εξαρτημάτων, δραστηριότητες βαθμονόμησης, επιτυχημένες ή αποτυχημένες επιθεωρήσεις και ενημερώσεις λογισμικού/υλικολογισμικού που εφαρμόζονται σε ενσωματωμένα συστήματα ελέγχου (Kühn et al., 2025). Κάθε συμβάν φέρει χρονική σήμανση, συνδέεται με το σχετικό αναγνωριστικό περιουσιακού στοιχείου που μοιράζεται με στατικά αρχεία προϊόντων και συνοδεύεται, όπου είναι δυνατόν, από την ταυτοποίηση του υπεύθυνου, είτε πρόκειται για κωδικό προσωπικού συντήρησης είτε για αναγνωριστικό εταιρείας αναδόχου, με την επιφύλαξη των κανόνων περί απορρήτου (Westerlund, 2023). Εάν προκύψει βλάβη λίγο μετά την παρέμβαση, οι έρευνες για την αιτία μπορούν να προσδιορίσουν γρήγορα εάν συνέβαλαν σε αυτό προβλήματα κατασκευής ή απρόβλεπτοι εξωτερικοί παράγοντες.

Η ενσωμάτωση δεδομένων θέσης εμπλουτίζει περαιτέρω τα δυναμικά αρχεία όταν τα περιουσιακά στοιχεία είναι κινητά εντός μιας εγκατάστασης ή μετακινούνται μεταξύ εγκαταστάσεων στο πλαίσιο προγραμμάτων αναδιάρθρωσης (Píétron et al., 2023). Τα αρχεία καταγραφής RFID που συνδέονται με GPS μπορούν να καταγράφουν αυτόματα τις μετακινήσεις των συσκευών όταν διασχίζουν καθορισμένα σημεία ελέγχου εντός ενός logistics hub. Οι αντίστοιχες καταχωρήσεις DPP προσαρμόζουν τα πεδία θέσης αναλόγως, διατηρώντας παράλληλα τις προηγούμενες θέσεις

για ιχνηλασιμότητα καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για αρθρωτά συστήματα που αναπτύσσονται προσωρινά σε προκεχωρημένες τοποθεσίες πριν από την επανένταξή τους σε μόνιμες βάσεις. Για ευαίσθητες αναπτύξεις που απαιτούν μυστικότητα της θέσης εκτός των εξουσιοδοτημένων δικτύων (Χανιάς, 2020), η ακρίβεια της θέσης μπορεί να υποβαθμιστεί σκόπιμα (π.χ. καταγράφεται σε περιφερειακή κλίμακα), ενώ εξακολουθεί να μεταφέρει επαρκείς πληροφορίες εσωτερικά για την αποτελεσματική οργάνωση των επισκέψεων συντήρησης.

Μια διαρκής πρόκληση έγκειται στη δομή αρχιτεκτονικών αποθήκευσης. Οι δομές αυτές πρέπει να είναι ικανές να απορροφούν μεγάλους όγκους από ετερογενείς τροφοδοσίες χωρίς να θέτουν σε κίνδυνο την ανταπόκριση στις ερωτήσεις που είναι απαραίτητη κατά τη λήψη επιχειρησιακών αποφάσεων.

Οι διαδικασίες καθαρισμού δεδομένων εκτελούνται συνεχώς για την επίλυση ασυνεπειών που προκύπτουν από σφάλματα χειροκίνητης εισαγωγής ή βλάβες αισθητήρων. Διαδικασίες ελέγχου ποιότητας δεδομένων εφαρμόζονται συστηματικά για την αναγνώριση ασυνεπειών που μπορεί να προκύψουν από σφάλματα χειροκίνητης εισαγωγής ή τεχνικές δυσλειτουργίες αισθητήρων. Τιμές που αποκλίνουν εμφανώς από τα αναμενόμενα όρια καταγράφονται και επισημαίνονται για περαιτέρω έλεγχο από εξουσιοδοτημένο προσωπικό πριν χρησιμοποιηθούν σε συγκριτικές αναλύσεις ιστορικών δεδομένων (Abedi et al., 2024). Λαμβάνοντας υπόψη τους περιορισμούς ασφάλειας της άμυνας που συζητήθηκαν προηγουμένως (Langley et al., 2023), τα δυναμικά σύνολα δεδομένων που αποθηκεύονται εξωτερικά πρέπει να υποβάλλονται σε φιλτράρισμα ταξινόμησης, έτσι ώστε καμία ροή τηλεμετρίας να μην αποκαλύπτει κατά λάθος ευαίσθητα επιχειρησιακά χρονικά διαστήματα.

Συνοψίζοντας, η αξία των δυναμικών επιχειρησιακών δεδομένων αναδεικνύεται μέσω της συνδυασμένης αξιοποίησής τους με τα στατικά σύνολα αναφοράς. Ο συνδυασμός αυτός επιτρέπει τη δημιουργία πλήρους και τεκμηριωμένου ιστορικού λειτουργίας και συντήρησης, μετατρέποντας το DPP από παθητικό αποθετήριο πληροφοριών σε δομημένο πλαίσιο επιχειρησιακής τεκμηρίωσης. Στο πλαίσιο της διαχείρισης στρατιωτικών υποδομών, η προσέγγιση αυτή υποστηρίζει τεκμηριωμένες παρεμβάσεις και ελέγχους, χωρίς αυτοματοποιημένους μηχανισμούς πρόβλεψης, διατηρώντας παράλληλα τη συμμόρφωση με αυστηρά καθεστώτα ασφάλειας και εμπιστευτικότητας.

3.4 Σύνδεση με ERP ή BIM Πλατφόρμες

Η διασύνδεση των συστημάτων ERP με τις πλατφόρμες BIM σε ένα περιβάλλον με δυνατότητες DPP προϋποθέτει τόσο τεχνική όσο και σημασιολογική ευθυγράμμιση. Η ευθυγράμμιση αυτή είναι κρίσιμη, ώστε τα δεδομένα που σχετίζονται με τον κύκλο ζωής, τη λειτουργία και τη συντήρηση των περιουσιακών στοιχείων να μπορούν να μεταφέρονται απρόσκοπτα μεταξύ τομέων που παραδοσιακά λειτουργούν απομονωμένα.

Σε στρατιωτικά περιβάλλοντα, και σύμφωνα με επίσημο έγγραφο του North Atlantic Treaty Organization (NATO) για τα συστήματα ERP, οι υπηρεσίες αυτές παρέχουν διεπιστημονική υποστήριξη βασικών λειτουργιών, όπως η οικονομική διαχείριση, το ανθρώπινο δυναμικό και οι διαδικασίες προμηθειών, ενσωματώνοντας παράλληλα δυνατότητες logistics και διαχείρισης περιουσιακών στοιχείων σε επίπεδο Συμμαχίας (North Atlantic Treaty Organization, 2021). Το BIM, από την άλλη πλευρά, περιλαμβάνει πλούσιες χωρικές και σχεδιαστικές πληροφορίες που αφορούν συγκεκριμένα δομικά ή τεχνικά εξαρτήματα, παρέχοντας λεπτομερή αναπαράσταση της φυσικής και λειτουργικής τους υπόστασης.

Η γεφύρωση των δεδομένων που προέρχονται από τα συστήματα ERP και BIM δύναται να βελτιώσει ουσιαστικά την ακρίβεια, την επικαιρότητα και την πληρότητα των ενημερώσεων του DPP, ιδίως σε περιβάλλοντα υψηλής πολυπλοκότητας και αυξημένων απαιτήσεων διαφάνειας, όπως οι στρατιωτικές υποδομές (Alsofiani, 2024). Ο επιδιωκόμενος στόχος είναι η επίτευξη μιας συγχρονισμένης κατάστασης, στην οποία οι συναλλαγές ERP (όπως οι παραγγελίες ανταλλακτικών ή τα αρχεία ολοκληρωμένης συντήρησης) και τα μοντέλα περιουσιακών στοιχείων που προέρχονται από το BIM συνεισφέρουν συλλογικά στη συμπλήρωση των αντίστοιχων υπομοντέλων του DPP, χωρίς την ανάγκη διπλής καταχώρισης ή χειροκίνητης εισαγωγής δεδομένων.

Ένα βασικό σημείο εκκίνησης είναι η καθιέρωση μοναδικών αναγνωριστικών που παραμένουν σε όλες τις πλατφόρμες. Πολλά στρατιωτικά συστήματα ERP χρησιμοποιούν σχήματα αρίθμησης περιουσιακών στοιχείων που συνδέονται με την κωδικοποίηση του NATO ή με εσωτερικά συστήματα. Αυτά πρέπει να αντιστοιχίζονται με συνέπεια σε αναγνωριστικά αντικειμένων BIM (Langley et al., 2023). Στο εσωτερικό της αρχιτεκτονικής DPP, η

ευθυγράμμιση λειτουργεί ως συνδετικός κρίκος που επιτρέπει την αυτόματη διάδοση των αλλαγών κατάστασης. Η ολοκλήρωση μιας εντολής εργασίας στο ERP ενημερώνει αυτόματα το πεδίο ιστορικού συντήρησης στο διαβατήριο. Αντίστροφα, οι ενδείξεις κατάστασης που προέρχονται από αισθητήρες ή λειτουργικές καταγραφές συσχετίζονται με τα αντίστοιχα αντικείμενα BIM και αποτυπώνονται στο DPP ως τεκμηριωμένα συμβάντα. Τα συμβάντα αυτά αξιολογούνται από το τεχνικό προσωπικό και μπορούν, εφόσον κριθεί αναγκαίο, να οδηγήσουν στη δημιουργία εντολών εργασίας στο ERP. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται η ανθρώπινη εποπτεία στη λήψη αποφάσεων συντήρησης, χωρίς αυτοματοποιημένους μηχανισμούς ανάλυσης ή πρόβλεψης. Για να επιτευχθεί αυτή η αμφίδρομη ροή, τα APIs ή τα συστήματα μηνυμάτων διευκολύνουν την ανταλλαγή δεδομένων σε ελεγχόμενα χρονικά διαστήματα ή βάσει εγκεκριμένων συμβάντων και έχουν τον ρόλο μεταφραστή μεταξύ των δομημένων πινάκων του ERP και των μεταδεδομένων που βασίζονται στα αντικείμενα του BIM. Από την πλευρά του BIM, η ενσωμάτωση με τις δομές DPP σημαίνει την επέκταση των ιδιοτήτων των αντικειμένων ώστε να περιλαμβάνουν πεδία σχετικά με το διαβατήριο πέρα από τους τυπικούς γεωμετρικούς και υλικούς ορισμούς. Αυτό μπορεί να περιλαμβάνει την ενσωμάτωση αξιολογήσεων περιβαλλοντικής απόδοσης ή ποσοστών ανακυκλωσιμότητας (Kühn et al., 2025). Όταν τα εμπλουτισμένα μοντέλα BIM εξάγονται μέσω ανοιχτών προτύπων, όπως τα Industry Foundation Classes (IFC), μπορούν να αναλυθούν από τον πυρήνα του DPP και να ενταχθούν στις αντίστοιχες κατηγορίες δεδομένων κύκλου ζωής. Αντίστοιχα, κατά την εισαγωγή δεδομένων από το ERP, πληροφορίες όπως το κόστος, τα στοιχεία προμηθευτών και οι περίοδοι εγγύησης εμπλουτίζουν τα αρχεία του ψηφιακού διαβατηρίου. Βασική προϋπόθεση για αυτή τη διαδικασία αποτελεί η εφαρμογή μηχανισμών ταξινόμησης και ελέγχου πρόσβασης, ώστε ευαίσθητες συμβατικές πληροφορίες να είναι διαθέσιμες αποκλειστικά σε εξουσιοδοτημένους ρόλους (Westerlund, 2023).

Στην πράξη, οι στρατιωτικοί πόροι υφίστανται συχνά διαδοχικές αναβαθμίσεις σε βάθος δεκαετιών. Σε αυτό το πλαίσιο, ο συγχρονισμός μεταξύ ERP και BIM λειτουργεί ως συνεχής βρόχος ανατροφοδότησης που διασφαλίζει ότι η ακρίβεια των ψηφιακών μοντέλων δεν υποβαθμίζεται με την πάροδο του χρόνου. Τροποποιήσεις που πραγματοποιούνται στο πεδίο κατά τη διάρκεια εργασιών συντήρησης καταγράφονται στο ERP, συνήθως με τη μορφή επικαιροποιημένων καταλόγων υλικών ή εντολών εργασίας. Οι καταχωρήσεις αυτές ενεργοποιούν αναθεωρήσεις στα αντίστοιχα μοντέλα BIM, ώστε οι απεικονίσεις να

αντανακλούν την πραγματική κατάσταση της εγκατάστασης. Στη συνέχεια, τα ενημερωμένα μεταδεδομένα των εξαρτημάτων ενημερώνουν τα αρχεία του DPP, τα οποία συνδέονται και με τις οδηγίες αποσυναρμολόγησης στο τέλος του κύκλου ζωής (Çetin et al., 2023).

Η διαδικασία αυτή παρουσιάζει προκλήσεις, κυρίως λόγω των διαφορετικών ρυθμών λειτουργίας των εμπλεκόμενων συστημάτων. Το ERP βασίζεται σε συναλλαγές και ενημερώνεται κάθε φορά που ολοκληρώνεται μια εγκεκριμένη ενέργεια, ενώ το BIM αναθεωρείται συχνά ασύγχρονα, κυρίως στο πλαίσιο μεγάλων έργων ή παρεμβάσεων. Για τον μετριασμό αυτής της ασυμμετρίας, η υιοθέτηση κοινών λεξικών δεδομένων και συστημάτων ταξινόμησης, σύμφωνα με πρότυπα που προωθούνται σε ευρωπαϊκό και ΝΑΤΟϊκό επίπεδο, αποτελεί μια βιώσιμη μακροπρόθεσμη στρατηγική (Langley et al., 2023).

Ενδεικτικά, ειδοποιήσεις από αισθητήρες που αξιολογούνται βάσει προκαθορισμένων ορίων και δεικτών κατάστασης μπορούν να υποδείξουν αποκλίσεις στη λειτουργία μιας μονάδας ψύξης, επιτρέποντας την έγκαιρη επισήμανση αναγκών συντήρησης. Η ανωμαλία αυτή συσχετίζεται άμεσα με το αντίστοιχο αντικείμενο στο BIM, παρέχοντας χωρικό και τεχνικό πλαίσιο για τον σχεδιασμό της επέμβασης. Ταυτόχρονα δημιουργεί μια ροή εργασίας στο ERP για την προμήθεια των απαραίτητων ανταλλακτικών. Με την ολοκλήρωση της διαδικασίας, οι ενημερώσεις που προέρχονται από το ERP ενσωματώνονται στο ιστορικό του DPP, διατηρώντας πλήρη ιχνηλασιμότητα από την αρχική ανίχνευση της βλάβης έως την αποκατάστασή της. Η ενσωμάτωση αυτού του κλειστού βρόχου συμβάλλει στη μείωση του χρόνου διακοπής λειτουργίας και διασφαλίζει ότι όλοι οι εμπλεκόμενοι φορείς, από τα συνεργεία συντήρησης έως τις υπηρεσίες προμηθειών, λαμβάνουν αποφάσεις βασισμένες σε συνεπή και επικαιροποιημένα δεδομένα.

Οι απαιτήσεις ασφάλειας του τομέα της άμυνας περιπλέκουν την διαδικασία που περιγράψαμε στις προηγούμενες παραγράφους. Οι κανόνες τμηματοποίησης δικτύου συχνά διαχωρίζουν τους διακομιστές BIM που είναι προσανατολισμένοι στο σχεδιασμό από τις ευαίσθητες βάσεις δεδομένων ERP (Westerlund, 2023). Η γεφύρωσή τους για σκοπούς DPP απαιτεί ασφαλείς πύλες ικανές να επιβάλλουν ελέγχους πρόσβασης σε επίπεδο χαρακτηριστικών. Το μη εξουσιοδοτημένο προσωπικό που έχει πρόσβαση σε προβολές BIM δεν πρέπει να μπορεί να ανακτήσει ταξινομημένες λεπτομέρειες προμηθειών που είναι αποθηκευμένες σε διακομιστές ERP. Επίσης, η κρυπτογράφηση κατά τη μεταφορά με τη χρήση εγκεκριμένων αλγορίθμων

εξασφαλίζει την ασφάλεια των κλήσεων API. Επιπρόσθετα, η πρόσβαση βάσει ρόλων διασφαλίζει ότι κάθε πλατφόρμα εκθέτει μόνο επιτρεπόμενα υποσύνολα του σχήματός της στις υπηρεσίες που υποβάλλουν τα αιτήματα (Abedi et al., 2024).

Για υποδομές που εξακολουθούν να διαχειρίζονται σε μεγάλο βαθμό μέσω παλαιών αρχείων CAD ή μη δικτυωμένων εργαλείων προγραμματισμού, μια σταδιακή στρατηγική αναβάθμισης μπορεί να περιλαμβάνει την κατασκευή ελαφρών μοντέλων BIM από σαρώσεις λέιζερ (Çetin et al., 2023). Αρχικά συνδέονται με μερικά σύνολα δεδομένων ERP που καλύπτουν μόνο κρίσιμα περιουσιακά στοιχεία. Με την πάροδο του χρόνου, αυτή η σταδιακή διαδικασία εμπλουτισμού συμπληρώνει την πλήρη κάλυψη συνδεσιμότητας χωρίς να επιβαρύνει υπερβολικά τους πόρους του έργου.

Όσον αφορά την οργάνωση της ροής εργασίας στο πλαίσιο της ευρύτερης πλατφόρμας διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας, η συνδεδεμένη τριάδα ERP-BIM-DPP αποτελεί έναν δυναμικό άξονα. Το ERP στηρίζει τη χρηματοοικονομική και προμηθευτική πειθαρχία, το BIM στηρίζει το χωρικό και το φυσικό πλαίσιο, ενώ το DPP κωδικοποιεί τη συμμόρφωση με τον κύκλο ζωής (Langley et al., 2023). Η τριάδα αυτή υλοποιεί σενάρια όπως ο συντονισμός εργασιών ανακαίνισης χρησιμοποιώντας συγκεντρωτικά προφίλ ενεργειακής απόδοσης. Τα προφίλ προέρχονται από περιβαλλοντικά πεδία DPP που συμπληρώνονται μέσω προσομοιώσεων κτιριακής φύσης BIM (Alsofiani, 2024). Τέλος, τα συγκεκριμένα προφίλ διασταυρώνονται με τη διαθεσιμότητα του προϋπολογισμού που προβλέπεται στο ERP. Η διαλειτουργικότητα παύει έτσι να είναι καθαρά μια τεχνική συνδεσιμότητα και γίνεται ένας λειτουργικός καταλύτης που επιτρέπει τη λήψη αποφάσεων σε πολλαπλά επίπεδα ώστε να ενεργούν με συνέπεια τόσο στο πλαίσιο των κανονιστικών υποχρεώσεων όσο και των περιορισμών ετοιμότητας για αποστολές. Οι αποφάσεις αυτές βασίζονται σε τεκμηριωμένα δεδομένα και λαμβάνονται από εξουσιοδοτημένα στελέχη, σύμφωνα με τις καθιερωμένες διαδικασίες διοίκησης και ελέγχου. Η τυποποίηση αυτής της ενσωμάτωσης σύμφωνα με τις ευρωπαϊκές αρχές διαλειτουργικότητας δημιουργεί οφέλη συμβατότητας με μελλοντικές εκδόσεις που υπερβαίνουν την εγχώρια εφαρμογή (Wagner, 2025).

Συνοψίζοντας, η επίτευξη αποτελεσματικής συνδεσιμότητας μεταξύ ERP και BIM σε ένα οικοσύστημα DPP προσαρμοσμένο στις στρατιωτικές ανάγκες δεν περιορίζεται μόνο στη

γεφύρωση ετερογενών πληροφοριακών συστημάτων. Αφορά πρωτίστως τη διατήρηση της συνοχής μεταξύ τριών διακριτών αλλά αλληλένδετων διαστάσεων της πληροφορίας:

- του τι είχε αρχικά σχεδιαστεί (BIM – σχεδιαστική πρόθεση),
- του τι έχει πράγματι υλοποιηθεί και καταγραφεί (ERP –λειτουργικό αρχείο),
- και του τι πρέπει να τεκμηριώνεται και να κοινοποιείται με ασφάλεια και διαφάνεια σε βάθος χρόνου (Kühn et al., 2025; Westerlund, 2023).

Όταν αυτή η ενοποίηση υλοποιείται με ορθό τρόπο, προκύπτει ένα συγχρονισμένο ψηφιακό περιβάλλον. Σε αυτό το περιβάλλον, το χωρικό και τεχνικό πλαίσιο των υποδομών υποστηρίζει ουσιαστικά τις αποφάσεις logistics, οι οικονομικοί και λειτουργικοί περιορισμοί μετριάζουν τις σχεδιαστικές φιλοδοξίες και η διαχείριση του κύκλου ζωής ανταποκρίνεται ταυτόχρονα στις απαιτήσεις των ρυθμιστικών πλαισίων και στις επιταγές της επιχειρησιακής εμπιστευτικότητας που χαρακτηρίζουν τις αμυντικές εγκαταστάσεις.

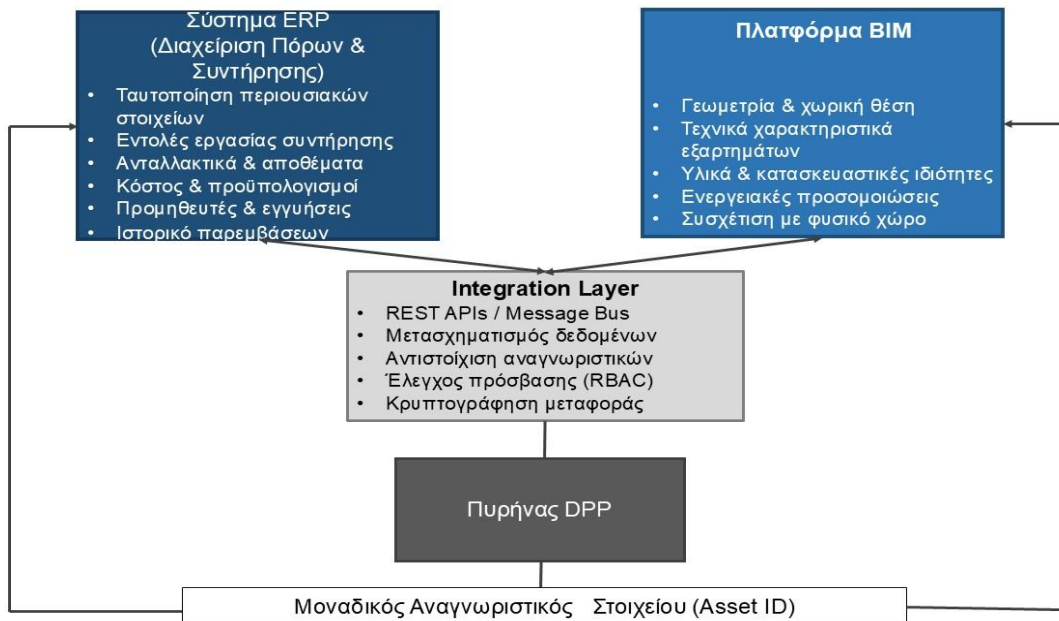
3.4.1 Μηχανισμός Διασύνδεσης ERP–BIM–DPP

Σε τεχνικό επίπεδο, η διασύνδεση μεταξύ των συστημάτων ERP, των πλατφορμών BIM και του πυρήνα του DPP υλοποιείται μέσω ενός ενδιάμεσου επιπέδου ολοκλήρωσης (integration layer), το οποίο λειτουργεί ως μηχανισμός απομόνωσης και ελέγχου της ανταλλαγής δεδομένων. Το επίπεδο αυτό υλοποιείται συνήθως με τη μορφή RESTful υπηρεσιών.

Από την πλευρά των συστημάτων ERP, η ανταλλαγή δεδομένων αφορά κυρίως δομημένες συναλλαγές, όπως εντολές εργασίας συντήρησης, καταλόγους ανταλλακτικών, εγγραφές κόστους και συμβάσεις προμηθειών. Τα δεδομένα αυτά εξάγονται μέσω ασφαλών API σε μορφή δομημένων μηνυμάτων (π.χ. JSON ή XML) και χαρτογραφούνται σε αντίστοιχα πεδία του μοντέλου DPP, όπως το ιστορικό συντήρησης, τα στοιχεία προέλευσης και οι εγγυήσεις εξοπλισμού.

Στην αντίθετη κατεύθυνση, το BIM λειτουργεί κυρίως ως πηγή αντικειμενοστραφών δεδομένων. Τα αντικείμενα BIM (π.χ. μονάδες HVAC, ηλεκτρολογικοί πίνακες, δομικά στοιχεία) εμπλουτίζονται με πρόσθετες ιδιότητες που αφορούν το DPP, όπως μοναδικά

αναγνωριστικά περιουσιακών στοιχείων, περιβαλλοντικούς δείκτες και δείκτες κύκλου ζωής. Η εξαγωγή των δεδομένων αυτών πραγματοποιείται μέσω ανοιχτών προτύπων, όπως τα Industry Foundation Classes (IFC), τα οποία επιτρέπουν την ανεξάρτητη επεξεργασία των μεταδεδομένων από τον πυρήνα του DPP χωρίς εξάρτηση από συγκεκριμένο λογισμικό BIM. Κεντρικό στοιχείο αποτελεί η χρήση ενός μοναδικού αναγνωριστικού περιουσιακού στοιχείου (Asset ID), το οποίο διατηρείται κοινό σε ERP, BIM και DPP. Το αναγνωριστικό αυτό αποτρέπει διπλοεγγραφές, επιτρέπει την ακριβή αντιστοίχιση εγγραφών μεταξύ συστημάτων και λειτουργεί ως σημείο συσχέτισης όλων των στατικών και δυναμικών δεδομένων κύκλου ζωής. Για την υποστήριξη της επιχειρησιακής ασφάλειας, το επίπεδο ολοκλήρωσης εφαρμόζει ελέγχους πρόσβασης βάσει ρόλων και χαρακτηριστικών, εξασφαλίζοντας ότι κάθε σύστημα λαμβάνει μόνο το υποσύνολο των δεδομένων που απαιτείται για τη λειτουργία του. Με τον τρόπο αυτό, ευαίσθητες πληροφορίες κόστους ή προμηθειών παραμένουν εντός των ορίων του ERP, ενώ το DPP λαμβάνει μόνο τα απαραίτητα δεδομένα για τεκμηρίωση κύκλου ζωής και συμμόρφωση. Η τεχνική αυτή σχέση αποτυπώνεται σχηματικά στο διάγραμμα 3.3, όπου παρουσιάζεται το επίπεδο ολοκλήρωσης ως ενδιάμεσος μηχανισμός διασύνδεσης μεταξύ ERP, BIM και πυρήνα DPP.



Διάγραμμα 3.3. Τεχνική διασύνδεση συστημάτων ERP και BIM με τον πυρήνα του Digital Product Passport (DPP) μέσω επιπέδου ολοκλήρωσης.

3.5 Υπολογισμός Λειτουργικού Δείκτη Κινδύνου (Risk Index)

Στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, ο λειτουργικός κίνδυνος των κτιριακών υποδομών δεν προσεγγίζεται ως πιθανότητα αστοχίας με αυστηρά στοχαστικούς όρους, αλλά ως συνθετικός δείκτης επιχειρησιακής κατάστασης, ο οποίος αποτυπώνει τη συνολική επιβάρυνση του συστήματος με βάση τρέχοντα και ιστορικά λειτουργικά δεδομένα. Η επιλογή αυτή ευθυγραμμίζεται με τις αρχές της διαχείρισης κινδύνου όπως περιγράφονται στα πρότυπα ISO 31000 και IEC 31010 (International Organization for Standardization, 2018; International Electrotechnical Commission, 2019), όπου η έμφαση δίνεται στην έγκαιρη αναγνώριση επιβαρυνμένων καταστάσεων και στη στήριξη τεκμηριωμένων αποφάσεων, χωρίς την απαίτηση πολύπλοκων προγνωστικών μοντέλων.

Ο συνολικός δείκτης κινδύνου (Risk Index) ορίζεται ως συνάρτηση τεσσάρων βασικών λειτουργικών παραγόντων, οι οποίοι προκύπτουν από δεδομένα που συλλέγονται και ενοποιούνται στο πλαίσιο του Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος (DPP):

- **Διαθεσιμότητα (Availability, A)**, η οποία εκφράζει τον χρόνο λειτουργίας των συσκευών σε σχέση με τον συνολικό χρόνο παρακολούθησης,
- **Κατάσταση συντήρησης (Maintenance Status, M)**, η οποία αποτυπώνει την ύπαρξη εκκρεμών ή εκπρόθεσμων εργασιών συντήρησης,
- **Φόρτος ειδοποιήσεων (Alerts Load, L)**, ο οποίος περιλαμβάνει τον αριθμό και τη σοβαρότητα των καταγεγραμμένων συμβάντων,
- **Χρονική συγκέντρωση συμβάντων (Event Concentration Index, H)**, η οποία αποτυπώνει τη συσσώρευση ειδοποιήσεων σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα.

Για τη δυνατότητα συνδυασμού ετερογενών μεγεθών, όλοι οι παραπάνω παράγοντες μετασχηματίζονται σε κανονικοποιημένες τιμές στο διάστημα $[0,1]$. Έστω:

$$An = f_A(A), Mn = f_M(M), Ln = f_L(L), Hn = f_H(H),$$

όπου (A_n, M_n, L_n, H_n) οι κανονικοποιημένες μορφές των αντίστοιχων παραγόντων και $f(\cdot)$ συναρτήσεις κανονικοποίησης κατάλληλα προσαρμοσμένες στο είδος των δεδομένων. Για την αποτύπωση της επιχειρησιακής επίδρασης μικρών αποκλίσεων από την κανονική λειτουργία, οι παράγοντες διαθεσιμότητας (An) και συντήρησης (Mn) δεν αντιμετωπίζονται γραμμικά, αλλά μέσω εκθετικού μετασχηματισμού. Παρόμοιες μη γραμμικές προσεγγίσεις χρησιμοποιούνται ευρέως σε δείκτες επιχειρησιακού κινδύνου και διαθεσιμότητας, όπου η επίδραση της απώλειας κρίσιμων πόρων δεν αυξάνεται γραμμικά αλλά κλιμακώνεται δυσανάλογα ως προς τη συνολική ετοιμότητα του συστήματος. Συγκεκριμένα, η αναλογία μη διαθέσιμων συσκευών και η αναλογία εκπρόθεσμων εργασιών συντήρησης μετατρέπονται σε κανονικοποιημένους παράγοντες κινδύνου μέσω συναρτήσεων της μορφής:

$$f(x) = 1 - e^{-kx}$$

Όπου x εκφράζει το ποσοστό απόκλισης και k τον συντελεστή ευαισθησίας που καθορίζει την ταχύτητα αύξησης του κινδύνου. Η επιλογή εκθετικής συνάρτησης επιτρέπει τη δυσανάλογη ενίσχυση του δείκτη κινδύνου ακόμη και για μικρές τιμές απόκλισης, αποτυπώνοντας ρεαλιστικά επιχειρησιακά περιβάλλοντα όπου η απώλεια περιορισμένου αριθμού κρίσιμων υποσυστημάτων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική μείωση της συνολικής λειτουργικής ετοιμότητας. Η προσέγγιση αυτή αποφεύγει την υποεκτίμηση καταστάσεων χαμηλής αλλά κρίσιμης απόκλισης και διασφαλίζει ότι οι παράγοντες παραμένουν κανονικοποιημένοι πριν τον τελικό συνδυασμό.

Ιδιαίτερη μεταχείριση απαιτεί ο παράγοντας φόρτου ειδοποιήσεων (L) , καθώς η απλή γραμμική αύξηση του αριθμού ειδοποιήσεων δεν συνεπάγεται αναλογική αύξηση του λειτουργικού κινδύνου. Σε επιχειρησιακά περιβάλλοντα, μεγάλος αριθμός επαναλαμβανόμενων ή χαμηλής σοβαρότητας ειδοποιήσεων μπορεί να υποδηλώνει κορεσμό πληροφορίας και όχι απαραίτητα κλιμακούμενη επικινδυνότητα.

Για τον λόγο αυτό εφαρμόζεται συνάρτηση κορεσμού, η οποία περιορίζει τη συμβολή του παράγοντα (L) μετά από ένα προκαθορισμένο όριο. Η κανονικοποιημένη τιμή (L_n) ορίζεται ως:

$$Ln = \begin{cases} \frac{L}{L_{sat}}, & L \leq L_{sat} \\ 1, & L > L_{sat} \end{cases}$$

όπου L_{sat} είναι το όριο κορεσμού του αριθμού ειδοποιήσεων. Με τον τρόπο αυτό, η συμβολή του παράγοντα ειδοποιήσεων αυξάνεται προοδευτικά έως ένα επιχειρησιακά αποδεκτό όριο, πέρα από το οποίο παραμένει σταθερή. Η συμπεριφορά αυτή αποτυπώνεται γραφικά στην καμπύλη κορεσμού του Σχήματος 5.2.

Ο συνολικός δείκτης κινδύνου προκύπτει μέσω σταθμισμένου συνδυασμού των κανονικοποιημένων παραγόντων:

$$R = w_1 A_n + w_2 M_n + w_3 L_n + w_4 H_n$$

με:

$$\sum_{i=1}^4 w_i = 1$$

όπου τα βάρη (w_i) εκφράζουν τη σχετική επιχειρησιακή σημασία κάθε παράγοντα. Η επιλογή των βαρών πραγματοποιείται βάσει επιχειρησιακής εμπειρίας και κατευθυντήριων οδηγιών διαχείρισης κινδύνου, λαμβάνοντας υπόψη την κρισιμότητα της διαθεσιμότητας και της συντήρησης σε υποδομές αυξημένων απαιτήσεων ασφάλειας.

Για λόγους ευχρηστίας και άμεσης ερμηνείας από τους χρήστες, ο δείκτης κινδύνου μετασχηματίζεται σε κλίμακα 0–100:

$$RiskIndex = 100 \cdot R$$

Προαιρετικά, μπορεί να εφαρμοστεί συντελεστής επιχειρησιακής ανοχής, ώστε μικρές αποκλίσεις από την ιδανική λειτουργία να μην οδηγούν άμεσα σε υψηλές τιμές κινδύνου. Ο τελικός δείκτης δεν αποσκοπεί στην ακριβή ποσοτικοποίηση της πιθανότητας αστοχίας, αλλά στη συγκεντρωτική αποτύπωση της τρέχουσας λειτουργικής κατάστασης, λειτουργώντας ως εργαλείο έγκαιρης προειδοποίησης και υποστήριξης αποφάσεων. Η μαθηματική αυτή

διατύπωση αποτελεί τη θεωρητική βάση για την υλοποίηση και οπτικοποίηση του δείκτη κινδύνου που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 5.

3.6 Ρόλοι Χρηστών και Επίπεδα Αλληλεπίδρασης με το DPP

Στο πλαίσιο της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής DPP, η λειτουργικότητα του συστήματος δεν ορίζεται μόνο από τα τεχνικά υποσυστήματα και τις ροές δεδομένων, αλλά και από τους διακριτούς ρόλους χρηστών που αλληλεπιδρούν με αυτό σε διαφορετικά επίπεδα. Οι ρόλοι αυτοί αντικατοπτρίζουν τις οργανωτικές και επιχειρησιακές δομές που απαντώνται στη διαχείριση στρατιωτικών υποδομών και καθορίζουν τόσο τα δικαιώματα πρόσβασης όσο και το είδος των ενεργειών που επιτρέπονται εντός του οικοσυστήματος DPP.

Στο πλαίσιο της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής διακρίνονται ενδεικτικά κατηγορίες χρηστών όπως το τεχνικό προσωπικό συντήρησης, οι διαχειριστές υποδομών, τα στελέχη εποπτείας και συμμόρφωσης, καθώς και εξωτερικοί ή θεσμικοί ελεγκτές με περιορισμένη πρόσβαση. Το τεχνικό προσωπικό αλληλεπιδρά με το DPP κυρίως σε λειτουργικό επίπεδο, ανακτώντας τεχνικές οδηγίες, καταχωρώντας αποτελέσματα εργασιών και ενημερώνοντας ιστορικά συντήρησης. Οι διαχειριστές υποδομών χρησιμοποιούν το σύστημα σε συγκεντρωτικό επίπεδο, παρακολουθώντας την κατάσταση των περιουσιακών στοιχείων, τον προγραμματισμό συντήρησης και δείκτες διαθεσιμότητας. Οι ρόλοι εποπτείας και συμμόρφωσης εστιάζουν στην πρόσβαση σε ελεγχόμενες προβολές δεδομένων που τεκμηριώνουν την τήρηση κανονιστικών και περιβαλλοντικών απαιτήσεων, χωρίς έκθεση ευαίσθητων επιχειρησιακών πληροφοριών.

Η αρχιτεκτονική του DPP υποστηρίζει αυτή τη διαφοροποίηση μέσω μηχανισμών ελέγχου πρόσβασης βάσει ρόλων και φιλτραρίσματος δεδομένων σε επίπεδο χαρακτηριστικών, διασφαλίζοντας ότι κάθε κατηγορία χρήστη έχει πρόσβαση μόνο στο απολύτως απαραίτητο υποσύνολο πληροφοριών. Οι ρόλοι αυτοί ορίζονται σε αφηρημένο επίπεδο στο παρόν κεφάλαιο, ενώ οι συγκεκριμένες αλληλουχίες ενεργειών και σενάρια χρήσης τους εξειδικεύονται και αξιολογούνται στην πιλοτική εφαρμογή που παρουσιάζεται στο Κεφάλαιο 4.

Ωστόσο, η θεωρητική περιγραφή μιας αρχιτεκτονικής, όσο ολοκληρωμένη και αν είναι, δεν επαρκεί από μόνη της για την αξιολόγηση της πρακτικής της αξίας. Η πολυπλοκότητα των στρατιωτικών εγκαταστάσεων, η ετερογένεια των υφιστάμενων συστημάτων και οι περιορισμοί που επιβάλλονται από την καθημερινή επιχειρησιακή λειτουργία καθιστούν αναγκαία την εμπειρική διερεύνηση της προτεινόμενης λύσης σε πραγματικές ή ρεαλιστικά προσομοιωμένες συνθήκες.

Για τον λόγο αυτό, στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται η πιλοτική εφαρμογή της αρχιτεκτονικής DPP σε επιλεγμένο περιβάλλον στρατιωτικών υποδομών. Η πιλοτική φάση λειτουργεί ως μηχανισμός επαλήθευσης των σχεδιαστικών επιλογών, επιτρέποντας την αξιολόγηση της διαλειτουργικότητας μεταξύ των επιμέρους υποσυστημάτων, της ροής και ποιότητας των δεδομένων, καθώς και της χρηστικότητας των παραγόμενων πληροφοριών για τη λήψη αποφάσεων συντήρησης και διαχείρισης.

Στο Κεφάλαιο 4 αναλύεται αρχικά η διαδικασία επιλογής της περιοχής ή του κτιρίου που χρησιμοποιήθηκε για το testing, καθώς και οι λόγοι που καθιστούν το συγκεκριμένο περιβάλλον κατάλληλο για πιλοτική αξιολόγηση. Στη συνέχεια περιγράφεται η συλλογή των απαιτούμενων δεδομένων, η δημιουργία και ενημέρωση των αντίστοιχων ψηφιακών διαβατηρίων προϊόντων, καθώς και η ενσωμάτωση ιστορικών και δυναμικών δεδομένων συντήρησης. Τέλος, παρουσιάζονται σενάρια χρήσης και τυποποιημένες διαδικασίες διαχείρισης και συντήρησης, μέσω των οποίων αξιολογείται στην πράξη ο βαθμός στον οποίο η προτεινόμενη αρχιτεκτονική μπορεί να υποστηρίξει αποτελεσματικά τις επιχειρησιακές ανάγκες και τις κανονιστικές απαιτήσεις ενός σύγχρονου στρατιωτικού οργανισμού.

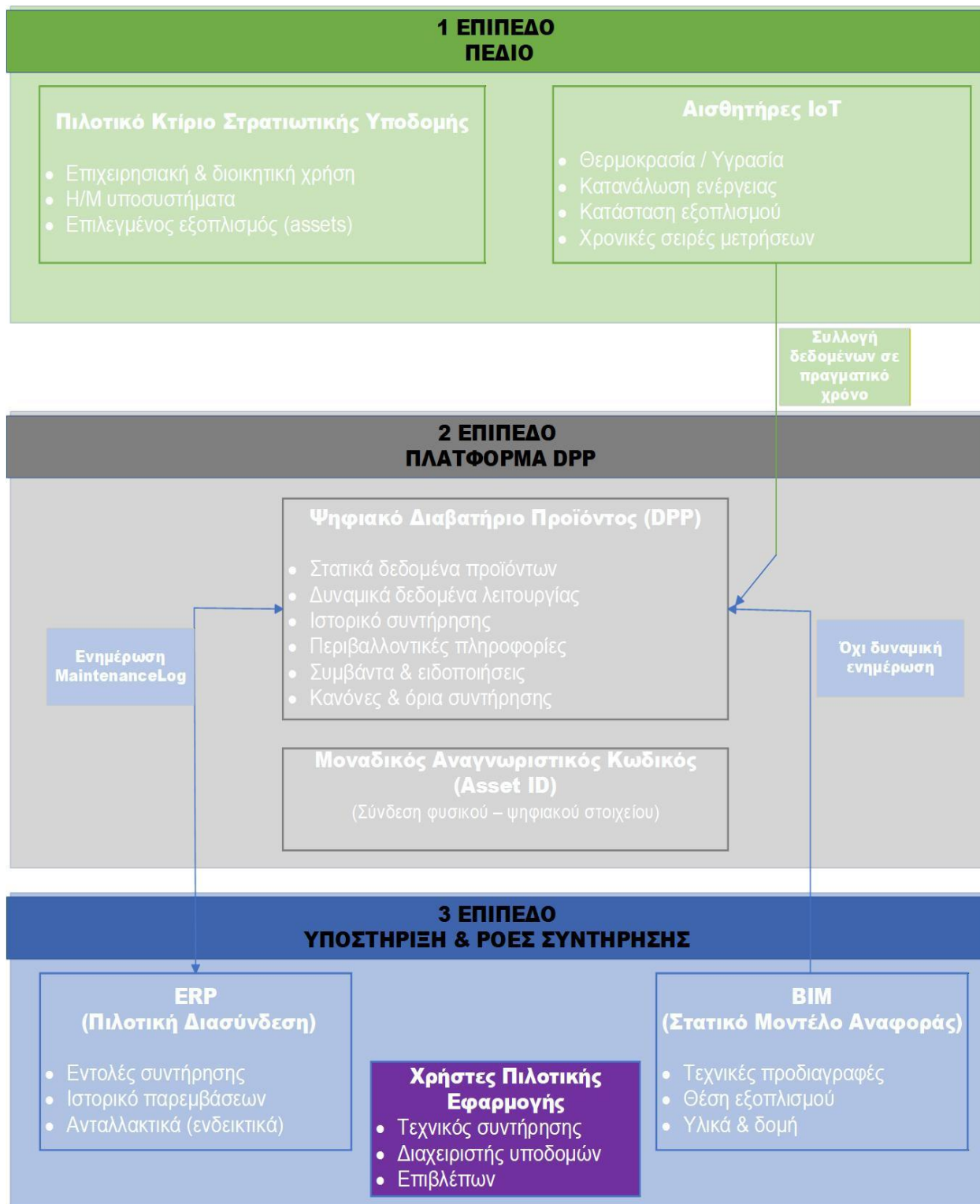
4. Πιλοτική Εφαρμογή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζεται και αναλύεται η πιλοτική εφαρμογή του Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος (Digital Product Passport – DPP), η οποία αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας με σκοπό τη διερεύνηση της πρακτικής υλοποίησης της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής σε περιβάλλον στρατιωτικών υποδομών. Η πιλοτική εφαρμογή λειτουργεί ως ενδιάμεσο βήμα μεταξύ της θεωρητικής ανάλυσης και των επιχειρησιακών απαιτήσεων που παρουσιάστηκαν στα προηγούμενα κεφάλαια και της αξιολόγησης της λειτουργικότητας του DPP υπό πραγματικούς τεχνικούς και οργανωτικούς περιορισμούς.

Η ανάλυση του κεφαλαίου επικεντρώνεται στη δομημένη παρουσίαση της συνολικής αρχιτεκτονικής του συστήματος, στις βασικές ροές δεδομένων και στους μηχανισμούς με τους οποίους ενοποιούνται στατικά και δυναμικά δεδομένα περιουσιακών στοιχείων. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στον τρόπο με τον οποίο το DPP ενσωματώνει πληροφορίες από ετερογενείς πηγές, όπως συστήματα ERP, αναφορές σε μοντέλα BIM και δεδομένα κατάστασης από αισθητήρες IoT, χωρίς την αξιοποίηση προγνωστικών αλγορίθμων ή μηχανισμών τεχνητής νοημοσύνης, ώστε να διασφαλίζεται η διαφάνεια, η ερμηνευσιμότητα και η αποδοχή του συστήματος σε περιβάλλοντα αυξημένων απαιτήσεων ασφάλειας.

Πριν από την αναλυτική παρουσίαση των επιμέρους σταδίων της πιλοτικής εφαρμογής, κρίνεται σκόπιμο να αποτυπωθεί συνοπτικά η συνολική δομή και η λογική ροή του προτεινόμενου συστήματος. Η συνοπτική αυτή αποτύπωση διευκολύνει την κατανόηση της αλληλουχίας των λειτουργιών και της σχέσης μεταξύ των επιμέρους υποσυστημάτων, παρέχοντας ένα ενιαίο εννοιολογικό πλαίσιο αναφοράς για όσα ακολουθούν.

Το διάγραμμα 4.1 παρουσιάζει τη λογική αρχιτεκτονική της πιλοτικής εφαρμογής του DPP, όπως αυτή υλοποιήθηκε και αναλύεται στο παρόν κεφάλαιο. Στο διάγραμμα απεικονίζονται τα βασικά επίπεδα του συστήματος, οι κύριες ροές δεδομένων και οι μηχανισμοί αλληλεπίδρασης μεταξύ των υποσυστημάτων διαχείρισης περιουσιακών στοιχείων, συντήρησης, ειδοποιήσεων και εποπτείας, θέτοντας το πλαίσιο για την αναλυτική παρουσίαση που ακολουθεί στις επόμενες ενότητες.



Διάγραμμα 4.1 Λογική αρχιτεκτονική πιλοτικής εφαρμογής DPP σε στρατιωτική υποδομή

Το πρώτο επίπεδο αφορά το πεδίο εφαρμογής και περιλαμβάνει το πιλοτικό κτίριο στρατιωτικής υποδομής και τους αισθητήρες IoT (ενότητα 4.1 και 4.2) που συλλέγουν δεδομένα λειτουργικής κατάστασης και περιβάλλοντος σε πραγματικό χρόνο. Το δεύτερο επίπεδο αναπαριστά την πλατφόρμα DPP, στην οποία ενοποιούνται τα στατικά και δυναμικά δεδομένα των περιουσιακών στοιχείων μέσω μοναδικών αναγνωριστικών, καθώς και τα ιστορικά συντήρησης, τα συμβάντα και οι περιβαλλοντικές πληροφορίες (ενότητα 4.3). Το τρίτο επίπεδο αποτυπώνει τις ροές υποστήριξης της πιλοτικής εφαρμογής, περιλαμβάνοντας την πιλοτική διασύνδεση με σύστημα ERP, τη χρήση στατικού μοντέλου αναφοράς BIM και τους ρόλους των χρηστών που αλληλεπιδρούν με το σύστημα (ενότητες 4.4 και 4.5). Η διάρθρωση αυτή επιτρέπει την οπτική κατανόηση της συνολικής λειτουργίας της πιλοτικής εφαρμογής και της αλληλεπίδρασης μεταξύ φυσικών περιουσιακών στοιχείων, ψηφιακών διαβατηρίων και διαδικασιών συντήρησης, χωρίς να εισέρχεται σε λεπτομέρειες που αναλύονται διεξοδικά στις αντίστοιχες ενότητες του κεφαλαίου

4.1 Επιλογή Περιοχής/Κτιρίου για Δοκιμή

Για την πιλοτική εφαρμογή του DPP επιλέγεται ως μελέτη περίπτωσης ένα υποθετικό κτιριακό σενάριο, αντιπροσωπευτικό στρατιωτικής κτιριακής υποδομής. Η επιλογή αυτή βασίστηκε σε υφιστάμενη τεχνική μελέτη δημόσιου έργου, η οποία είναι αναρτημένη σε δημόσια προσβάσιμη διαδικτυακή πλατφόρμα και χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά ως πρότυπο τεχνικών προδιαγραφών και δομικής διάρθρωσης. Η αξιοποίηση της μελέτης πραγματοποιήθηκε χωρίς οποιαδήποτε αναφορά σε συγκεκριμένη επιχειρησιακή τοποθεσία ή μονάδα των Ελληνικών Ενόπλων Δυνάμεων. Η εν λόγω τεχνική μελέτη ανακτήθηκε από την επίσημη πλατφόρμα ανοιχτών δεδομένων δημοσίων συμβάσεων (pwgopendata.eprocurement.gov.gr) και χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά για σκοπούς ακαδημαϊκής ανάλυσης και προσομοίωσης, στο πλαίσιο της παρούσας πιλοτικής εφαρμογής.

Ο επιλεγμένος χώρος λειτουργεί ως εννοιολογικό παράδειγμα της ευρύτερης στρατιωτικής κτιριακής υποδομής, παρέχοντας ένα περιβάλλον που επιτρέπει την πραγματοποίηση δοκιμών τεχνικής ενσωμάτωσης χωρίς να επηρεάζονται οι καθημερινές επιχειρησιακές δραστηριότητες. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την αξιολόγηση της προτεινόμενης αρχιτεκτονικής DPP υπό

ρεαλιστικές συνθήκες, ενώ ταυτόχρονα διασφαλίζεται η προστασία ευαίσθητων πληροφοριών που σχετίζονται με συγκεκριμένες εγκαταστάσεις. Τα συμπεράσματα της ενότητας 3.2 υπογραμμίζουν τη σημασία της επιλογής ενός χώρου όπου η ενσωμάτωση συστημάτων ERP–BIM, η ανάπτυξη αισθητήρων IoT και η παρακολούθηση κρίσιμων υλικών μπορούν να δοκιμαστούν εντός ελεγχόμενων παραμέτρων, με δυνατότητα άμεσης παρέμβασης σε περίπτωση τεχνικών αστοχιών.

Το επιλεγμένο κτίριο είναι σχεδιασμένο για επιχειρησιακή και διοικητική χρήση και χαρακτηρίζεται από σημαντική ποικιλομορφία τεχνικών συστημάτων. Περιλαμβάνει διακριτά οικοδομικά και ηλεκτρομηχανολογικά υποσυστήματα, όπως ηλεκτρικές εγκαταστάσεις ισχυρών και ασθενών ρευμάτων, κεντρικά συστήματα θέρμανσης και ψύξης, δίκτυα ύδρευσης και αποχέτευσης, φωτισμό ασφαλείας, καθώς και δίκτυα φωνής και δεδομένων με δομημένη καλωδίωση. Η ύπαρξη αυτών των υποσυστημάτων, τα οποία περιγράφονται αναλυτικά στην τεχνική μελέτη αναφοράς, επιτρέπει τη χαρτογράφηση πολλαπλών περιουσιακών στοιχείων (assets) σε ανεξάρτητα ψηφιακά διαβατήρια και την παρακολούθηση του κύκλου ζωής τους σε επίπεδο συστήματος.

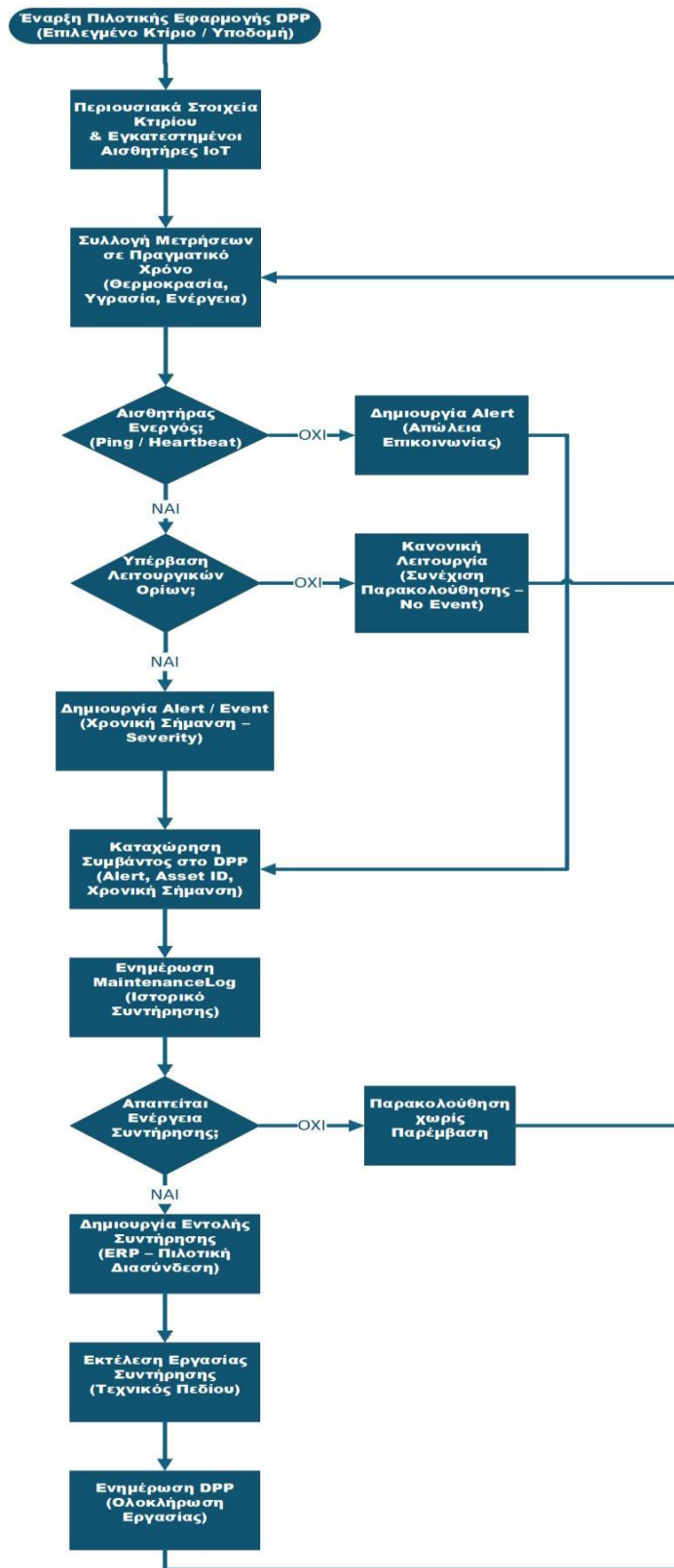
Οι τεχνικές προδιαγραφές και η δομή του κτιρίου ευθυγραμμίζονται πλήρως με τις απαιτήσεις που περιγράφονται στη μελέτη αναφοράς, η οποία χρησιμοποιήθηκε ως βάση για τη διαμόρφωση των δεδομένων της πιλοτικής εφαρμογής. Η επιλογή αυτή κρίθηκε σκόπιμη, καθώς επιτρέπει την αξιολόγηση της λειτουργικότητας και της αρχιτεκτονικής του DPP χωρίς την ανάγκη άμεσης πρόσβασης σε εμπιστευτικά δεδομένα συγκεκριμένης στρατιωτικής εγκατάστασης, ενώ παράλληλα διασφαλίζεται η αντιπροσωπευτικότητα του σεναρίου δοκιμής, δεδομένου ότι το κτίριο ακολουθεί τις ίδιες κανονιστικές και τεχνικές προδιαγραφές που εφαρμόζονται σε αντίστοιχες υποδομές των Ενόπλων Δυνάμεων.

Η στόχευση ενός συγκροτήματος κτιρίων περιορισμένης κλίμακας, στο οποίο οι αρχικοί όγκοι ανάπτυξης αισθητήρων και τα φορτία αποθήκευσης δεδομένων παραμένουν διαχειρίσιμα, επιτρέπει τη διεξαγωγή ελεγχόμενων δοκιμών κλιμάκωσης χωρίς δυσανάλογη επιβάρυνση των υποδομών κατά τις αρχικές φάσεις υλοποίησης (Langley et al., 2023). Η στάθμιση των παραπάνω παραμέτρων οδήγησε στη διαμόρφωση κριτηρίων επιλογής που ευνοούν εγκαταστάσεις με λειτουργική ποικιλομορφία, διαχειρίσιμα προφίλ ασφάλειας, επαρκή

ωριμότητα υφιστάμενης ψηφιακής υποδομής και ρεαλιστικές περιβαλλοντικές προκλήσεις. Η υιοθέτηση αυτής της σκόπιμης στρατηγικής μεγιστοποιεί την απόδοση μάθησης ανά επενδύσιμο πόρο και δημιουργεί ένα προσαρμόσιμο πρότυπο πιλοτικής εφαρμογής, ικανό να υποστηρίξει μελλοντικές επεκτάσεις σε πιο ευαίσθητες ή λογιστικά σύνθετες στρατιωτικές υποδομές. Η πιλοτική εφαρμογή εστιάζει στη λειτουργική επαλήθευση του προτεινόμενου συστήματος DPP και όχι στη στατιστική γενίκευση των αποτελεσμάτων, θέτοντας τις βάσεις για μελλοντική εφαρμογή σε πλήρως επιχειρησιακά περιβάλλοντα λειτουργίας.

Η συνολική ροή λειτουργίας της πιλοτικής εφαρμογής του DPP αποτυπώνεται σχηματικά στο διάγραμμα 4.2. Το διάγραμμα παρουσιάζει διαδοχικά τα βασικά στάδια της εφαρμογής, ξεκινώντας από την επιλογή του πιλοτικού κτιρίου και την καταγραφή των περιουσιακών στοιχείων, έως τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο μέσω αισθητήρων IoT και τον έλεγχο της λειτουργικής τους κατάστασης. Στη συνέχεια απεικονίζεται ο έλεγχος αποκλίσεων βάσει προκαθορισμένων λειτουργικών ορίων και απώλειας επικοινωνίας, η δημιουργία συμβάντων (alerts) με χρονική σήμανση και επίπεδο σοβαρότητας, καθώς και η καταχώρησή τους στο αντίστοιχο ψηφιακό διαβατήριο. Το διάγραμμα ολοκληρώνεται με την ενημέρωση του ιστορικού συντήρησης και, όπου απαιτείται, τη δημιουργία εντολών συντήρησης μέσω πιλοτικής διασύνδεσης με σύστημα ERP, πριν την επιστροφή του κύκλου στη συνεχή παρακολούθηση. Με τον τρόπο αυτό, το διάγραμμα λειτουργεί ως συνοπτική οπτική σύνοψη των διαδικασιών που αναλύονται στις ενότητες 4.1 έως 4.5, αναδεικνύοντας τον επαναλαμβανόμενο κύκλο παρακολούθησης, καταγραφής και τεκμηριωμένης συντήρησης με ανθρώπινη εποπτεία που υλοποιείται στο πλαίσιο της πιλοτικής εφαρμογής.

Η απεικόνιση της ροής στο διάγραμμα 4.2 δεν αποσκοπεί μόνο στην περιγραφή μιας ακολουθίας τεχνικών βημάτων, αλλά και στην ανάδειξη της σχεδιαστικής φιλοσοφίας της πιλοτικής εφαρμογής. Η ενεργοποίηση ειδοποιήσεων και ενεργειών συντήρησης βασίζεται αποκλειστικά σε προκαθορισμένους κανόνες και όρια λειτουργίας, αποφεύγοντας τη χρήση «μαύρων κουτιών» ή αδιαφανών αλγοριθμικών μηχανισμών. Η προσέγγιση αυτή θεωρείται ιδιαίτερα κατάλληλη για στρατιωτικές υποδομές, όπου η συμπεριφορά του συστήματος, η δυνατότητα ελέγχου των αποφάσεων και η συμμόρφωση με κανονισμούς ασφαλείας υπερισχύουν της πλήρους αυτοματοποίησης.



Διάγραμμα 4.2 Διάγραμμα Ροής Πιλοτικής Εφαρμογής DPP

4.2 Συλλογή Δεδομένων

4.2.1 Αρχικός Κατάλογος και Χαρτογράφηση Περιουσιακών Στοιχείων

Η δημιουργία ενός ολοκληρωμένου αρχικού καταλόγου και χαρτογράφησης περιουσιακών στοιχείων αποτελεί το θεμελιώδες επιχειρησιακό βήμα για την υλοποίηση του πιλοτικού προγράμματος, καθώς διασφαλίζει ότι τόσο τα στατικά όσο και τα δυναμικά στοιχεία του DPP συμπληρώνονται σωστά από την αρχή. Στην πράξη, αυτό συνεπάγεται με την απαρίθμηση όλων των σχετικών φυσικών στοιχείων εντός του επιλεγμένου χώρου, συνδέοντας το καθένα με ακριβείς αναγνωριστικούς κωδικούς και βασικά χαρακτηριστικά που θα παραμένουν σταθερά καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Η διαδικασία βασίζεται άμεσα στα κριτήρια επιλογής που περιγράφονται προηγουμένως στην ενότητα 4.1, μεταφράζοντας τις αφηρημένες προδιαγραφές που οδήγησαν στην επιλογή του χώρου σε απτά σύνολα δεδομένων που μπορούν να χρησιμοποιηθούν στην ολοκληρωμένη πλατφόρμα.

Το πρώτο διαδικαστικό σκέλος περιλαμβάνει τη συλλογή προϋπάρχουσας τεκμηρίωσης από διάφορες μονάδες logistics, ομάδες συντήρησης εγκαταστάσεων και την αξιολόγηση των αρχείων που μπορούν να εισαχθούν απευθείας στο μοντέλο δεδομένων DPP χωρίς σημαντική αναδιαμόρφωση (Çetin et al., 2023). Όταν τα αρχιτεκτονικά σχέδια ή τα προγράμματα εξοπλισμού υπάρχουν σε μορφές συμβατές με BIM, αυτά μπορούν να χρησιμεύσουν ως κύριες εισροές για την ημι-αυτοματοποιημένη συμπλήρωση υπομοντέλων τεχνικών προδιαγραφών (Langley et al., 2023). Παράλληλα, τα μητρώα περιουσιακών στοιχείων που βασίζονται σε ERP παρέχουν ημερομηνίες προμήθειας, όρους εγγύησης, αναγνωριστικά προμηθευτών και προδιαγραφές αγοράς για ενσωμάτωση σε στατικά πεδία δεδομένων προϊόντων (Westerlund, 2023). Σε κάθε εγγραφή αποδίδεται ένας μόνιμος μοναδικός αναγνωριστικός κωδικός που συνδέει τα αρχεία καταγραφής με τις φυσικές ετικέτες που είναι τοποθετημένες στο αντίστοιχο περιουσιακό στοιχείο στον χώρο. Για παλαιά περιουσιακά στοιχεία με ελλιπή ή αναλογική τεκμηρίωση, οι επιτόπιες έρευνες καθίστανται απαραίτητες (Çetin et al., 2023). Εξαρτήματα όπως οι μονάδες HVAC υποβάλλονται σε επαλήθευση του σειριακού αριθμού επί τόπου, προκειμένου να συγκριθούν οι φυσικές επισημάνσεις με τυχόν διαθέσιμες αναφορές αρχείων.

Οι αποκλίσεις σημειώνονται στα αρχεία ελέγχου και επιλύονται πριν από την τελική εισαγωγή. Η χαρτογράφηση επεκτείνεται σε εξωτερικούς χώρους και σε συστήματα υποδομών (κτίρια). Κάθε τύπος περιουσιακού στοιχείου έχει μια σχετική ταξινόμηση, είτε κωδικοποίηση του NATO για εξοπλισμό είτε εθνικά αναγνωρισμένους κωδικούς κατασκευαστικών στοιχείων. Αυτές οι ταξινομήσεις ενημερώνουν για το ποια υπομοντέλα διαβατηρίου ισχύουν: για παράδειγμα, ένα δομικό στοιχείο που φέρει φορτίο μπορεί να ενεργοποιήσει κατηγορίες περιβαλλοντικών πληροφοριών που περιέχουν ενσωματωμένα δεδομένα για την περιεκτικότητα σε άνθρακα (Kühn et al., 2025), ενώ ένας ηλεκτρικός μετασχηματιστής θα συμπληρώσει πεδία τεχνικών επιδόσεων και δηλώσεις επικίνδυνων ουσιών λόγω των εξαρτημάτων που περιέχουν λάδι. Η ενσωμάτωση γεωχωρικών αναφορών αποτελεί μια άλλη κρίσιμη διάσταση. Όλα τα καταγεγραμμένα στοιχεία φέρουν γεωγραφική σήμανση χρησιμοποιώντας μετρήσεις GNSS ή συντεταγμένες που προέρχονται από υπάρχοντα επίπεδα GIS (Wagner, 2025).

Για ευαίσθητα στρατιωτικά περιβάλλοντα, τα επίπεδα ακρίβειας ελέγχονται κατά τη διάρκεια της καταγραφής: τα εσωτερικά αρχεία διατηρούν την πλήρη ακρίβεια των συντεταγμένων, ενώ οι εξαγωγές που συμμορφώνονται με τις δημόσιες απαιτήσεις εφαρμόζουν φίλτρα γενίκευσης για να αποκρύψουν την ακριβή τοποθεσία, σύμφωνα με τους περιορισμούς ασφαλείας (Westerlund, 2023). Ένα αναπόσπαστο μέρος της αρχικής απογραφής είναι η προετοιμασία για τη συνεχή δυναμική συλλογή δεδομένων. Τα περιουσιακά στοιχεία που προορίζονται για την εγκατάσταση συσκευών IoT κατά τη διάρκεια του πιλοτικού προγράμματος απαιτούν προ-εγκατάσταση και σχεδιασμό σχετικά με τα σημεία τοποθέτησης, τη διαθεσιμότητα ισχύος και τις επιλογές συνδεσιμότητας δικτύου (Voulgaridis et al., 2024). Αυτές οι σημειώσεις, από τον σχεδιασμό, εισάγονται σε προσωρινές θέσεις δεδομένων λειτουργίας στο DPP, έτσι ώστε όταν οι αισθητήρες συνδεθούν στο διαδίκτυο, οι ροές τους να συνδέονται απρόσκοπτα με τα υπάρχοντα αρχεία, αντί να απαιτείται μεταγενέστερη σύνδεση. Η καταγραφή της σύνθεσης των υλικών έχει προτεραιότητα όταν η απόδοση της κυκλικής οικονομίας θα αξιολογηθεί κατά τη διάρκεια ανακαινίσεων ή αποσύρσεων που έχουν προγραμματιστεί εντός του πιλοτικού παραθύρου (Korpelaar et al., 2023). Η διασφάλιση της ποιότητας των δεδομένων είναι επίσης ένας σημαντικός παράγοντας. Με την επικύρωση των δεδομένων ελέγχεται η πληρότητα σε σχέση με υποχρεωτικές λίστες πεδίων που ορίζονται σε πρότυπα DPP ευθυγραμμισμένα με την ΕΕ (Westerlund, 2023). Επιπρόσθετα χειροκίνητοι επιτόπιοι έλεγχοι επαληθεύουν τα υλικά επί

τόπου σε σχέση με τις καταχωρήσεις που έχουν καταγραφεί. Τέλος, η φυσική σήμανση κλείνει τον κύκλο μεταξύ του χαρτογραφημένου αποθέματος και της καθημερινής προσβασιμότητας. QR κωδικοί ή ετικέτες RFID κωδικοποιημένες με το μοναδικό αναγνωριστικό κάθε περιουσιακού στοιχείου τοποθετούνται σε προσβάσιμες αλλά προστατευμένες θέσεις στο ίδιο το αντικείμενο (Hulea et al., 2024). Για εγκαταστάσεις ευαίσθητες από άποψη αποστολής, οι παραπάνω QR κωδικοί ή ετικέτες RFID μπορούν να διαβαστούν μόνο από πιστοποιημένες συσκευές συνδεδεμένες σε ασφαλή στρατιωτικά δίκτυα, προκειμένου να αποτραπεί η εχθρική συλλογή μεταδεδομένων υποδομής (Abedi et al., 2024). Με την ολοκλήρωση αυτής της αρχικής φάσης απογραφής και χαρτογράφησης με ένα εναρμονισμένο σύνολο δεδομένων το πιλοτικό πρόγραμμα επιτυγχάνει μια σταθερή βάση πάνω στην οποία μπορούν να οικοδομηθούν όλες οι επόμενες λειτουργίες επιχειρησιακής παρακολούθησης. Αυτή η εκ των προτέρων ακρίβεια όχι μόνο υποστηρίζει την τεχνική ενσωμάτωση, αλλά και αποδεικνύει την ετοιμότητα συμμόρφωσης τόσο με την εθνική νομοθεσία όσο και με τα συναφή πλαίσια διαλειτουργικότητας από την πρώτη ημέρα της λειτουργίας του DPP.

4.2.2 Συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο

Με βάση τις δομημένες διαδικασίες απογραφής περιουσιακών στοιχείων που καθορίζονται στην ενότητα 4.2.1, η έναρξη της συλλογής δεδομένων σε πραγματικό χρόνο σηματοδοτεί τη μετάβαση από τη στατική επικύρωση της βασικής γραμμής σε συνεχή λειτουργική παρακολούθηση, ικανή να τροφοδοτεί δυναμικά υπομοντέλα εντός της αρχιτεκτονικής του DPP. Οι φυσικές μετρήσεις και η ψηφιακή ενσωμάτωση μετατρέπονται σε συνεχείς ροές δεδομένων που αντικατοπτρίζουν την εξελισσόμενη κατάσταση των στοιχείων της υποδομής, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τα πρότυπα χρήσης σε σχεδόν πραγματικό χρόνο. Η τεχνική πρόκληση δεν έγκειται μόνο στη συλλογή δεδομένων υψηλής συχνότητας, αλλά και στη διασφάλιση της ασφαλούς μετάδοσης αυτών των μετρήσεων, της ευθυγράμμισής τους με τα σχήματα διαβατηρίων και της αποθήκευσής τους υπό περιορισμούς πρόσβασης κατάλληλους για την ταξινόμησή τους. Η βάση αυτής της απόκτησης στηρίζεται σε ένα καταναμημένο δίκτυο κόμβων ανίχνευσης IoT που τοποθετούνται στρατηγικά με βάση έρευνες πριν από την

εγκατάσταση (Voulgaridis et al., 2024). Η επιλογή των τύπων αισθητήρων αντιστοιχεί άμεσα στην κρισιμότητα των εξαρτημάτων και στον κίνδυνο έκθεσης στο περιβάλλον. Για παράδειγμα, αισθητήρες θερμοκρασίας και υγρασίας μπορούν να ενσωματωθούν σε αγωγούς HVAC ή περιβλήματα κτιρίων για την παρακολούθηση της θερμικής απόδοσης σε σχέση με τα βασικά επίπεδα ενεργειακής απόδοσης (Kühn et al., 2025). Οι συσκευές μέτρησης ισχύος στους πίνακες διανομής παρακολουθούν τις διακυμάνσεις φορτίου ανά κύκλωμα, προσφέροντας τόσο διαγνωστικά λειτουργικά στοιχεία όσο και αποδεικτικά συμμόρφωσης για τις υποχρεώσεις υποβολής εκθέσεων σχετικά με την ενέργεια (Psarommatitis & May, 2024). Κάθε συσκευή συνδέεται κρυπτογραφικά με έναν μόνιμο μοναδικό αναγνωριστικό κωδικό ενός περιουσιακού στοιχείου (Hulea et al., 2024), διασφαλίζοντας ότι η εισερχόμενη τηλεμετρία συνδέεται με το σωστό αρχείο DPP. Λόγω των στρατιωτικών απαιτήσεων ασφάλειας, όλες οι επικοινωνίες των αισθητήρων διακινούνται μέσω κρυπτογραφημένων καναλιών σε αξιόπιστες πύλες εντός των περιμέτρων του προστατευμένου δικτύου (Abedi et al., 2024). Οι τοπικοί κόμβοι αποθηκεύουν τις εισερχόμενες μετρήσεις μέχρι να τις μεταδώσουν στους κεντρικούς κόμβους επεξεργασίας. Αυτή η δυνατότητα σταδιακής αποθήκευσης αποτρέπει την απώλεια δεδομένων κατά τη διάρκεια διακοπής της συνδεσιμότητας και επιτρέπει την πραγματοποίηση προκαταρκτικών ελέγχων βάσει προκαθορισμένων λειτουργικών ορίων, όπως η ανίχνευση παραβίασης ορίων, σε τοπικό επίπεδο για γρήγορη επισήμανση σφαλμάτων χωρίς να απαιτείται κεντρική επιβεβαίωση. Μόλις εισαχθούν στην πλατφόρμα, τα ακατέργαστα σήματα υποβάλλονται σε κανονικοποίηση. Η διαδικασία αυτή αποσκοπεί αποκλειστικά στη διασφάλιση της ακεραιότητας των μετρήσεων και δεν σχετίζεται με τεχνικές στατιστικής πρόβλεψης ή μηχανικής μάθησης. Η κανονικοποίηση αυτή περιλαμβάνει αντιστάθμιση απόκλισης βαθμονόμησης με βάση συντελεστές που παρέχονται από τον κατασκευαστή και αποθηκεύονται σε στατικά πεδία διαβατηρίου (Kühn et al., 2025). Οι έλεγχοι ακεραιότητας των δεδομένων συγκρίνουν τις εισερχόμενες τιμές με τα λειτουργικά εύρη που ορίζονται κατά τη διάρκεια της πιλοτικής θέσης σε λειτουργία. Ένα κρίσιμο στοιχείο του σχεδιασμού είναι η αντιστοίχιση μεταξύ των εξόδων των αισθητήρων και των δομών τιμών που ορίζονται στα πρότυπα DPP που είναι ευθυγραμμισμένα με το ESPR (Westerlund, 2023). Κάθε μετρούμενη παράμετρος πρέπει να δρομολογείται στο σωστό πεδίο. Το επίπεδο ασφαλείας σε αυτό το στάδιο επιβάλλει ελέγχους ορατότητας σε επίπεδο χαρακτηριστικών για ευαίσθητα σύνολα δεδομένων (Langley et al., 2023).

Η δυναμική συλλογή δεδομένων μετατρέπει τα αρχεία DPP από στατικά αντικείμενα συμμόρφωσης σε δομημένα λειτουργικά αρχεία τεκμηρίωσης, τα οποία υποστηρίζουν διαδικασίες παρακολούθησης, συντήρησης και τεκμηριωμένης λήψης αποφάσεων με ανθρώπινη εποπτεία, διατηρώντας παράλληλα τα απαιτούμενα επίπεδα ασφάλειας και επιχειρησιακής εμπιστευτικότητας που χαρακτηρίζουν τις αμυντικές υποδομές.

4.3 Δημιουργία DPP και Ενσωμάτωση Maintenance Data

Η δημιουργία του DPP βασίζεται στα στατικά σύνολα δεδομένων που αποκτήθηκαν κατά τη διάρκεια των φάσεων χαρτογράφησης και στα δυναμικά σύνολα δεδομένων τα οποία ενημερώνουν σε πραγματικό χρόνο τη βάση της εφαρμογής που αναπτύχθηκε για την ανάγκη της εργασίας.

Η διαδικασία ξεκινά με την υλοποίηση του σχήματος: τα υπομοντέλα ορίζονται σύμφωνα με πρότυπα που είναι εναρμονισμένα με το ESPR για τεχνικές προδιαγραφές, δείκτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων, σύνθεση υλικών και συμπεριλαμβάνουν δεδομένα από κρίσιμες πρώτες ύλες (CRM) (Kühn et al., 2025; Westerlund, 2023). Κάθε υπομοντέλο κληρονομεί επικυρωμένα μεταδεδομένα από τη φάση απογραφής περιουσιακών στοιχείων (Çetin et al., 2023), εξασφαλίζοντας ότι τα βασικά στοιχεία, όπως οι διαστάσεις, οι ονομαστικές χωρητικότητες, οι δηλώσεις αποτυπώματος άνθρακα, ενσωματώνονται μόνιμα και συνδέονται μέσω μοναδικών αναγνωριστικών που έχουν καθοριστεί νωρίτερα (Hulea et al., 2024). Τα στατικά πεδία συμπληρώνονται μέσω δομημένης διασύνδεσης με εντολές αγοράς και ιδιότητες αντικειμένων BIM. Τα παρεχόμενα φύλλα δεδομένων κατασκευαστή κατά τη διάρκεια των απογραφών, αντιστοιχίζονται σε κατάλληλα πεδία διαβατηρίου που καλύπτουν τους όρους εγγύησης, τα πιστοποιητικά συμμόρφωσης και τους τυποποιημένους κωδικούς υλικών που είναι απαραίτητοι για τη διαλειτουργικότητα σε όλες τις αλυσίδες εφοδιασμού (Langley et al., 2023). Σε ευαίσθητα περιβάλλοντα, όπως τα στρατιωτικά, αυτές οι προσθήκες φιλτράρονται από κανόνες πρόσβασης επιπέδου εξουσιοδότησης έτσι ώστε τα εξωτερικά ορατά αρχεία να παραλείπουν τις απόρρητες διαμορφώσεις συστημάτων (Abedi et al., 2024).

Η ενσωμάτωση δεδομένων συντήρησης απαιτεί τη δημιουργία συνδέσεων μεταξύ των αποτελεσμάτων της λειτουργικής παρακολούθησης και των υπομοντέλων DPP που είναι προσαρμοσμένα στο ιστορικό συντήρησης. Οι ροές δεδομένων σε πραγματικό χρόνο από κόμβους IoT που έχουν αναπτυχθεί γύρω από την εγκατάσταση μεταφέρουν μετρήσεις κατάστασης σε middleware (Voulgaridis et al., 2024), το οποίο αντιστοιχίζει κάθε αρχείο με τα αντίστοιχα πεδία συντήρησης μέσα στο διαβατήριο (Kühn et al., 2025). Για παράδειγμα, οι αποκλίσεις από προκαθορισμένα λειτουργικά όρια που καταγράφονται στις συσκευές που είναι διασυνδεδεμένες με την εφαρμογή φέρουν χρονική σήμανση, επισημαίνονται με τον αναγνωριστικό αριθμό του αισθητήρα, συνοδεύονται από μεταδεδομένα της ειδοποίησης και καταχωρούνται στις εγγραφές «Alert» (Συμβάν παρακολούθησης κατάστασης). Κάθε ενημέρωση περιέχει προγραμματισμένες εντολές εργασίας που ενημερώνονται μετά την ολοκλήρωσή τους. Με την ολοκλήρωσή τους καταγράφονται οι ενέργειες που εκτελέστηκαν, τα ανταλλακτικά που απαιτήθηκαν και το αναγνωριστικό του τεχνικού, όπου του παρέχεται πρόσβαση από τους κανονισμούς περί απορρήτου (Westerlund, 2023). Τα ιστορικά αρχεία συντήρησης που προέρχονται από παλαιότερα συστήματα ή από χειροκίνητες εισαγωγές δεδομένων υποβάλλονται σε προεπεξεργασία πριν από την εισαγωγή τους. Τα επεξεργασμένα δεδομένα τμηματοποιούνται σε αξιοποιήσιμα δεδομένα, ανά τύπο βλάβης, ημερομηνία ανίχνευσης και ενσωματώνονται στις εγγραφές «MaintenanceLog» (Συμβάντα συντήρησης) στο DPP (Çetin et al., 2023). Όταν οι επισκευές συνοδεύονται από φωτογραφικές αποδείξεις ή σχηματικές σημειώσεις, αυτά τα αρχεία πολυμέσων αποθηκεύονται σε αποθετήρια ελεγχόμενης πρόσβασης με κατακερματισμένες αναφορές σε αρχεία διαβατηρίων. Αυτό διατηρεί την ακεραιότητα των αποδεικτικών στοιχείων, ενώ περιορίζει την ανεξέλεγκτη προβολή δυνητικά ευαίσθητων λεπτομερειών υποδομής (Abedi et al., 2024). Με την πάροδο του χρόνου, αυτά τα συγκεντρωμένα ιστορικά στοιχεία επιτρέπουν τη διαχρονική επισκόπηση της απόδοσης του συστήματος. Με αυτόν τον τρόπο δίνεται η δυνατότητα στους διαχειριστές των περιουσιακών στοιχείων να υποστηρίζουν τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με τον προγραμματισμό των διαστημάτων συντήρησης πέρα από τις γενικές συστάσεις των κατασκευαστών.

Οι πληροφορίες σχετικά με την επαναχρησιμοποίηση υλικών συνδέονται άμεσα με τις καταχωρήσεις συντήρησης που αφορούν το τέλος του κύκλου ζωής. Οι αφαιρέσεις εξαρτημάτων που έχουν επισημανθεί για επεξεργασία στην κυκλική οικονομία

αντιστοιχίζονται με τα αναγνωριστικά αποσυναρμολόγησης που δημιουργήθηκαν κατά την έναρξη λειτουργίας (Korpelaar et al., 2023). Αυτές οι πληροφορίες μπορούν να οδηγήσουν στην προσαρμογή του σχεδιασμού για επαναχρησιμοποίηση σε μελλοντικούς κύκλους προμηθειών χωρίς να παραβιάζεται η επιχειρησιακή εμπιστευτικότητα.

Τα πρωτόκολλα ασφάλειας αποτελούν διακριτή και οριζόντια συνιστώσα της διαδικασίας ενσωμάτωσης δεδομένων στο πλαίσιο της πιλοτικής εφαρμογής. Η κρυπτογράφηση των δεδομένων σε κατάσταση αποθήκευσης διασφαλίζει την προστασία ευαίσθητων πληροφοριών συντήρησης, οι οποίες τηρούνται σε ελεγχόμενες υποδομές αποθήκευσης. Παράλληλα, εφαρμόζονται μηχανισμοί ελέγχου πρόσβασης σε επίπεδο χαρακτηριστικών, ώστε να αποτρέπεται η μη εξουσιοδοτημένη προβολή λειτουργικών ή τεχνικών ενδείξεων που ενσωματώνονται στα αναλυτικά αρχεία συντήρησης.

Ο συνδυασμός αυτοματοποιημένης εισαγωγής δεδομένων από αισθητήρες με επιβεβαιωμένες χειροκίνητες ενημερώσεις, οι οποίες υπόκεινται σε ελέγχους εγκυρότητας και ασφάλειας, επιτρέπει τη διατήρηση επικαιροποιημένων αρχείων συντήρησης χωρίς να υποβαθμίζεται το επίπεδο προστασίας των δεδομένων. Η προσέγγιση αυτή διασφαλίζει ότι το σύνολο δεδομένων παραμένει αξιόπιστο και κατάλληλο για λειτουργική παρακολούθηση καθ' όλη τη διάρκεια του πιλοτικού προγράμματος. Στο πλαίσιο της πιλοτικής εφαρμογής, βασικές διαδικασίες ανάλυσης χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για την παρακολούθηση τάσεων και την αναγνώριση αποκλίσεων από προκαθορισμένα λειτουργικά όρια, με στόχο την έγκαιρη επισήμανση πιθανών αναγκών συντήρησης. Οι διαδικασίες αυτές αξιοποιούν ιστορικά και τρέχοντα δεδομένα αισθητήρων σε συνδυασμό με καταγεγραμμένες εργασίες συντήρησης. Στο πλαίσιο της παρούσας μελέτης δεν υλοποιούνται αυτοματοποιημένοι μηχανισμοί πρόβλεψης, εκτίμησης υπολειπόμενης διάρκειας ζωής ή βελτιστοποίησης συντήρησης. Η χρήση των δεδομένων περιορίζεται σε καταγραφή, ιστορική τεκμηρίωση και έλεγχο αποκλίσεων από προκαθορισμένα λειτουργικά όρια.

Οι καταχωρήσεις κατάστασης και συντήρησης τροφοδοτούν τους λειτουργικούς κόμβους παρακολούθησης του DPP, όπου υποστηρίζουν τη λήψη αποφάσεων σε τοπικό επίπεδο, ενώ παράλληλα συμβάλλουν στη δημιουργία ανώνυμων συγκεντρωτικών προβολών. Οι προβολές αυτές χρησιμοποιούνται αποκλειστικά για σκοπούς εποπτείας της κατάστασης του στόλου και

της υποδομής και καθίστανται προσβάσιμες μόνο σε εξουσιοδοτημένους φορείς, μέσω τυποποιημένων εντύπων ανταλλαγής δεδομένων, όπου αυτό προβλέπεται από τα ισχύοντα πλαίσια συνεργασίας (Χανιάς, 2020).

Στην τελική του διαμόρφωση, το DPP λειτουργεί ως ένα δυναμικό αλλά ελεγχόμενο ψηφιακό τεχνούργημα, το οποίο τεκμηριώνει τόσο τον αρχικό σχεδιασμό όσο και τη συσσωρευμένη επιχειρησιακή διαχείριση των περιουσιακών στοιχείων. Τα σταθερά χαρακτηριστικά ορίζουν την ταυτότητα κάθε στοιχείου, τα αρχεία συντήρησης αποτυπώνουν τη συνεχή διαχείριση, ενώ οι καταγραφές περιβαλλοντικής έκθεσης και ανάκτησης πόρων συμπληρώνουν την εικόνα του κύκλου ζωής. Όλα τα δεδομένα διασυνδέονται μέσω ασφαλών και μόνιμων αναγνωριστικών και έτσι παρέχεται η δυνατότητα μελλοντικά για τη μετακίνηση πληροφορίας μεταξύ ροών εργασίας ERP, οπτικοποιήσεων BIM, συστημάτων υποστήριξης της εφοδιαστικής αλυσίδας και εξουσιοδοτημένων καναλιών αναφοράς, χωρίς επικαλύψεις ή ασυνέπειες (Langley et al., 2023).

Η σύνθεση αυτή τεκμηριώνει την επιχειρησιακή απόδειξη της ιδέας για τη διατήρηση ενός ακριβούς, ασφαλούς και κανονιστικά συμβατού ψηφιακού κύκλου ζωής, προσαρμόσιμου σε διαφορετικές κατηγορίες στρατιωτικών υποδομών, το οποίο υποστηρίζει τόσο τις απαιτήσεις βιωσιμότητας όσο και τις ανάγκες οργανωμένης διαχείρισης και επιχειρησιακής ετοιμότητας. Η αρχιτεκτονική και η λειτουργικότητα της πιλοτικής εφαρμογής έχουν σχεδιαστεί σκόπιμα ώστε να παραμένουν επεκτάσιμες, χωρίς όμως να προϋποθέτουν ή να ενσωματώνουν τεχνικές μηχανικής μάθησης ή προγνωστικής ανάλυσης στο παρόν στάδιο.

4.4 Κανόνες, Ειδοποιήσεις και Ροές Υποστήριξης Συντήρησης

Η πιλοτική εφαρμογή του DPP δεν στοχεύει στην πλήρη αυτοματοποίηση της συντήρησης, αλλά στην υποστήριξη των διαδικασιών συντήρησης μέσω κανόνων, έγκαιρης ειδοποίησης και τεκμηριωμένης πληροφόρησης των εμπλεκόμενων ρόλων. Οι ροές εργασίας παραμένουν ανθρωποκεντρικές, με το σύστημα να λειτουργεί ως μηχανισμός έγκαιρης επισήμανσης

συμβάντων και συγκέντρωσης πληροφοριών, χωρίς να λαμβάνει αυτόνομες αποφάσεις ή να εκτελεί προγνωστικές λειτουργίες.

Στο επίκεντρο βρίσκεται ένας μηχανισμός κανόνων ενσωματωμένος στο επίπεδο του middleware που συγκρίνει τις εισερχόμενες συγκρίσεις των αισθητήρων (Voulgaridis et al., 2024). Στο συγκεκριμένο σημείο πραγματοποιούνται συγκρίσεις μεταξύ των εισόδων, των διακυμάνσεων θερμοκρασίας με τα όρια που ορίζονται από τα βασικά στατικά δεδομένα του προϊόντος (Kühn et al., 2025) και τα ιστορικά αποτελέσματα συντήρησης που είναι αποθηκευμένα στο DPP (Çetin et al., 2023). Η λογική των ορίων μπορεί να είναι ντετερμινιστική για καλά κατανοητές συμπεριφορές υποδομών (π.χ. αντικατάσταση φίλτρου κάθε σταθερό αριθμό ωρών λειτουργίας) και βασίζεται σε σαφώς ορισμένα κατώφλια, όπως κύκλους λειτουργίας, χρονικά διαστήματα ή επιτρεπτά εύρη θερμοκρασίας και υγρασίας. Για παράδειγμα, σε περιουσιακά στοιχεία που παρακολουθούνται για διάβρωση σε παράκτιες περιοχές (Χανιάς, 2020), μια ανοδική τάση που υπερβαίνει τα προκαθορισμένα επίπεδα για μια ορισμένη διάρκεια, ενεργοποιεί μια ακολουθία ειδοποιήσεων. Μόλις εντοπιστεί παραβίαση των ορίων, το υποσύστημα προγραμματισμού αλληλεπιδρά αμφίδρομα με το ERP για να παρέχει τις απαραίτητες πληροφορίες για τη δημιουργία εντολών εργασίας ή συντηρήσεις με ετικέτες αναγνωριστικών στοιχείων που ταιριάζουν με τα αρχεία DPP (Langley et al., 2023). Αυτές οι καταχωρήσεις καθορίζουν τον τύπο της εργασίας, τα απαιτούμενα ανταλλακτικά σε σχέση με τη διαθεσιμότητα αποθεμάτων και τυχόν ειδικές απαιτήσεις πρόσβασης ή ασφάλειας που προέρχονται από τα στατικά πεδία του διαβατηρίου.

Οι καταχωρήσεις της προηγούμενης παραγράφου μετατρέπονται σε ειδοποιήσεις. Αυτές οι ειδοποιήσεις συμπυκνώνουν τις τεχνικές λεπτομέρειες σε περιλήψεις που μπορούν να αξιοποιηθούν, συμπληρωμένες με απευθείας συνδέσμους προς αρχεία DPP για πλήρες πλαίσιο, όταν απαιτείται (Hulea et al., 2024). Το προσωπικό εποπτείας βλέπει συγκεντρωτικές ειδοποιήσεις σε διεπαφές πίνακα ελέγχου που δείχνουν την κατανομή των εκκρεμών εργασιών σε όλες τις ζώνες της εγκατάστασης, μαζί με δείκτες κατάστασης για ενεργές παρεμβάσεις. Οι εξωτερικοί ελεγκτές βλέπουν μόνο ανώνυμες ή μη ευαίσθητες ειδοποιήσεις που σχετίζονται με τις υποχρεώσεις περιβαλλοντικής απόδοσης (Westerlund, 2023), διασφαλίζοντας ότι τα πρωτόκολλα ασφαλείας εμποδίζουν την ορατότητα των ενδείξεων του ρυθμού λειτουργίας. Κρίσιμο για τα στρατιωτικά πλαίσια είναι και η κατηγοριοποίηση των ειδοποιήσεων με βάση

την κρισιμότητα για το γενικότερο σύστημα . Οι ειδοποιήσεις άμεσου κινδύνου όπως η δυσλειτουργία του συστήματος πυρόσβεσης, η υπέρβαση του δομικού φορτίου που ανιχνεύεται από μετρητές τάσης, ενεργοποιούν παράκαμψη διαδρομών στον προγραμματισμό που δρομολογεί τις οδηγίες απευθείας στις ομάδες έκτακτης ανάγκης χωρίς να περιμένει τις συνήθεις ακολουθίες έγκρισης (Abedi et al., 2024).

Οι επαναλαμβανόμενες ειδοποιήσεις χαμηλού επιπέδου σχηματίζουν προφίλ τάσεων με την πάροδο του χρόνου. Όταν παρακολουθούνται μέσω πινάκων ελέγχου ανάλυσης, αυτά μπορούν να ενημερώσουν για μακροπρόθεσμες προσαρμογές προγραμματισμού, όπως η μετατόπιση των διαστημάτων επιθεώρησης για συγκεκριμένα περιουσιακά στοιχεία που υπόκεινται σε επαναλαμβανόμενα μικρά σφάλματα και όχι σε μεμονωμένα συμβάντα. Οι βρόχοι ανατροφοδότησης διασφαλίζουν ότι τα αποτελέσματα της επικύρωσης μετά την επισκευή ενημερώνουν δυναμικά τους κανόνες: εάν ένα εξάρτημα που αντικαταστάθηκε παρουσιάζει ελάχιστη φθορά κατά την επιθεώρηση, οι διαχειριστές μπορούν να επανακαθορίσουν τα όρια ανοχής για να αποφευχθούν περιττές μελλοντικές αντικαταστάσεις που θα έθεταν σε κίνδυνο τους στόχους της κυκλικής οικονομίας (Korpelaar et al., 2023). Οι παράγοντες ασφάλειας είναι αναπόσπαστο κομμάτι σε κάθε στάδιο. Το φιλτράρισμα σε επίπεδο χαρακτηριστικών εξασφαλίζει ότι το περιεχόμενο του προγραμματισμού που κοινοποιείται εκτός των βασικών ομάδων συντήρησης δεν περιέχει ποτέ ευαίσθητα τεχνικά σχέδια ή ακριβή αρχεία καταγραφής λειτουργικής χρήσης που συνδέονται με απόρρητους προγραμματισμούς αποστολών (Langley et al., 2023).

Μέσω αυτής της δομημένης προσέγγισης, η πιλοτική εφαρμογή υποστηρίζει έναν κλειστό αλλά ελεγχόμενο κύκλο παρακολούθησης, καταγραφής και διαχείρισης συντήρησης. Τα συμβάντα ανίχνευσης, οι ειδοποιήσεις και τα ιστορικά συντήρησης συνδέονται με τα αντίστοιχα ψηφιακά διαβατήρια, διασφαλίζοντας πλήρη ιχνηλασιμότητα χωρίς να παραβιάζονται οι απαιτήσεις ασφάλειας. Η αρχιτεκτονική παραμένει επεκτάσιμη, επιτρέποντας μελλοντική ενσωμάτωση προηγμένων μηχανισμών ανάλυσης, χωρίς όμως να τους υλοποιεί στο παρόν στάδιο της μελέτης.

4.5 Σενάρια Χρήσης (Use Cases)

Η ενότητα που ακολουθεί παρουσιάζει αντιπροσωπευτικά σενάρια χρήσης της πιλοτικής εφαρμογής του DPP, με στόχο την απεικόνιση του τρόπου με τον οποίο το σύστημα υποστηρίζει σε ενδεικτικό επίπεδο βασικές και κρίσιμες διαδικασίες συντήρησης κτιριακών υποδομών αυξημένων απαιτήσεων. Τα σενάρια επιλέχθηκαν ώστε να καλύπτουν τόσο κανονικές, επαναλαμβανόμενες εργασίες συντήρησης, όσο και καταστάσεις επείγουσας επέμβασης, αναδεικνύοντας τη λειτουργικότητα του DPP σε διαφορετικά επίπεδα λειτουργικής πίεσης.

Συνοπτικά, τα βασικά σενάρια χρήσης που εξετάζονται είναι τα εξής:

- Επιθεώρηση συστημάτων ασφαλείας και υποδομών κρίσιμης σημασίας, όπως συστήματα πυρανίχνευσης, με έμφαση στην τυποποιημένη καταγραφή αποτελεσμάτων ελέγχου και τη συμμόρφωση με κανονιστικά πρότυπα.
- Τακτική συντήρηση ηλεκτρομηχανολογικών συστημάτων, όπως συστήματα κλιματισμού (HVAC), με αξιοποίηση λειτουργικών μετρήσεων και ιστορικών δεδομένων.
- Αντικατάσταση ή αναβάθμιση εξοπλισμού, όπως φωτιστικά σώματα LED, με ενημέρωση των μεταδεδομένων κύκλου ζωής και τεχνικών χαρακτηριστικών.
- Διαχείριση επειγουσών επισκευών, σε περιπτώσεις αιφνίδιων βλαβών ή συμβάντων που επηρεάζουν άμεσα τη διαθεσιμότητα και την ασφάλεια της υποδομής.

Ο Πίνακας 4.1 παρουσιάζει συνοπτικά τα βασικά σενάρια χρήσης που αναλύονται στη συνέχεια, καθώς και τις οντότητες του DPP που επηρεάζονται ή τροποποιούνται σε κάθε περίπτωση. Ο πίνακας λειτουργεί ως εννοιολογικός χάρτης, διευκολύνοντας τον αναγνώστη να κατανοήσει τη δομή και τη ροή των σεναρίων πριν από την αναλυτική τους παρουσίαση.

Σενάριο	Περιγραφή	Επηρεαζόμενες Οντότητες DPP
Επιθεώρηση Συστήματος Πυρανίχνευσης	Καταγραφή αποτελεσμάτων ελέγχου, ημερομηνία δοκιμής, υπεύθυνος τεχνικός	Alert, MaintenanceLog, Device, IoT

Συντήρηση Συστήματος Κλιματισμού	Καταγραφή και ενημέρωση DPP με τιμές πίεσης/θερμοκρασίας	Alert, MaintenanceLog, Device, IoT
Αντικατάσταση Φωτιστικών LED	Ενημέρωση DPP με νέο serial number, ημερομηνία εγκατάστασης, διάρκεια ζωής	electricalSystems, maintenanceLog

Πίνακας 4.1 Σενάρια Χρήσης

4.5.1 Κοινές Εργασίες συντήρησης

Οι κοινές εργασίες συντήρησης στο πλαίσιο της πιλοτικής εφαρμογής έχουν ως στόχο να δείξουν πώς ένα DPP που ενσωματώνει αισθητήρες IoT, διαχείριση εργασιών και πλαίσιο βασισμένο σε BIM μπορεί να τυποποιήσει, να υποστηρίξει και να τεκμηριώσει κάθε κύκλο προγραμματισμένης συντήρησης σε διάφορες κατηγορίες περιουσιακών στοιχείων. Ο στόχος είναι να μετατραπούν οι διαδικασίες σε ροές εργασίας που εκτελούνται με συνέπεια και υποστηρίζονται από ψηφιακά αρχεία τα οποία συνδυάζουν τις βασικές προδιαγραφές με το ιστορικό των υπηρεσιών που έχουν συσσωρευτεί.

Αξιοποιώντας τους μηχανισμούς κανόνων και ειδοποιήσεων που περιγράφονται στην ενότητα 4.4, οι εργασίες ρουτίνας γίνονται πιο στοχευμένες και καλύτερα ευθυγραμμισμένες με τις απαιτήσεις επιχειρησιακής ετοιμότητας. Για εργασίες υψηλής συχνότητας, όπως η αλλαγή φίλτρων HVAC, το DPP λειτουργεί ως κεντρικός κόμβος συντονισμού. Κάθε περιουσιακό στοιχείο που έχει επισημανθεί κατά τη χαρτογράφηση του αποθέματος φέρει ένα μόνιμο αναγνωριστικό που συνδέει τα στατικά δεδομένα του (Kühn et al., 2025; Westerlund, 2023) και το δυναμικό λειτουργικό προφίλ του (Voulgaridis et al., 2024). Όταν πλησιάζει μια προγραμματισμένη συντήρηση, που αυτή καθορίζεται από τον χρόνο που έχει παρέλθει, ο μηχανισμός κανόνων επισημαίνει την εργασία για προγραμματισμό (Kühn et al., 2025). Η εκτέλεση της εργασίας ξεκινά με την επαλήθευση της ταυτότητας. Οι τεχνικοί σαρώνουν την ετικέτα QR ή NFC που είναι τοποθετημένη στο εξάρτημα (Hulea et al., 2024) χρησιμοποιώντας φορητές συσκευές (Laptop, Tablet) συνδεδεμένες σε ασφαλή τμήματα intranet (Abedi et al.,

2024). Η διεπαφή DPP ανακτά αμέσως τις σχετικές οδηγίες σέρβις: βήμα-βήμα διαδικασίες προσαρμοσμένες από τα εγχειρίδια του κατασκευαστή που έχουν μεταφορτωθεί κατά την αρχική προμήθεια (Çetin et al., 2023), λίστες ελέγχου ασφάλειας ειδικές για στρατιωτικά περιβάλλοντα (για παράδειγμα, πρωτόκολλα περιορισμένου χώρου ή ευαισθητοποίηση σχετικά με ηλεκτρομαγνητικούς κινδύνους) και τυχόν ειδικά περιοριστικά μέτρα πρόσβασης, όπως τα επίπεδα εξουσιοδότησης που απαιτούνται για γειτονικά συστήματα. Για εργασίες που αφορούν ευαίσθητα υλικά ή απόρρητα υποσυστήματα (Westerlund, 2023), το περιεχόμενο φιλτράρεται αυτόματα σε επίπεδο χαρακτηριστικών, έτσι ώστε οι συντηρητές να βλέπουν μόνο τα μη περιορισμένα πεδία, ενώ το προσωπικό του οργανισμού να βλέπει τους πλήρεις οδηγούς. Μετά την ολοκλήρωση κάθε ρουτίνας εργασίας, οι τεχνικοί επιβεβαιώνουν την εκτέλεση μέσα στην ίδια την διεπαφή, καταγράφοντας τα ποσοτικά αποτελέσματα και τις μετρήσεις μαζί με ποιοτικές σημειώσεις που υποστηρίζονται από φωτογραφίες ή διαγράμματα. Τα συμβάντα συντήρησης φέρουν χρονική σήμανση και καταχωρούνται σε ασφαλή αποθετήρια με άδεια πρόσβασης (Abedi et al., 2024).

Η ενσωμάτωση μετρήσεων περιβαλλοντικής έκθεσης που συλλέγονται συνεχώς μέσω δικτύων IoT ενισχύει τον κύκλο ανατροφοδότησης. Η συσχέτιση αυτών των δεδομένων με την απόδοση των περιουσιακών στοιχείων μετά τη συντήρηση παρέχει τεκμηριωμένες πληροφορίες που μπορούν να υποστηρίξουν την επανεξέταση των διαστημάτων συντήρησης από τους διαχειριστές, προσαρμοσμένων όχι μόνο στις γενικές οδηγίες του κατασκευαστή, αλλά και στις περιβαλλοντικές συνθήκες που τεκμηριώνονται στα υπομοντέλα περιβάλλοντος του DPP. Αντίστοιχη ροή εφαρμόζεται και σε περιπτώσεις αντικατάστασης ή αναβάθμισης εξοπλισμού, όπως φωτιστικά LED, όπου το DPP ενημερώνεται με νέο σειριακό αριθμό, ημερομηνία εγκατάστασης και εκτιμώμενη διάρκεια ζωής, διατηρώντας πλήρες ιστορικό κύκλου ζωής του περιουσιακού στοιχείου.

Οι τακτικές επιθεωρήσεις υποδομών κρίσιμης σημασίας για την ασφάλεια ακολουθούν ανάλογα πρότυπα, αλλά ενσωματώνουν αυστηρότερες διαδικασίες αναφοράς συμμόρφωσης. Για παράδειγμα, τα συστήματα πυρόσβεσης υποβάλλονται σε ελέγχους που επιβάλλονται σε σταθερούς μηνιαίους ή ετήσιους κύκλους, ανεξάρτητα από τις τάσεις των δεδομένων των αισθητήρων. Εδώ, το DPP εξασφαλίζει ομοιόμορφη τεκμηρίωση ενσωματώνοντας πρότυπα που καθορίζονται από εθνικούς κώδικες ή κριτήρια εγκαταστάσεων του NATO απευθείας σε

έντυπα συντήρησης (Χανιάς, 2020). Οποιαδήποτε διαπιστωθείσα ανεπάρκεια οδηγεί στην ταυτόχρονη δημιουργία διορθωτικών ενεργειών και στην ενημέρωση των σχετικών δεικτών κινδύνου στα πεδία αξιολόγησης διαθεσιμότητας του DPP.

Με την πάροδο του χρόνου, τα συγκεντρωτικά αποτελέσματα των επιθεωρήσεων βοηθούν στη διάκριση μεταξύ εξαρτημάτων που παρουσιάζουν επαναλαμβανόμενα μικρά σφάλματα και εξαρτημάτων που παραμένουν χωρίς σφάλματα υπό παρόμοιες συνθήκες λειτουργίας, πληροφορίες πολύτιμες για την αναθεώρηση των προδιαγραφών προμηθειών και τον σχεδιασμό της παράτασης του κύκλου ζωής. Οι παράγοντες διαλειτουργικότητας παραμένουν ζωτικής σημασίας ακόμη και σε αυτή την λεπτομερή κλίμακα: οι εγκαταστάσεις του NATO που λειτουργούν από κοινού μπορούν να ευθυγραμμίσουν ορισμένες επαναλαμβανόμενες εργασίες με τα πρότυπα των χωρών, ώστε οι τεχνικοί να μπορούν να τις εκτελούν εναλλακτικά (Langley et al., 2023). Σε αυτές τις περιπτώσεις, τα πεδία εξόδου του DPP υιοθετούν κωδικοποιήσεις συμβατές με τις STANAG για τα ολοκληρωμένα αρχεία καταγραφής ενεργειών που μεταφέρονται μέσω ασφαλών δικτύων της συμμαχίας για τη συνέχεια της αλυσίδας φύλαξης χωρίς διαρροή περιορισμένων λεπτομερειών τοπικής διαμόρφωσης (Χανιάς, 2020).

Κύριο πλεονέκτημα που παρατηρείται σε αυτή τη δομημένη προσέγγιση είναι η μείωση του διοικητικού φόρτου: αντί να συγκεντρώνονται διαφορετικές λίστες ελέγχου σε χαρτί μετά το τέλος κάθε κύκλου, όλα τα επιχειρησιακά στοιχεία βρίσκονται κεντρικά μέσα στα DPP που συνδέονται άμεσα με την περιγραφή του κύκλου ζωής κάθε εξαρτήματος. Αυτό επιτρέπει στους διαχειριστές που εποπτεύουν την ετοιμότητα των εγκαταστάσεων να ελέγχουν την τρέχουσα κατάσταση συμμόρφωσης σε συνολική προβολή, ενώ παράλληλα μπορούν να αναλύουν λεπτομερώς το ιστορικό σε επίπεδο περιουσιακών στοιχείων.

4.5.2 Διαδικασίες επείγουσας επισκευής

Σε καταστάσεις έκτακτης ανάγκης, όπου στοιχεία της υποδομής παρουσιάζουν απροσδόκητη βλάβη ή υφίστανται ζημιά λόγω ακραίων περιβαλλοντικών συνθηκών, λειτουργικών ατυχημάτων ή εξωτερικών απειλών, οι διαδικασίες επείγουσας επισκευής στο πλαίσιο της πιλοτικής εφαρμογής πρέπει να αξιοποιούν το πλαίσιο του DPP για να μειώσουν τους χρόνους απόκρισης, διατηρώντας παράλληλα την ιχνηλασιμότητα των αποδεικτικών στοιχείων και τη συμμόρφωση με τα πρωτόκολλα ασφαλείας.

Μια αποτελεσματική επέμβαση έκτακτης ανάγκης ξεκινά με την ταχεία ανίχνευση βλαβών. Εδώ, οι αισθητήρες IoT που είναι ενσωματωμένοι σε κρίσιμα συστήματα χρησιμεύουν ως ο κύριος μηχανισμός ανίχνευσης (Voulgaridis et al., 2024). Σε αντίθεση με τις συνήθεις ειδοποιήσεις, τα όρια για την ταξινόμηση των έκτακτων περιστατικών ορίζονται σε τιμές όπου η συνέχιση της λειτουργίας ενέχει κινδύνους για την ασφάλεια ή απειλεί τη συνέχεια της αποστολής (Kühn et al., 2025). Ταυτόχρονα, ενεργοποιούνται προκαθορισμένες διαδικασίες έκτακτης ανταπόκρισης, σύμφωνα με τα εγκεκριμένα επιχειρησιακά πρωτόκολλα, έτσι ώστε οι επιβεβαιωμένες καταστάσεις έκτακτης ανάγκης να δημιουργούν εντολές εργασίας υψηλής προτεραιότητας (Langley et al., 2023) με την ένδειξη «άμεση ανταπόκριση». Αυτές οι εντολές εργασίας ενσωματώνουν αναγνωριστικά περιουσιακών στοιχείων που συνδέονται με τις καταχωρήσεις τους στο DPP, εξασφαλίζοντας ότι οι τεχνικοί μπορούν να ανακτήσουν πλήρη δεδομένα σχετικά με το περιβάλλον χωρίς επιπλέον αναζητήσεις. Σε ένα αμυντικό πλαίσιο, δεν μπορούν να μεταδοθούν ανοιχτά όλες οι ειδοποιήσεις σφαλμάτων. Τα επείγοντα μηνύματα που περιέχουν ευαίσθητα ονόματα εξαρτημάτων ή προφίλ φορτίου δρομολογούνται μέσω ασφαλών πυλών intranet (Abedi et al., 2024) χρησιμοποιώντας κρυπτογραφημένα payloads.

Οι έλεγχοι πιστοποιητικών που συνδέονται με το DPP αποτρέπουν την ανάπτυξη προσωπικού που δεν διαθέτει την απαιτούμενη άδεια. Η εκτέλεση στο πεδίο βασίζεται στην φυσική σήμανση περιουσιακών στοιχείων που ενσωματώνεται κατά την αρχική χαρτογράφηση (Hulea et al., 2024). Οι τεχνικοί που φτάνουν στον χώρο σαρώνουν τις ετικέτες QR/NFC που είναι προσαρτημένες στα επηρεαζόμενα εξαρτήματα. Αυτό ανακτά αμέσως μια συνοπτική προβολή της «λειτουργίας επείγουσας επισκευής» της καταχώρισης διαβατηρίου. Σε αυτή τη λειτουργία, η έμφαση δίνεται σε κρίσιμες τεχνικές προδιαγραφές, τύπο υλικού για ελέγχους συμβατότητας, τελευταία ημερομηνία συντήρησης για την κατανόηση πρόσφατων παρεμβάσεων, σημαίες περιβαλλοντικών κινδύνων όπως η παρουσία αμιάντου, όλα απαλλαγμένα από μη απαραίτητα

μεταδεδομένα για τη μείωση του φόρτου πληροφοριών κατά τη διάρκεια της λειτουργίας σε κατάσταση κρίσης, ενώ εξακολουθούν να συμμορφώνονται με τα όρια ασφαλείας (Westerlund, 2023). Η μελλοντική σύνδεση ERP–DPP θα επιτρέπει την αναζήτηση αποθεμάτων σε πραγματικό χρόνο σε συνδεδεμένους κόμβους εφοδιασμού όταν χρειάζονται επείγοντως ανταλλακτικά. Για παράδειγμα, η αντικατάσταση ενός μετασχηματιστή που έχει υποστεί βλάβη και έχει εντοπιστεί μέσω παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο μπορεί να οδηγήσει σε αξιολόγηση της κατάστασης με βάση το ιστορικό του περιουσιακού στοιχείο. Η τεκμηρίωση παραμένει ένα αδιαπραγμάτευτο στοιχείο, ακόμη και υπό πίεση χρόνου. Μετά την ολοκλήρωση των ενεργειών διαλογής, είτε πρόκειται για προσωρινή επιδιόρθωση είτε για πλήρη αντικατάσταση εξαρτημάτων, οι τεχνικοί καταγράφουν τις λεπτομέρειες της επέμβασης απευθείας στους σχετικούς κόμβους συμβάντων συντήρησης του DPP (Çetin et al., 2023). Αυτές οι καταχωρήσεις περιλαμβάνουν τις παραμέτρους που μετρήθηκαν μετά την επισκευή, φωτογραφική επαλήθευση όπου επιτρέπεται από τους κανόνες ταξινόμησης και σχολιασμό τυχόν αποκλίσεων από τα τυπικά εγχειρίδια που απαιτούνται λόγω των περιβαλλοντικών συνθηκών ή των περιορισμών των πόρων στον χώρο. Τα μέτρα ασφαλείας που είναι έμφυτο στην αμυντική υποδομή απαιτούν επιλεκτική αποκάλυψη αμέσως μετά τις επισκευές. Τα επίπεδα δημόσιας συμμόρφωσης του DPP εξάγουν μόνο ανώνυμες περιλήψεις των παρεμβάσεων έκτακτης ανάγκης, π.χ. «ηλεκτρικό υποσύστημα αποκαταστάθηκε» σε συνδυασμό με μη ευαίσθητες μετρήσεις περιβαλλοντικών επιπτώσεων, προκειμένου να ικανοποιηθούν οι υποχρεώσεις διαφάνειας του EPR χωρίς να αποκαλυφθούν λεπτομέρειες σχετικά με τα εξαρτήματα (Langley et al., 2023). Εσωτερικά, οι εξουσιοδοτημένοι στρατιωτικοί διαχειριστές έχουν πλήρη πρόσβαση σε λεπτομερείς πληροφορίες, συμπεριλαμβανομένων των σειριακών αριθμών των εξαρτημάτων και των επιπέδων κατάστασης για μελλοντικές αναθεωρήσεις. Τα εξαρτήματα που αφαιρέθηκαν μπορούν να ανακατασκευαστούν, έτσι παρά την λειτουργική τους βλάβη υπάρχει η δυνατότητα να διασωθούν. Σχέδια αποσυναρμολόγησης που φυλάσσονται στο DPP καθοδηγούν την ασφαλή εξαγωγή, ενώ επιβάλλουν ελεγχόμενη πρόσβαση σε διαγράμματα συναρμολόγησης που περιέχουν απόρρητες διατάξεις. Ταυτόχρονα, τα αρχεία καταγραφής της έκθεσης στο περιβάλλον που λαμβάνονται από τα αντίστοιχα δυναμικά πεδία ελέγχουν εάν οι κλιματικοί παράγοντες συνέβαλαν ασυνήθιστα σε σύγκριση με τα βασικά εποχιακά εύρη. Οι απότομες αυξήσεις ενδέχεται να υποδηλώνουν την ανάγκη για ενισχυμένα προστατευτικά μέτρα, όπως βελτιωμένη προστασία από τη διάβρωση σε παρόμοια

περιουσιακά στοιχεία. Η διαλειτουργικότητα μεταξύ εγκαταστάσεων είναι ιδιαίτερα πολύτιμη σε αυτό το σημείο: οι εγκαταστάσεις που είναι συντονισμένες με το NATO μπορούν να μεταδίδουν εναρμονισμένες περιλήψεις συμβάντων με κωδικοποίηση STANAG μέσω ασφαλών δικτύων, ώστε οι συμμαχικές ομάδες μηχανικών που αντιμετωπίζουν παρόμοια μοντέλα εξοπλισμού μπορούν να εντοπίζουν επαναλαμβανόμενα πρότυπα αστοχιών βάσει συγκεντρωτικών ιστορικών δεδομένων (Χανιάς, 2020).

Συνοψίζοντας, η ενσωμάτωση αυτών των διαδικασιών έκτακτης ανάγκης σε μια ενοποιημένη αρχιτεκτονική DPP-ERP-BIM-IoT διασφαλίζει ότι οι κρίσεις αντιμετωπίζονται όχι με ad hoc απαντήσεις, αλλά με συντονισμένη ψηφιακή κινητοποίηση: γρήγορη αναγνώριση βλαβών από δίκτυα αισθητήρων, ασφαλής δημιουργία εργασιών υψηλής προτεραιότητας, άμεση πρόσβαση στο πλαίσιο με τη μεσολάβηση αναγνωριστικών στοιχείων περιουσιακών στοιχείων, ταχεία δρομολόγηση της αλυσίδας εφοδιασμού για συμβατά ανταλλακτικά, ελεγχόμενη αποκάλυψη που ενισχύει το επιχειρησιακό απόρρητο και αμετάβλητη καταγραφή παρεμβάσεων που υποστηρίζει τη διακυβέρνηση. Για τους διαχειριστές υποδομών των Ενόπλων Δυνάμεων της Ελλάδας, αυτό μειώνει τόσο τον μέσο χρόνο επισκευής (MTTR) για κρίσιμα συστήματα όσο και τη περεταίρω διάδοση του κινδύνου μετά από απρόβλεπτες βλάβες περιουσιακών στοιχείων, χωρίς να παραχωρείται ο έλεγχος ευαίσθητων τεχνικών δεδομένων, τα οποία παραμένουν προστατευμένα σε κάθε στάδιο της διαδικασίας.

Το παρόν κεφάλαιο παρουσίασε την πιλοτική εφαρμογή του Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος (DPP) σε αντιπροσωπευτικό περιβάλλον στρατιωτικής υποδομής, εστιάζοντας στη διαδικασία επιλογής του χώρου δοκιμής, στη συλλογή και ενοποίηση στατικών και δυναμικών δεδομένων, καθώς και στη διαχείριση και αυτοματοποίηση βασικών λειτουργιών συντήρησης. Μέσα από τη συστηματική χαρτογράφηση περιουσιακών στοιχείων, τη συνεχή παρακολούθηση κατάστασης και την τυποποιημένη καταγραφή παρεμβάσεων, το DPP αξιολογήθηκε ως λειτουργικό εργαλείο τεκμηρίωσης του κύκλου ζωής υποδομών υπό ρεαλιστικές συνθήκες προσομοίωσης.

Η πιλοτική προσέγγιση αποκάλυψε ότι η ενσωμάτωση δεδομένων από συστήματα ERP, BIM και IoT μπορεί να πραγματοποιηθεί με ελεγχόμενο τρόπο, διατηρώντας την απαιτούμενη επιχειρησιακή ασφάλεια και συμμόρφωση με κανονιστικά πλαίσια. Παράλληλα, η χρήση

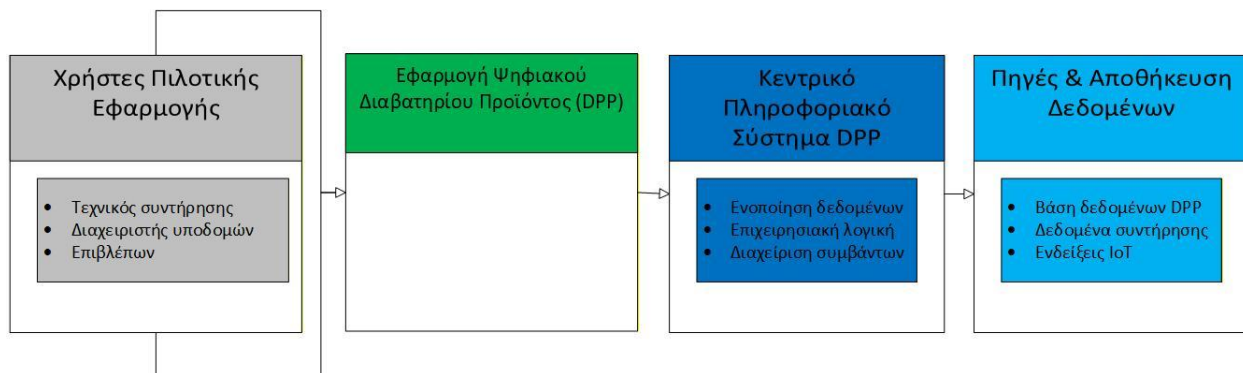
κανόνων και ορίων για την υποστήριξη των διαδικασιών συντήρησης επέτρεψε τη μετάβαση από αποσπασματικές πρακτικές σε ενοποιημένες ψηφιακές ροές εργασίας, χωρίς την ανάγκη εφαρμογής προγνωστικών ή αυτοματοποιημένων μηχανισμών πρόβλεψης.

Στο επόμενο κεφάλαιο παρουσιάζεται η εφαρμογή που αναπτύχθηκε για την υποστήριξη της πιλοτικής εφαρμογής του DPP. Η ανάλυση επικεντρώνεται στη δομή της εφαρμογής, στη διάταξη της βάσης δεδομένων και στις βασικές λειτουργίες διεπαφής χρήστη, μέσω των οποίων υλοποιούνται στην πράξη οι διαδικασίες που περιγράφηκαν στο Κεφάλαιο 4. Μέσα από παραδείγματα πραγματικών καταχωρήσεων και στιγμιότυπα οθόνης, αποτυπώνεται ο τρόπος με τον οποίο τα δεδομένα περιουσιακών στοιχείων, συντήρησης και παρακολούθησης κατάστασης απεικονίζονται και διαχειρίζονται στο πλαίσιο της εφαρμογής.

5. Υλοποίηση και Παρουσίαση της Πιλοτικής Εφαρμογής Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος.

5.1 Σκοπός και ρόλος της εφαρμογής στην πιλοτική υλοποίηση

Η εφαρμογή που αναπτύχθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας αποσκοπεί στη λειτουργική υποστήριξη και την πρακτική τεκμηρίωση του προτεινόμενου πλαισίου Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος (Digital Product Passport – DPP). Η εφαρμογή λειτουργεί ως το κύριο σημείο αλληλεπίδρασης μεταξύ των χρηστών και των δεδομένων που αναφέρθηκαν στο Κεφάλαιο 4. Ο βασικός της σκοπός είναι η συγκέντρωση, ενοποίηση και παρουσίαση ετερογενών δεδομένων που προέρχονται από απογραφές περιουσιακών στοιχείων, καταγραφές συντήρησης, λειτουργικά συμβάντα και ροές δεδομένων αισθητήρων IoT, τα οποία αποθηκεύονται και διαχειρίζονται στο backend σύστημα. Μέσω της εφαρμογής καθίσταται δυνατή η οπτικοποίηση και η διαχείριση του κύκλου ζωής επιλεγμένων συσκευών υποδομής, με τρόπο που διατηρεί τη συνοχή, την ιχνηλασιμότητα και την ασφάλεια των δεδομένων, χωρίς να απαιτείται άμεση πρόσβαση σε επιμέρους συστήματα υποστήριξης. Στο διάγραμμα 5.1 απεικονίζεται ο ρόλος της πιλοτικής εφαρμογής.



Διάγραμμα 5.1 Εννοιολογική απεικόνιση του ρόλου της εφαρμογής στην πιλοτική υλοποίηση του Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος (DPP)

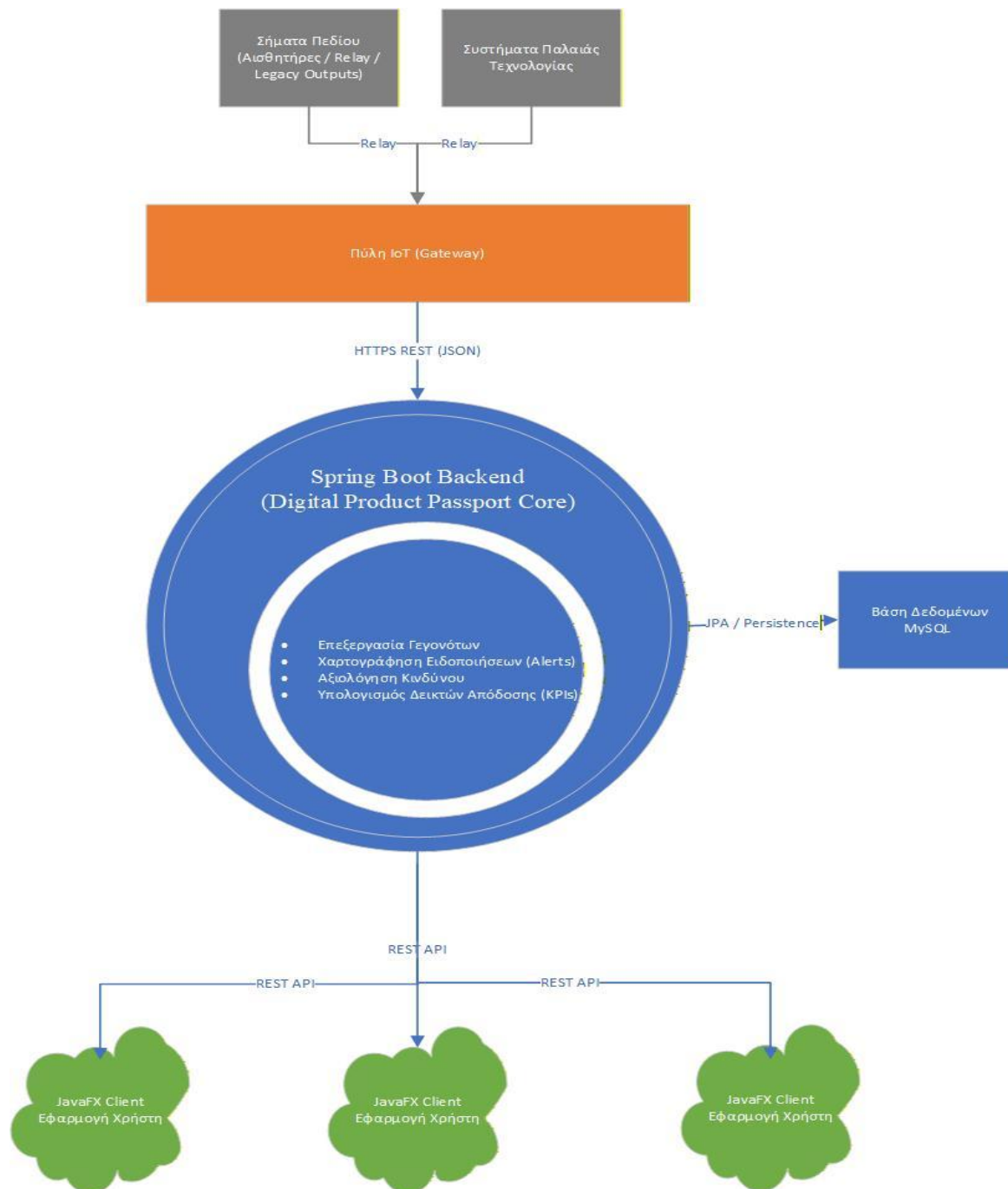
Η συγκεκριμένη υλοποίηση δεν ενσωματώνει μηχανισμούς αυτοματοποιημένης πρόβλεψης ή εκτίμησης υπολειπόμενης διάρκειας ζωής, αλλά αξιοποιεί κανόνες και δείκτες κατάστασης που βασίζονται σε τρέχοντα και ιστορικά δεδομένα, υποστηρίζοντας την επιχειρησιακή εποπτεία και τη συμμόρφωση με τα απαιτούμενα πρότυπα ασφάλειας και ιχνηλασιμότητας. Η πιλοτική υλοποίηση δεν αποσκοπεί στη στατιστική γενίκευση των αποτελεσμάτων ούτε στην αυτοματοποιημένη πρόβλεψη αστοχιών, αλλά στην επαλήθευση της λειτουργικότητας της αρχιτεκτονικής DPP και στη διερεύνηση της χρηστικότητας μιας ενοποιημένης εφαρμογής για την υποστήριξη διαδικασιών εποπτείας, τεκμηρίωσης και συντήρησης σε στρατιωτικές κτιριακές υποδομές.

5.2 Αρχιτεκτονική της Εφαρμογής και Τεχνολογική Υλοποίηση

5.2.1 Γενική αρχιτεκτονική συστήματος

Η αρχιτεκτονική της εφαρμογής βασίζεται σε πολυεπίπεδο μοντέλο διαχωρισμού ευθυνών, όπως απεικονίζεται στο διάγραμμα 5.2, με σαφή διάκριση μεταξύ επιπέδου συλλογής δεδομένων, επιπέδου επιχειρησιακής λογικής και επιπέδου παρουσίασης. Το διάγραμμα απεικονίζει τη διαστρωματωμένη αρχιτεκτονική της εφαρμογής και τις βασικές ροές δεδομένων, χωρίς να εξειδικεύει τις επιμέρους λειτουργικές ροές, οι οποίες αναλύονται σε επόμενες ενότητες. Στο κατώτερο επίπεδο, υφιστάμενα συστήματα παλαιάς τεχνολογίας και υποσυστήματα εξοπλισμού παρέχουν σήματα κατάστασης μέσω εξόδων relay ή απλών αισθητήρων, τα οποία συγκεντρώνονται σε πύλες IoT (gateways). Οι πύλες αυτές λειτουργούν ως μηχανισμοί προσαρμογής (adapters), μετατρέποντας ετερογενή σήματα σε τυποποιημένα ψηφιακά μηνύματα και προωθώντας τα με ασφαλή τρόπο προς το κεντρικό πληροφοριακό σύστημα.

Ο πυρήνας της αρχιτεκτονικής υλοποιείται μέσω Spring Boot backend, το οποίο αποτελεί τον λειτουργικό κορμό του DPP. Το backend είναι υπεύθυνο για την επεξεργασία γεγονότων, τη διαχείριση ειδοποιήσεων (alerts), την καταγραφή ιστορικών συντήρησης, την αξιολόγηση δεικτών λειτουργικής κατάστασης και την αποθήκευση όλων των δεδομένων κύκλου ζωής σε



Διάγραμμα 5.2 Γενική Αρχιτεκτονική της Εφαρμογής

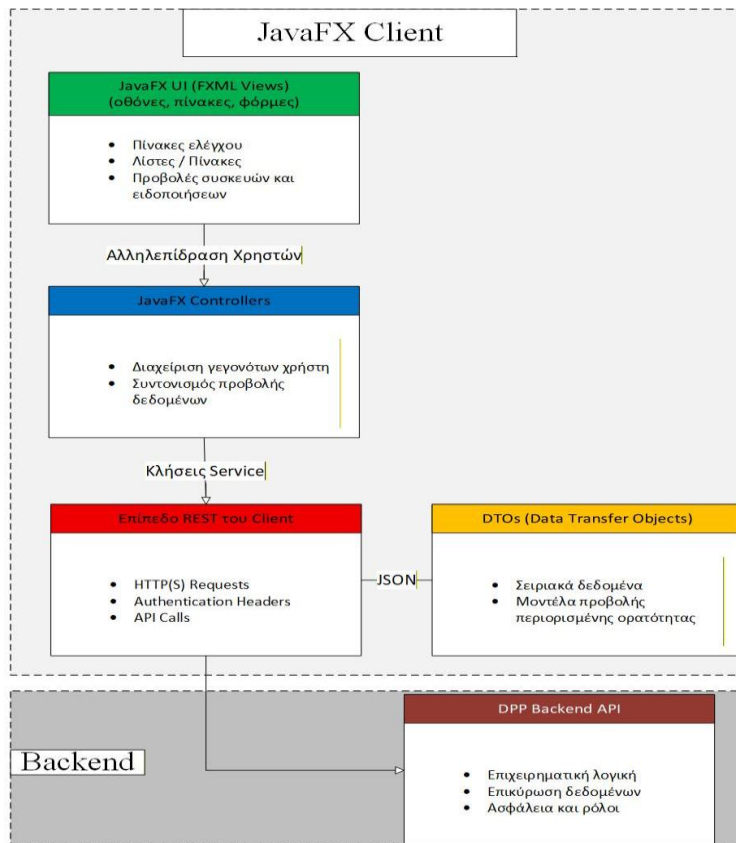
σχεσιακή βάση δεδομένων MySQL μέσω μηχανισμών JPA/Hibernate. Η επιχειρησιακή λογική υλοποιείται σε διακριτές υπηρεσίες (services), οι οποίες λειτουργούν πάνω σε καλά ορισμένα μοντέλα οντοτήτων (Device, MaintenanceLog, Alert, TelemetryReading κ.λπ.),

διασφαλίζοντας συνέπεια δεδομένων, ιχνηλασιμότητα ενεργειών και συμμόρφωση με τους περιορισμούς ασφάλειας που απαιτούνται σε στρατιωτικές υποδομές.

Το επίπεδο παρουσίασης υλοποιείται μέσω ανεξάρτητων JavaFX clients, οι οποίοι επικοινωνούν αποκλειστικά με το backend μέσω REST API. Η επιλογή πολλαπλών clients επιτρέπει την ταυτόχρονη πρόσβαση διαφορετικών ρόλων χρηστών στο σύστημα, χωρίς άμεση σύνδεση με τη βάση δεδομένων. Ο JavaFX client λειτουργεί ως ελεγχόμενη διεπαφή οπτικοποίησης και καταγραφής, παρέχοντας λειτουργίες παρακολούθησης κατάστασης συσκευών, προβολής ιστορικών συντήρησης, διαχείρισης ειδοποιήσεων και συνολικής επισκόπησης της υγείας του συστήματος. Η αρχιτεκτονική αυτή ενισχύει την επεκτασιμότητα, την ασφάλεια και την ανεξαρτησία των επιπέδων, ενώ επιτρέπει τη μελλοντική αντικατάσταση ή επέκταση του επιπέδου παρουσίασης χωρίς μεταβολές στον πυρήνα του συστήματος.

5.2.2 Δομή και λογική του JavaFX Client

Ο JavaFX client της πιλοτικής εφαρμογής υλοποιείται ως αυτόνομη desktop εφαρμογή, σχεδιασμένη με αρχές διαχωρισμού ευθυνών και αυστηρή απομόνωση της λογικής παρουσίασης από τη λογική επικοινωνίας και επεξεργασίας δεδομένων. Η αρχιτεκτονική του βασίζεται σε τρία κύρια επίπεδα: τους ελεγκτές διεπαφής (Controllers), τους μηχανισμούς επικοινωνίας REST και τα αντικείμενα μεταφοράς δεδομένων (Data Transfer Objects – DTOs). Η προσέγγιση αυτή διασφαλίζει ότι ο client λειτουργεί αποκλειστικά ως επίπεδο παρουσίασης και αλληλεπίδρασης με το σύστημα, χωρίς άμεση πρόσβαση στη βάση δεδομένων ή στη επιχειρησιακή λογική του DPP. Όπως απεικονίζεται στο διάγραμμα 5.3, ο client λειτουργεί αποκλειστικά ως επίπεδο αλληλεπίδρασης και συντονισμού αιτημάτων, επικοινωνώντας με το κεντρικό σύστημα DPP μέσω REST API και DTOs, χωρίς άμεση πρόσβαση στη βάση δεδομένων ή στους εσωτερικούς μηχανισμούς του backend.



Διάγραμμα 5.3 – Δομή και αρχιτεκτονική του JavaFX Client στο πλαίσιο του DPP

Οι JavaFX Controllers αποτελούν το σημείο σύνδεσης μεταξύ του γραφικού περιβάλλοντος και των δεδομένων που λαμβάνει ο client από το backend. Κάθε λειτουργική ενότητα της εφαρμογής (π.χ. προβολή συσκευών, ειδοποιήσεις, ιστορικό συντήρησης, συνολική κατάσταση στόλου) αντιστοιχεί σε διακριτό controller, ο οποίος είναι υπεύθυνος για τον χειρισμό γεγονότων χρήστη, την ενημέρωση των οπτικών στοιχείων και την ενεργοποίηση κατάλληλων κλήσεων προς τα REST services. Οι controllers δεν υλοποιούν επιχειρησιακούς κανόνες, αλλά λειτουργούν ως ενορχηστρωτές διεπαφής, διατηρώντας την εφαρμογή επεκτάσιμη και ευανάγνωστη.

Η επικοινωνία με το backend πραγματοποιείται μέσω εξειδικευμένων REST clients, οι οποίοι υλοποιούν κλήσεις HTTP(S) προς τα διαθέσιμα endpoints του Spring Boot backend. Οι REST clients είναι απομονωμένοι από τη λογική των controllers και διαχειρίζονται ζητήματα όπως η αυθεντικοποίηση, η εξουσιοδότηση βάσει ρόλων, η αποστολή αιτημάτων, η λήψη αποκρίσεων και η μετατροπή JSON δεδομένων σε αντικείμενα Java. Με τον τρόπο αυτό, επιτυγχάνεται

καθαρός διαχωρισμός μεταξύ διεπαφής χρήστη και μηχανισμών δικτυακής επικοινωνίας, ενώ παράλληλα διευκολύνεται η μελλοντική αντικατάσταση ή αναβάθμιση του τρόπου επικοινωνίας χωρίς μεταβολές στη διεπαφή.

Τα DTOs χρησιμοποιούνται ως ενδιάμεση αναπαράσταση των δεδομένων που ανταλλάσσονται μεταξύ client και backend. Κάθε DTO αντικατοπτρίζει επιλεγμένα πεδία των αντίστοιχων οντοτήτων του DPP, προσαρμοσμένα στις ανάγκες της παρουσίασης και στους περιορισμούς ορατότητας ανά ρόλο χρήστη. Η χρήση DTOs επιτρέπει τη μεταφορά μόνο των απολύτως απαραίτητων πληροφοριών, μειώνοντας την έκθεση ευαίσθητων δεδομένων και διασφαλίζοντας τη συμμόρφωση με τους κανόνες ασφάλειας του συστήματος. Παράλληλα, διευκολύνει την τυποποίηση των αποκρίσεων του backend και τη συνεπή απεικόνισή τους στον JavaFX client.

Συνολικά, η αρχιτεκτονική του JavaFX client υποστηρίζει μια σαφή, ελεγχόμενη και επεκτάσιμη αλληλεπίδραση με το οικοσύστημα του DPP. Ο client λειτουργεί ως σταθερό σημείο πρόσβασης για τους χρήστες της πιλοτικής εφαρμογής, επιτρέποντας την εποπτεία, την καταγραφή και την ανάλυση δεδομένων κύκλου ζωής χωρίς να υπονομεύεται η ασφάλεια ή η ακεραιότητα του κεντρικού συστήματος.

5.2.3 Ασφάλεια και Έλεγχος Πρόσβασης στον JavaFX Client

Η ασφάλεια και ο έλεγχος πρόσβασης στον JavaFX client αποτελούν θεμελιώδη σχεδιαστική απαίτηση της πιλοτικής εφαρμογής, δεδομένου ότι ο client λειτουργεί ως κύριο σημείο αλληλεπίδρασης χρηστών με δεδομένα που αφορούν κρίσιμες στρατιωτικές υποδομές. Ο σχεδιασμός ακολουθεί αρχές ελάχιστης αποκάλυψης πληροφορίας (least privilege) και καθαρούς διαχωρισμούς αρμοδιοτήτων, διασφαλίζοντας ότι η εφαρμογή παρουσίασης δεν αποκτά ποτέ άμεση πρόσβαση σε πρωτογενή δεδομένα ή εσωτερικούς μηχανισμούς του συστήματος DPP.

Ο JavaFX client δεν διαχειρίζεται τοπικά την αυθεντικοποίηση ή την εξουσιοδότηση χρηστών, αλλά βασίζεται αποκλειστικά σε μηχανισμούς που υλοποιούνται στο backend. Κάθε αίτημα προς το Spring Boot backend πραγματοποιείται μέσω ασφαλών καναλιών επικοινωνίας (HTTPS) και συνοδεύεται από τα κατάλληλα διαπιστευτήρια συνεδρίας, τα οποία ελέγχονται κεντρικά. Η προσέγγιση αυτή διασφαλίζει ότι η πολιτική ασφάλειας εφαρμόζεται ομοιόμορφα, ανεξάρτητα από τον αριθμό ή τον τύπο των client εφαρμογών που συνδέονται στο σύστημα.

Ο έλεγχος πρόσβασης υλοποιείται έμμεσα στον JavaFX client με χρήση ρόλων και δικαιωμάτων που αποδίδονται από το backend. Οι αποκρίσεις των REST endpoints περιορίζονται σε δεδομένα που αντιστοιχούν στο επίπεδο εξουσιοδότησης του χρήστη, ενώ τα DTOs περιέχουν μόνο τα επιτρεπόμενα πεδία προβολής. Με αυτόν τον τρόπο, ακόμη και αν ένας χρήστης επιχειρήσει να τροποποιήσει τη ροή της εφαρμογής ή να επαναχρησιμοποιήσει αιτήματα, δεν είναι δυνατή η ανάκτηση μη εξουσιοδοτημένων πληροφοριών μέσω του client.

Στο επίπεδο της διεπαφής χρήστη, ο JavaFX client εφαρμόζει συμπληρωματικούς μηχανισμούς ελέγχου πρόσβασης, όπως η δυναμική ενεργοποίηση ή απενεργοποίηση λειτουργιών, κουμπιών και προβολών, βάσει του ρόλου του συνδεδεμένου χρήστη. Οι μηχανισμοί αυτοί δεν αντικαθιστούν τους ελέγχους του backend, αλλά λειτουργούν υποστηρικτικά, περιορίζοντας την έκθεση λειτουργιών που δεν είναι σχετικές με τα καθήκοντα του εκάστοτε χρήστη έτσι μειώνεται ο κίνδυνος ακούσιας χρήσης ευαίσθητων λειτουργιών.

Η διαχείριση ευαίσθητων πληροφοριών, όπως δεδομένα κατάστασης υποδομών, ιστορικά συντήρησης ή ειδοποιήσεις αυξημένης κρισιμότητας, ακολουθεί πολιτικές ελεγχόμενης ορατότητας. Ο JavaFX client εμφανίζει μόνο συγκεντρωτικές ή φιλτραρισμένες πληροφορίες, ενώ λεπτομερή τεχνικά δεδομένα παρέχονται αποκλειστικά σε εξουσιοδοτημένους χρήστες και μόνο όταν απαιτείται για επιχειρησιακούς σκοπούς. Η προσέγγιση αυτή εναρμονίζεται με τις απαιτήσεις ασφάλειας στρατιωτικών πληροφοριακών συστημάτων και μειώνει τον κίνδυνο διαρροής κρίσιμων δεδομένων μέσω της διεπαφής χρήστη.

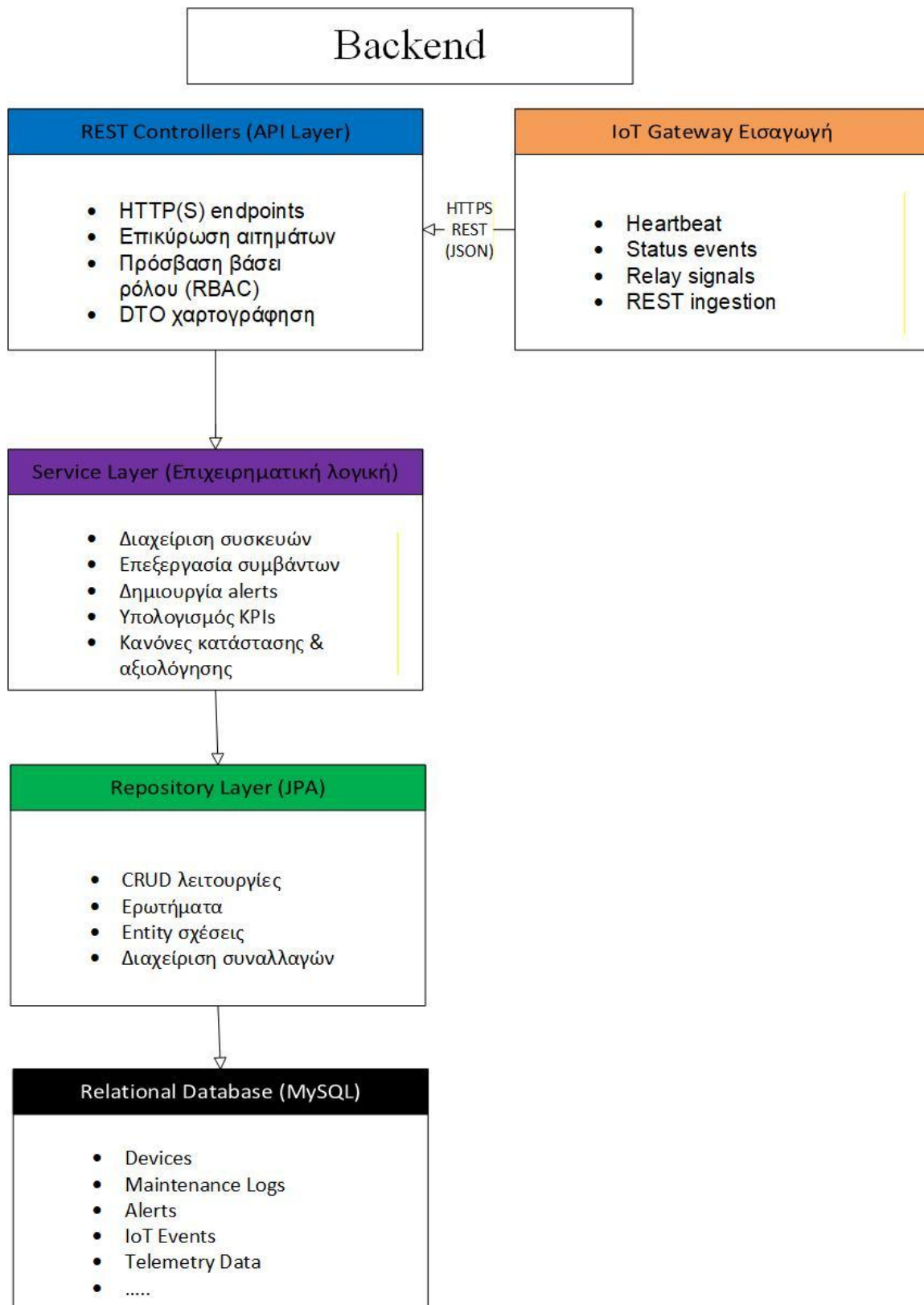
Συνοψίζοντας, η αρχιτεκτονική ασφάλειας του JavaFX client ενισχύει το κεντρικό μοντέλο ελέγχου του DPP, λειτουργώντας ως ελεγχόμενος μέρος της εφαρμογής και όχι ως αυτόνομος φορέας λογικής ασφάλειας. Η επιλογή αυτή καθιστά την εφαρμογή επεκτάσιμη, διαχειρίσιμη

και συμβατή με τις απαιτήσεις ασφάλειας και εμπιστευτικότητας που πρέπει να διαθέτει μια πιλοτική υλοποίηση σε στρατιωτικά περιβάλλοντα.

5.2.4 Backend Αρχιτεκτονική και Διαχείριση Επιχειρησιακής Λογικής

Το backend της πιλοτικής εφαρμογής υλοποιείται με χρήση Spring Boot και αποτελεί τον κεντρικό πυρήνα επεξεργασίας, αποθήκευσης και ελέγχου όλων των δεδομένων του Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος (DPP). Ο ρόλος του backend δεν περιορίζεται στη λειτουργία ενός απλού παρόχου δεδομένων προς τον JavaFX client, αλλά επεκτείνεται στη διαχείριση της επιχειρησιακής λογικής, της συνέπειας των δεδομένων, της ασφάλειας και της διαλειτουργικότητας με εξωτερικές πηγές, όπως οι πύλες IoT.

Όπως απεικονίζεται στο διάγραμμα 5.4, η αρχιτεκτονική ακολουθεί διαστρωματωμένο μοντέλο (layered architecture), με σαφή διαχωρισμό μεταξύ επιπέδου παρουσίασης (REST Controllers), επιπέδου επιχειρησιακής λογικής (Services) και επιπέδου δεδομένων (Repositories). Τα REST Controllers εκθέτουν αυστηρά ορισμένα endpoints τα οποία λειτουργούν ως μοναδικό σημείο εισόδου στο σύστημα, εξασφαλίζοντας ότι κάθε αίτημα διέρχεται από τους μηχανισμούς ελέγχου και επικύρωσης πριν την επεξεργασία του. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την ομοιόμορφη εφαρμογή κανόνων ασφάλειας και επιχειρησιακής λογικής ανεξαρτήτως των υπηρεσιών που προσφέρονται στον client. Παράλληλα, το διάγραμμα αποτυπώνει τον διαχωρισμό μεταξύ της ροής δεδομένων λειτουργικής παρακολούθησης και της εσωτερικής επιχειρησιακής επεξεργασίας τους. Η εισαγωγή δεδομένων από αισθητήρες IoT πραγματοποιείται μέσω διακριτού επιπέδου IoT Gateway και στη συνέχεια προωθούνται προς το backend μέσω ασφαλών REST κλήσεων σε μορφή JSON. Τα εισερχόμενα δεδομένα υποβάλλονται σε ελέγχους εγκυρότητας (Service Layer), συσχετίζονται με τα αντίστοιχα περιουσιακά στοιχεία και αξιολογούνται βάσει προκαθορισμένων κανόνων κατάστασης και λειτουργικών ορίων. Το επίπεδο δεδομένων (Repository Layer) υλοποιεί την πρόσβαση στη σχεσιακή βάση δεδομένων μέσω τυποποιημένων μηχανισμών διαχείρισης οντοτήτων και συναλλαγών, διασφαλίζοντας τη συνεπή καταγραφή των μεταβολών που αφορούν το Ψηφιακό Διαβατήριο Προϊόντος.



Διάγραμμα 5.4 – Διαστρωματωμένη αρχιτεκτονική backend της πιλοτικής εφαρμογής DPP

Στο επίπεδο υπηρεσιών (Service layer) υλοποιούνται οι βασικές λειτουργίες του DPP, όπως η διαχείριση συσκευών, η επεξεργασία τηλεμετρικών δεδομένων, η καταγραφή συμβάντων συντήρησης, η δημιουργία ειδοποιήσεων και ο υπολογισμός λειτουργικών δεικτών απόδοσης και κατάστασης, βασισμένων σε προκαθορισμένους κανόνες και ιστορικά δεδομένα. Οι υπηρεσίες αυτές συνδυάζουν στατικά δεδομένα απογραφής με δυναμικά δεδομένα λειτουργίας, επιτρέποντας την παραγωγή επιχειρησιακών προβολών, όπως η συνολική υγεία του συστήματος ή η κατάσταση επιμέρους υποσυστημάτων. Η λογική αυτή υλοποιείται αποκλειστικά στο backend, αποφορτίζοντας τον JavaFX client από σύνθετους υπολογισμούς και μειώνοντας τον κίνδυνο ασυνέπειας μεταξύ διαφορετικών τερματικών.

Η αποθήκευση και επεξεργασία δεδομένων υλοποιείται μέσω JPA/Hibernate και MySQL, με σαφώς ορισμένες οντότητες που αντικατοπτρίζουν τον κύκλο ζωής των περιουσιακών στοιχείων. Πίνακες όπως device, maintenance_log, alert, iot_event, telemetry_reading και environmental_info διασυνδέονται μέσω ξένων κλειδιών, εξασφαλίζοντας ακεραιότητα αναφορών και ιστορικότητα. Το backend αναλαμβάνει τη διαχείριση της χρονικής διάστασης των δεδομένων (π.χ. ημερήσια και μηνιαία συντήρηση, καταγραφές τηλεμετρίας, ειδοποιήσεις μέσω χρονοσφραγίδων), επιτρέποντας την ανάλυση της συμπεριφοράς των συσκευών σε βάθος χρόνου.

Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη διαχείριση συμβάντων και ειδοποιήσεων. Τα δεδομένα που προέρχονται από τις πύλες IoT εισάγονται στο σύστημα μέσω REST κλήσεων και μετατρέπονται σε εγγραφές τηλεμετρίας ή γεγονότων κατάστασης. Το backend εφαρμόζει κανόνες συσχέτισης και φίλτρα επικύρωσης πριν την αποθήκευση, αποτρέποντας την εισαγωγή μη έγκυρων ή ασυνήθιστων μετρήσεων. Με βάση τα αποθηκευμένα δεδομένα, δημιουργούνται εγγραφές ειδοποιήσεων (alerts) οι οποίες συνδέονται άμεσα με τις αντίστοιχες συσκευές και αποτελούν μέρος του λειτουργικού ιστορικού του DPP.

Η διαχείριση κατάστασης και διαθεσιμότητας των συσκευών υλοποιείται επίσης στο backend, μέσω συνδυασμού δεδομένων τηλεμετρίας και καταγραφών uptime. Οι υπολογισμοί αυτοί παράγουν δείκτες όπως ποσοστό διαθεσιμότητας ή συνολική επιχειρησιακή υγεία, οι οποίοι διατίθενται στον JavaFX client σε μορφή συγκεντρωτικών DTOs. Με τον τρόπο αυτό, ο client λειτουργεί κυρίως ως μηχανισμός απεικόνισης και όχι ως φορέας κρίσιμης λογικής.

Τέλος, το backend έχει σχεδιαστεί με γνώμονα την επεκτασιμότητα και τη μελλοντική ενσωμάτωση πρόσθετων λειτουργιών, όπως πιο εξελιγμένοι μηχανισμοί επεξεργασίας και αξιολόγησης δεδομένων ή διασύνδεση με εξωτερικά συστήματα ERP και BIM. Η επιλογή αυστηρά καθορισμένων REST συμβολαίων, η χρήση DTOs και ο διαχωρισμός ρόλων επιτρέπουν την εξέλιξη του συστήματος χωρίς αναδιάρθρωση της βασικής αρχιτεκτονικής. Στο πλαίσιο της πιλοτικής εφαρμογής, το backend λειτουργεί ως αξιόπιστο και ελεγχόμενο ψηφιακό υπόβαθρο, ικανό να υποστηρίξει τόσο τις λειτουργικές ανάγκες της παρούσας μελέτης όσο και μελλοντικές επεκτάσεις σε πλήρως επιχειρησιακά περιβάλλοντα.

5.3 Διαλειτουργικότητα με BIM και Συσχέτιση Περιουσιακών Στοιχείων

Η πιλοτική εφαρμογή σχεδιάστηκε εξ αρχής ως πλατφόρμα συμβατή με περιβάλλοντα BIM, με στόχο τη δυνατότητα μελλοντικής σύνδεσης των περιουσιακών στοιχείων του DPP με ψηφιακά μοντέλα κτιρίων. Η επιλογή αυτή εντάσσεται σε μια μακροπρόθεσμη προσέγγιση διαλειτουργικότητας και δεν απαιτεί τροποποίηση της βασικής αρχιτεκτονικής του συστήματος ή αναδιάρθρωση των υφιστάμενων δομών δεδομένων. Κάθε συσκευή ή υποσύστημα που καταγράφεται στο DPP μπορεί να συνδεθεί με μοναδικό αναγνωριστικό στοιχείου BIM, όπως το IFC GlobalId, καθώς και με ένδειξη σχετικά με την κατηγορία BIM που ανήκει το μοντέλο (π.χ. HVAC, Ηλεκτρισμός, Ασφάλεια). Η σύνδεση αυτή επιτρέπει την αντιστοίχιση των λειτουργικών δεδομένων μιας συσκευής με το αντίστοιχο αντικείμενο του ψηφιακού μοντέλου, χωρίς την αποθήκευση γεωμετρικών ή κατασκευαστικών πληροφοριών εντός της πλατφόρμας DPP. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγεται η επανάληψη δομικών δεδομένων, ενώ διατηρείται η δυνατότητα αναφοράς μεταξύ του συστήματος διαχείρισης και του BIM περιβάλλοντος.

Η υποστήριξη BIM οργανώνεται σε δύο διακριτά επίπεδα. Σε επίπεδο κτιρίου, το σύστημα προβλέπει την αποθήκευση αναφοράς στο αντίστοιχο BIM μοντέλο, το οποίο λειτουργεί ως κοινό πλαίσιο αναφοράς για το σύνολο των περιουσιακών στοιχείων. Σε επίπεδο συσκευής, καταγράφεται το αναγνωριστικό του στοιχείου του BIM μοντέλου που αντιστοιχεί στη συγκεκριμένη εγκατάσταση ή εξοπλισμό. Η διάκριση αυτή επιτρέπει την ακριβή αντιστοίχιση

των συσκευών χωρίς να επιβαρύνεται το σύστημα με δεδομένα που ανήκουν αποκλειστικά στο πεδίο του σχεδιασμού. Η αρχιτεκτονική του backend διαχωρίζει σαφώς το επίπεδο διαχείρισης του BIM μοντέλου, το οποίο συνδέεται με το κτίριο, από το επίπεδο αναφοράς σε επιμέρους στοιχεία του μοντέλου που αντιστοιχούν σε συσκευές. Ο διαχωρισμός αυτός ενισχύει την επεκτασιμότητα και την ιχνηλασιμότητα του συστήματος και παραμένει πλήρως συμβατός με τη φιλοσοφία του DPP, σύμφωνα με την οποία το διαβατήριο λειτουργεί ως φορέας λειτουργικών, τεχνικών και κανονιστικών πληροφοριών και όχι ως υποκατάστατο του BIM περιβάλλοντος.

Σε επίπεδο κτιρίου, η εφαρμογή DPP διατηρεί περιορισμένη αλλά κρίσιμη πληροφορία σχετικά με την ύπαρξη και τη μορφή ενός αντίστοιχου BIM μοντέλου. Συγκεκριμένα, αποθηκεύεται μια αναφορά στο BIM μοντέλο του κτιρίου (BIM Model Reference), καθώς και το τεχνικό του format (BIM Format), με τυπικές τιμές όπως IFC, RVT, DWG ή NWD. Τα στοιχεία αυτά λειτουργούν αποκλειστικά ως μεταδεδομένα σύνδεσης και τεχνικής τεκμηρίωσης και δεν περιλαμβάνουν γεωμετρικά ή δομικά δεδομένα του μοντέλου. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει στο σύστημα να γνωρίζει τον τύπο και τη θέση του BIM μοντέλου, διευκολύνοντας τη διαλειτουργικότητα με εξωτερικά εργαλεία BIM και την ενδεχόμενη χρήση BIM viewers στο μέλλον, χωρίς να επιβαρύνεται η εφαρμογή με τη διαχείριση αρχείων. Το BIM μοντέλο συνδέεται σε επίπεδο κτιρίου ως ενιαία οντότητα, ενώ οι επιμέρους συσκευές δεν συνδέονται με το ίδιο το αρχείο, αλλά με συγκεκριμένα στοιχεία εντός αυτού μέσω των αντίστοιχων BIM Element IDs. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται σαφής διαχωρισμός αρμοδιοτήτων: το κτίριο «φιλοξενεί» το BIM μοντέλο ως σημείο αναφοράς, ενώ το DPP αξιοποιεί μόνο αναγνωριστικά και μεταδεδομένα, επιτρέποντας επεκτασιμότητα, ασφάλεια και συμβατότητα με διαφορετικά BIM περιβάλλοντα.

Σε επίπεδο συσκευής, κάθε συσκευή που καταγράφεται στο σύστημα DPP περιλαμβάνει ακριβώς δύο πεδία που σχετίζονται με περιβάλλοντα BIM, τα οποία εξυπηρετούν διαφορετικούς αλλά συμπληρωματικούς σκοπούς. Το πρώτο πεδίο, BIM Element ID, αποτελεί το μοναδικό αναγνωριστικό του αντίστοιχου στοιχείου εντός του BIM μοντέλου του κτιρίου και συνήθως αντιστοιχεί στο IFC GlobalId, όπως αυτό ορίζεται στο εργαλείο BIM authoring ή προβολής (π.χ. Revit, Archicad, IFC viewer) από τον μελετητή ή μηχανικό. Το αναγνωριστικό αυτό επιτρέπει την αντιστοίχιση της συσκευής με συγκεκριμένο αντικείμενο του BIM

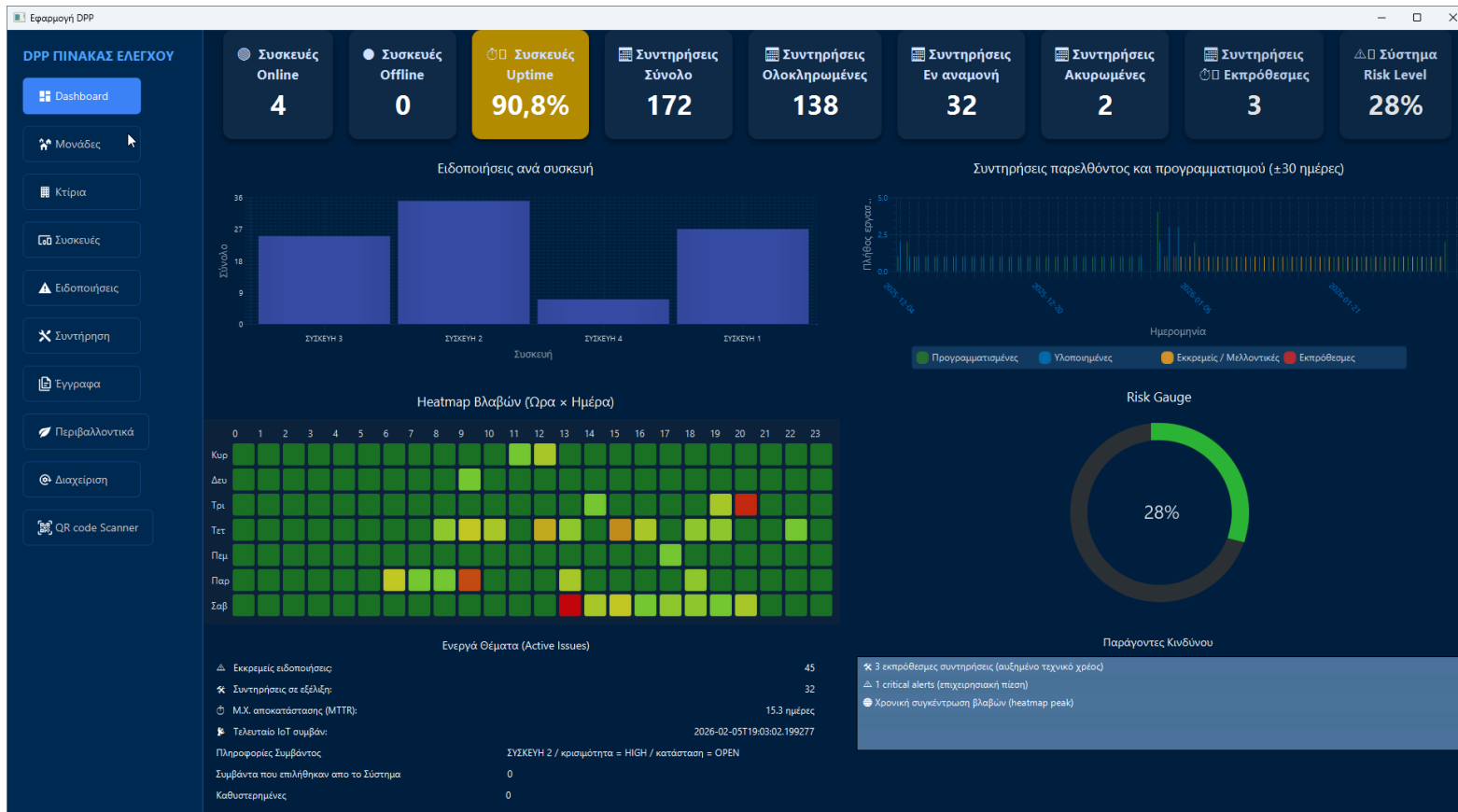
μοντέλου, χωρίς την ανάγκη αποθήκευσης γεωμετρικών ή δομικών δεδομένων στο DPP. Το δεύτερο πεδίο, BIM Discipline, εκφράζει την κατηγορία της συσκευής στο πλαίσιο του κτιρίου (π.χ. HVAC, Ηλεκτρικά, Ασφάλεια, Πυρασφάλεια, IT/Δίκτυα) και αποτελεί μεταδεδομένο σε επίπεδο DPP, όχι αυστηρά πεδίο του προτύπου IFC. Η πληροφορία αυτή χρησιμοποιείται για φιλτράρισμα, ομαδοποίηση, εφαρμογή πολιτικών συντήρησης και παραγωγή στατιστικών ή δεικτών κινδύνου. Σημαντικό στοιχείο της αρχιτεκτονικής είναι ότι η συσκευή δεν συνδέεται άμεσα με το BIM αρχείο, αλλά με συγκεκριμένο στοιχείο εντός του BIM μοντέλου του κτιρίου, ενώ η αναφορά στο ίδιο το BIM μοντέλο διατηρείται σε επίπεδο κτιρίου μέσω ξεχωριστού δείκτη (BIM Model Reference). Η προσέγγιση αυτή διασφαλίζει καθαρό διαχωρισμό μεταξύ δομικής πληροφορίας κτιρίου και λειτουργικής παρακολούθησης συσκευών, ενισχύοντας την επεκτασιμότητα και τη συμβατότητα του συστήματος.

Στο πλαίσιο της παρούσας πιλοτικής εφαρμογής, η σύνδεση με BIM περιορίζεται σε επίπεδο δομικής πρόβλεψης και αποθήκευσης αναφορών, χωρίς άμεση ενσωμάτωση ή οπτικοποίηση BIM δεδομένων στον JavaFX client. Παρ' όλα αυτά, η υφιστάμενη δομή επιτρέπει μελλοντικές επεκτάσεις, όπως η πλοήγηση σε BIM μοντέλα, η συσχέτιση εργασιών συντήρησης με χωρικές οντότητες και η ανταλλαγή δεδομένων με εξωτερικά εργαλεία BIM, χωρίς να επηρεάζεται η ασφάλεια ή η συνοχή του συστήματος.

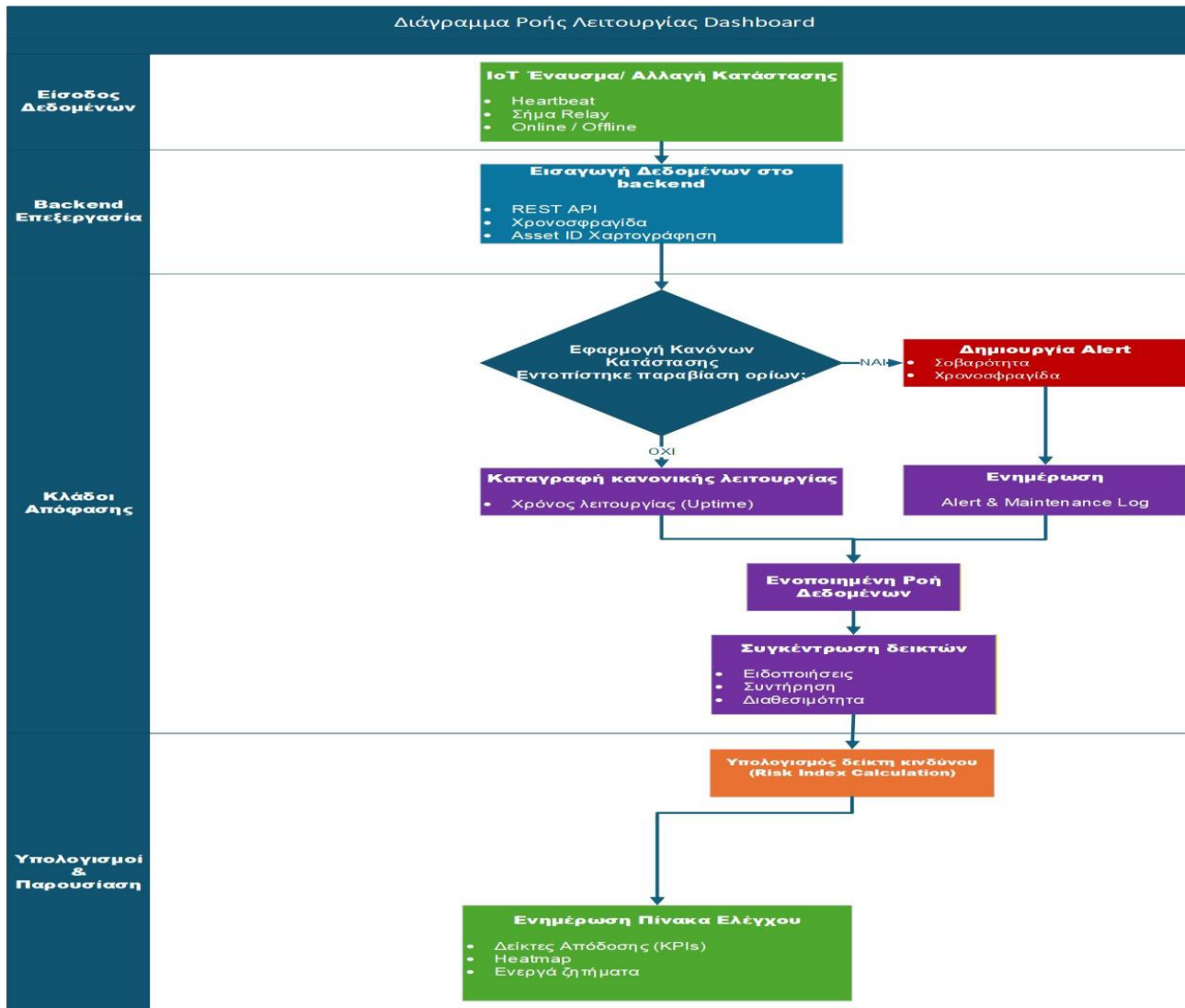
5.4 Κύριες λειτουργικές ενότητες της εφαρμογής

5.4.1 Πίνακας Επισκόπησης Συστήματος (Dashboard) και Εκτίμηση Κινδύνου

Ο Πίνακας Επισκόπησης Συστήματος (Dashboard), όπως παρουσιάζεται στην Εικόνα 5.1, αποτελεί το κεντρικό σημείο επιχειρησιακής εποπτείας της πιλοτικής εφαρμογής DPP. Σκοπός του είναι η ενοποιημένη απεικόνιση της κατάστασης των συσκευών, των ενεργών συμβάντων και των βασικών δεικτών απόδοσης (KPIs), επιτρέποντας τη γρήγορη αποτίμηση της λειτουργικής κατάστασης της υποδομής.



Εικόνα 5.1 Πίνακας Επισκόπησης Συστήματος (Dashboard) και Εκτίμηση Κινδύνου



Διάγραμμα 5.5: Διάγραμμα ροής λειτουργίας του Dashboard της πιλοτικής εφαρμογής DPP.

Το διάγραμμα 5.5 απεικονίζει τη διαδρομή των δεδομένων από την είσοδο συμβάντων μέχρι την ενημέρωση των στοιχείων οπτικοποίησης.

Στο ανώτερο επίπεδο του dashboard προβάλλονται συγκεντρωτικοί δείκτες, όπως ο συνολικός αριθμός συσκευών, η online/offline κατάστασή τους, η διαθεσιμότητα (uptime), καθώς και στατιστικά στοιχεία συντήρησης (ολοκληρωμένες, ακυρωμένες και εκπρόθεσμες εργασίες). Οι δείκτες αυτοί προκύπτουν από συνδυασμό δεδομένων IoT, αρχείων συντήρησης και ειδοποιήσεων που συλλέγονται στο backend σύστημα.

Για τη διασύνδεση υφιστάμενων (legacy) συστημάτων ασφαλείας χρησιμοποιήθηκε πύλη IoT βασισμένη σε ESP32, η οποία προσομοιώνει ψηφιακές εισόδους τύπου relay και αποστέλλει γεγονότα μέσω ασφαλούς REST API στο backend. Κάθε IoT gateway συσχετίζεται στατικά με συγκεκριμένη συσκευή του DPP, με αυτόν τον τρόπο μετατρέπονται τα σήματα χαμηλού επιπέδου σε γεγονότα επιπέδου περιουσιακού στοιχείου, χωρίς να απαιτείται καμία τροποποίηση στον υφιστάμενο εξοπλισμό. Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνεται η ενσωμάτωση legacy συστημάτων στο ψηφιακό οικοσύστημα του DPP, διατηρώντας την αρχιτεκτονική απλή και επεκτάσιμη.

Ιδιαίτερη σημασία έχει η θερμική απεικόνιση βλαβών (heatmap), η οποία δεν λειτουργεί απλώς ως γραφικό στοιχείο, αλλά ως εργαλείο ανάλυσης χρονικής συγκέντρωσης συμβάντων. Το θερμικό πλέγμα απεικονίζει πλήρες χρονικό εύρος 24×7, με χρωματική κλίμακα από πράσινο (καμία καταγεγραμμένη βλάβη) έως κόκκινο (υψηλή συχνότητα συμβάντων), αναδεικνύοντας τόσο περιόδους κανονικής λειτουργίας όσο και χρονικές συσσωρεύσεις αστοχιών. Η πληροφορία αυτή επιτρέπει την αναγνώριση επαναλαμβανόμενων μοτίβων και περιόδων αυξημένης επιχειρησιακής πίεσης, τα οποία δεν είναι εμφανή μέσω απλής απαρίθμησης ειδοποιήσεων. Το heatmap στηρίχθηκε συγκεκριμένα σε 3 έννοιες :

1. Συνολικό φορτίο, δηλαδή το σύνολο των ειδοποιήσεων στο heatmap
2. Ένταση ανά κελί, δηλαδή τον μέγιστο αριθμό ειδοποιήσεων σε ένα κελί και
3. Συγκέντρωση , όπου αν σε μικρό αριθμό κελίων έχουμε πολλές ειδοποιήσεις τότε αυξάνεται ο κίνδυνος.

Ο συνολικός δείκτης κινδύνου (Risk Index) που απεικονίζεται στο dashboard υπολογίζεται ως κανονικοποιημένος σταθμισμένος δείκτης λειτουργικού κινδύνου, βασισμένος στον συνδυασμό τεσσάρων παραγόντων:

1. Διαθεσιμότητα συσκευών, εκφρασμένη μέσω του ποσοστού offline στοιχείων,
2. Κατάσταση συντήρησης, μέσω του λόγου εκπρόθεσμων εργασιών συντήρησης,
3. Επιχειρησιακή δραστηριότητα, μέσω σταθμισμένου πλήθους ειδοποιήσεων ανάλογα με τη βαρύτητά τους, και
4. Χρονική συγκέντρωση συμβάντων, όπως αυτή αποτυπώνεται από τη θερμική απεικόνιση (heatmap).

Οι επιμέρους παράγοντες κανονικοποιούνται στο διάστημα [0–1] και ενισχύονται μη γραμμικά μέσω εκθετικών συναρτήσεων, ώστε να αναδεικνύονται καταστάσεις με μικρό αριθμό σε πλήθος αλλά υψηλής σημασίας αστοχιών (π.χ. περιορισμένος αριθμός offline συσκευών). Στη συνέχεια, συνδυάζονται με προκαθορισμένα βάρη που αντανakλούν τη σχετική επιχειρησιακή τους σημασία. Για την αποφυγή υπεραντίδρασης σε χαμηλής έντασης ή παροδικά φαινόμενα, εφαρμόζεται ζώνη επιχειρησιακής ανοχής (operational tolerance), η οποία μειώνει το τελικό αποτέλεσμα κατά σταθερό ποσοστό πριν από την τελική κανονικοποίηση στην κλίμακα 0–100. Συγκεκριμένα, μικρές αποκλίσεις από την ιδανική λειτουργία δεν μεταφράζονται άμεσα σε υψηλό δείκτη κινδύνου, αντανakλώντας ρεαλιστικά περιβάλλοντα στρατιωτικών υποδομών. Η προσέγγιση αυτή παρέχει έναν μηχανισμό εκτίμησης λειτουργικού κινδύνου, ευθυγραμμισμένο με τις γενικές αρχές διαχείρισης κινδύνου, καθώς και με την ορολογία συντήρησης του EN 13306, υποστηρίζοντας την έγκαιρη αναγνώριση επιβαρυσμένων καταστάσεων και τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων στο πλαίσιο διαχείρισης κτιριακών υποδομών. Η ενότητα Παράγοντες Κινδύνου του πίνακα ελέγχου λειτουργεί ως επεξηγηματικό επίπεδο του συνολικού δείκτη κινδύνου, παρέχοντας τις απαραίτητες πληροφορίες για τα επιμέρους στοιχεία που συμβάλλουν στη διαμόρφωσή του. Αντί ο δείκτης κινδύνου να παρουσιάζεται ως ένας απομονωμένος αριθμός, αναλύεται σε συγκεκριμένους λειτουργικούς παράγοντες, όπως η ύπαρξη εκπρόθεσμων συντηρήσεων, η παρουσία ενεργών ή υψηλής κρισιμότητας ειδοποιήσεων και η χρονική συγκέντρωση συμβάντων που αναδεικνύεται μέσω της θερμικής

απεικόνισης. Κάθε παράγοντας συνοδεύεται από συνοπτική περιγραφή της επίδρασής του, επιτρέποντας στον χρήστη να κατανοήσει αν η αυξημένη τιμή κινδύνου οφείλεται σε τεχνική υστέρηση, σε πρόσφατη λειτουργική πίεση ή σε επαναλαμβανόμενα μοτίβα αστοχιών. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει τη χρησιμότητα του dashboard ως εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων, καθώς μετατρέπει τον δείκτη κινδύνου από απλή ένδειξη κατάστασης σε τεκμηριωμένο αποτέλεσμα ανάλυσης, διευκολύνοντας τον προσανατολισμό των ενεργειών συντήρησης και την ιεράρχηση παρεμβάσεων.

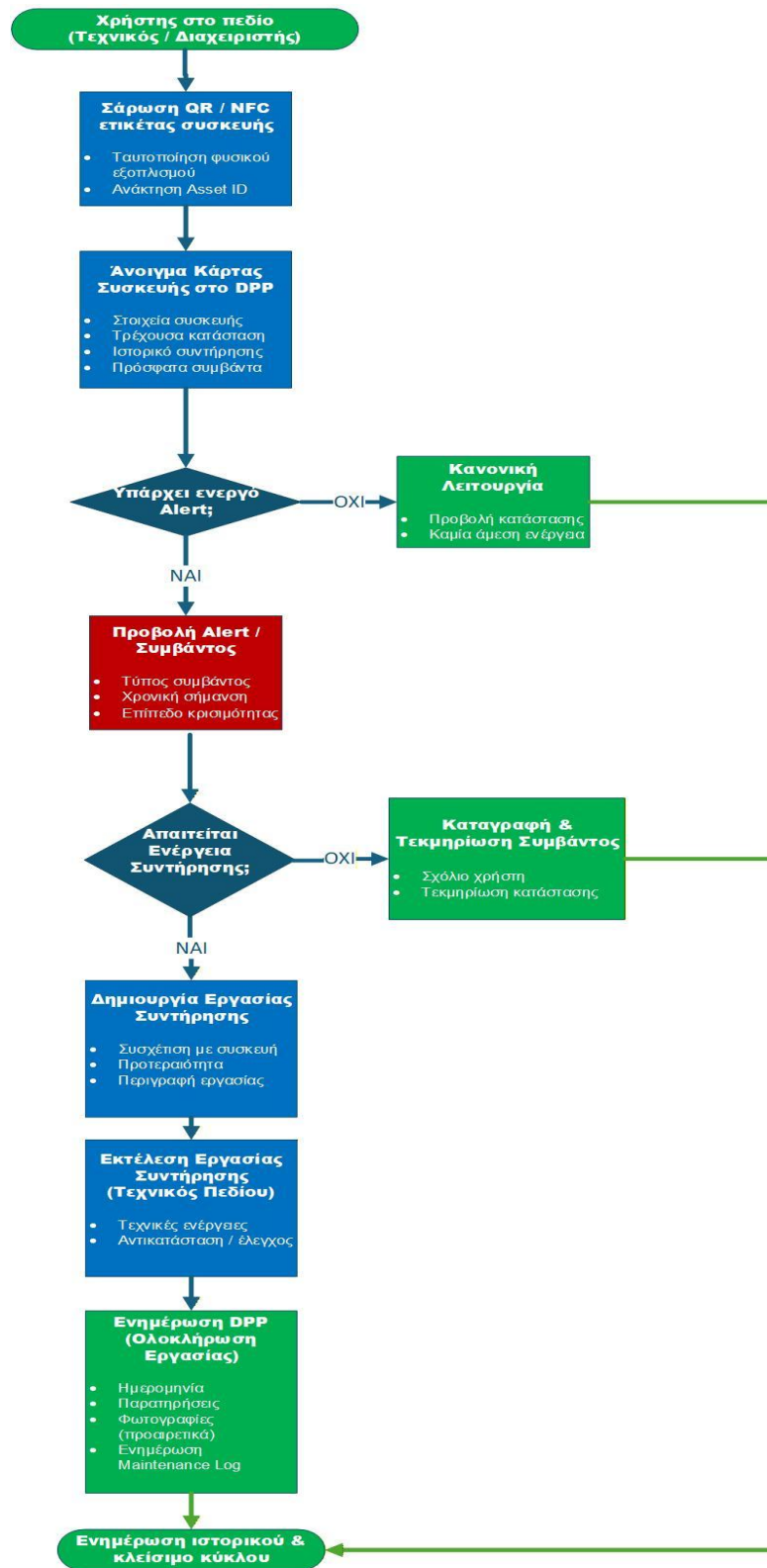
Η απεικόνιση των ειδοποιήσεων ανά συσκευή στο dashboard υλοποιείται μέσω δυναμικής συλλογής και συγκέντρωσης δεδομένων ειδοποιήσεων από το σύνολο της εγκατάστασης. Συγκεκριμένα, η εφαρμογή διατρέχει διαδοχικά τα επίπεδα τοποθεσίας, κτιρίου και συσκευής, ανακτώντας όλα τα καταγεγραμμένα alerts που συσχετίζονται με κάθε επιμέρους στοιχείο. Τα δεδομένα ομαδοποιούνται σε επίπεδο συσκευής και υπολογίζεται το συνολικό πλήθος ειδοποιήσεων ανά συσκευή, το οποίο αποτυπώνεται σε ραβδόγραμμα. Η κλίμακα του άξονα τιμών προσαρμόζεται δυναμικά με βάση το μέγιστο παρατηρούμενο φορτίο ειδοποιήσεων, διασφαλίζοντας συγκρίσιμη και ευανάγνωστη παρουσίαση ακόμη και σε περιπτώσεις μικρού αριθμού συμβάντων. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει την άμεση οπτική αναγνώριση συσκευών με αυξημένη επιχειρησιακή δραστηριότητα ή επαναλαμβανόμενα προβλήματα, υποστηρίζοντας τη γρήγορη αξιολόγηση της κατάστασης του συστήματος χωρίς την ανάγκη επιμέρους ανάλυσης μεμονωμένων εγγραφών.

Η χρονική απεικόνιση της κατάστασης συντηρήσεων στο dashboard υλοποιείται μέσω ραβδογράμματος το οποίο καλύπτει συμμετρικό χρονικό παράθυρο τριάντα ημερών πριν και μετά την τρέχουσα ημερομηνία. Για κάθε ημερομηνία του παραθύρου, οι εργασίες συντήρησης κατηγοριοποιούνται σε τέσσερις διακριτές ομάδες: προγραμματισμένες (baseline), υλοποιημένες, εκκρεμείς μελλοντικές και εκπρόθεσμες. Η κατηγοριοποίηση βασίζεται στη συνδυαστική αξιολόγηση της προγραμματισμένης ημερομηνίας, της ημερομηνίας εκτέλεσης και της τρέχουσας κατάστασης της εργασίας. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη σαφή διάκριση μεταξύ κανονικής ροής συντήρησης και αποκλίσεων από το προγραμματισμένο πλάνο, αναδεικνύοντας τόσο τη συμμόρφωση όσο και το συσσωρευμένο τεχνικό χρέος. Επιπλέον, η διαδραστική φύση του γραφήματος επιτρέπει την επιλογή μεμονωμένων χρονικών σημείων και

κατηγοριών, διευκολύνοντας τη μετάβαση από τη συνοπτική επισκόπηση στη λεπτομερή ανάλυση, χωρίς την ανάγκη πλοήγησης σε ξεχωριστές οθόνες.

Τέλος, η ενότητα ενεργά θέματα (Active Issues) του πίνακα ελέγχου συγκεντρώνει σε πραγματικό χρόνο τα κρίσιμα ανοιχτά ζητήματα του συστήματος, συνδυάζοντας δεδομένα από ειδοποιήσεις και συντηρήσεις. Ο αριθμός των εκκρεμών ειδοποιήσεων προκύπτει από την καταμέτρηση όλων των alerts που δεν βρίσκονται σε κατάσταση CLOSED, παρέχοντας άμεση εικόνα της τρέχουσας επιχειρησιακής πίεσης. Παράλληλα, εμφανίζεται ο αριθμός των συντηρήσεων σε εξέλιξη, ο οποίος βασίζεται σε εγγραφές συντήρησης με κατάσταση PENDING, αποτυπώνοντας το ενεργό τεχνικό φορτίο του συστήματος. Συμπληρωματικά, υπολογίζεται και προβάλλεται ο δείκτης MTTR (Mean Time To Repair), ο οποίος εξάγεται από τα ιστορικά δεδομένα προγραμματισμένων και εκτελεσμένων εργασιών, προσφέροντας μια συνοπτική μέτρηση της ταχύτητας αποκατάστασης βλαβών. Επιπλέον, η λειτουργία Last IoT Event παρουσιάζει το χρονικά πιο πρόσφατο συμβάν που έχει μετατραπεί σε alert, εμφανίζοντας τόσο τη χρονική σήμανση όσο και τα βασικά χαρακτηριστικά του (συσκευή, κρισιμότητα, κατάσταση). Με τον τρόπο αυτό, ο πίνακας ελέγχου δεν περιορίζεται σε στατικούς μετρητές, αλλά λειτουργεί ως επιχειρησιακό σημείο αναφοράς, συνδέοντας την τρέχουσα εικόνα συμβάντων, τη συντήρηση και τη χρονική εγγύτητα των IoT δεδομένων σε ένα συνεκτικό εργαλείο υποστήριξης αποφάσεων.

Για την αποτύπωση της λειτουργίας της εφαρμογής από την πλευρά του τελικού χρήστη, το διάγραμμα 5.6 παρουσιάζει τη βασική ροή αλληλεπίδρασης μέσω φυσικής σήμανσης (QR/NFC) στο πλαίσιο της πιλοτικής εφαρμογής του Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος. Η ροή περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο ο χρήστης συνδέει τον φυσικό εξοπλισμό με την αντίστοιχη ψηφιακή καταχώριση, αξιολογεί την κατάσταση της συσκευής, διαχειρίζεται ενεργά συμβάντα και τεκμηριώνει ή ενεργοποιεί διαδικασίες συντήρησης. Το διάγραμμα λειτουργεί ως εννοιολογικό πλαίσιο αναφοράς για τις επιμέρους λειτουργικές ενότητες της εφαρμογής που αναλύονται στις επόμενες υποενότητες.

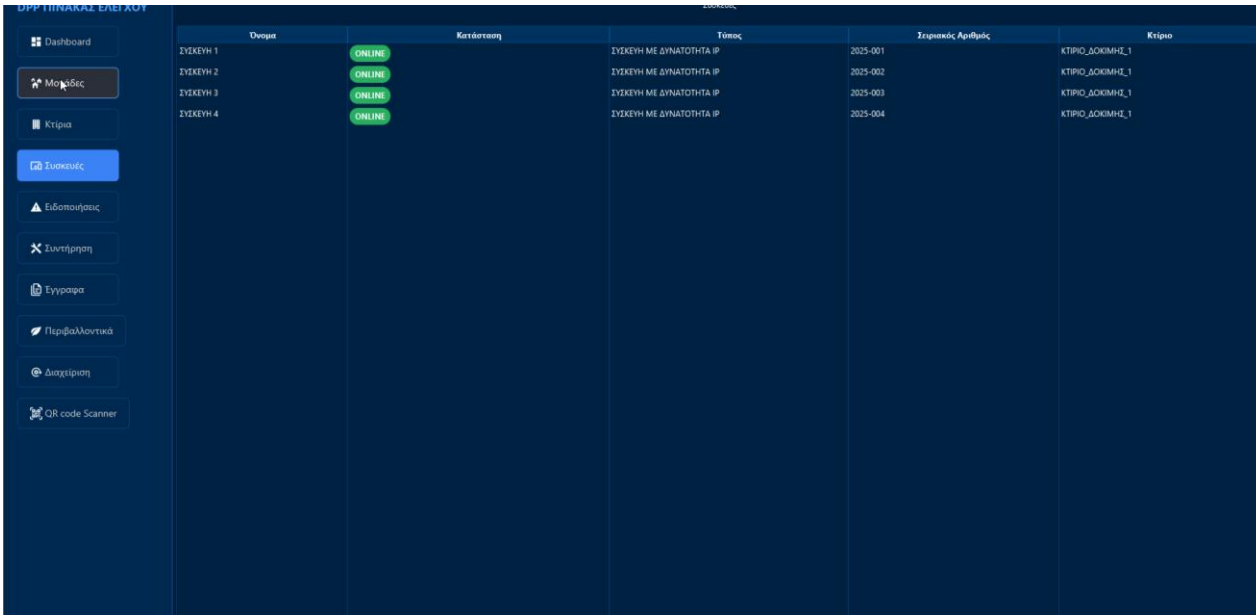


Διάγραμμα 5.6 Ροή αλληλεπίδρασης χρήστη με το DPP μέσω σάρωσης QR και διαχείρισης συντήρησης

5.4.2 Διαχείριση και Προβολή Συσκευών (Devices)

Η ενότητα διαχείρισης συσκευών της εφαρμογής παρέχει μια συγκεντρωτική κατάσταση των περιουσιακών στοιχείων που συμμετέχουν στο πιλοτικό σενάριο του DPP. Κάθε συσκευή (π.χ. UPS, σύστημα κλιματισμού, σύστημα καμερών ή μονάδα πυρανίχνευσης) εμφανίζεται σε μορφή δομημένης λίστας, η οποία αντλεί τα δεδομένα της δυναμικά από το backend μέσω REST συνδέσεων. Για κάθε εγγραφή προβάλλονται βασικά αναγνωριστικά χαρακτηριστικά, όπως η ονομασία, ο τύπος, ο σειριακός αριθμός και η συσχέτιση με το αντίστοιχο κτίριο, επιτρέποντας την άμεση αναγνώριση της συσκευής στο φυσικό περιβάλλον της εγκατάστασης.

Κεντρικό στοιχείο της προβολής αποτελεί η κατάσταση λειτουργίας (online/offline) της συσκευής, η οποία αποτυπώνεται οπτικά μέσω ενδείξεων διαθεσιμότητας. Η πληροφορία αυτή προέρχεται από δεδομένα επικοινωνίας και γεγονότων που έχουν παραχθεί από IoT πηγές ή legacy συστήματα μέσω gateway, και αντικατοπτρίζει τρέχουσα επιχειρησιακή διαθεσιμότητα της συσκευής. Με τον τρόπο αυτό, η λίστα συσκευών λειτουργεί όχι απλώς ως στατικός κατάλογος, αλλά ως ζωντανή απεικόνιση της επιχειρησιακής κατάστασης όλης της υποδομής.



Όνομα	Κατάσταση	Τύπος	Σειριακός Αριθμός	Κτίριο
ΣΥΣΚΕΥΗ 1	ONLINE	ΣΥΣΚΕΥΗ ΜΕ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ IP	2025-001	ΚΤΙΡΙΟ_ΔΟΚΙΜΗΣ_1
ΣΥΣΚΕΥΗ 2	ONLINE	ΣΥΣΚΕΥΗ ΜΕ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ IP	2025-002	ΚΤΙΡΙΟ_ΔΟΚΙΜΗΣ_1
ΣΥΣΚΕΥΗ 3	ONLINE	ΣΥΣΚΕΥΗ ΜΕ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ IP	2025-003	ΚΤΙΡΙΟ_ΔΟΚΙΜΗΣ_1
ΣΥΣΚΕΥΗ 4	ONLINE	ΣΥΣΚΕΥΗ ΜΕ ΔΥΝΑΤΟΤΗΤΑ IP	2025-004	ΚΤΙΡΙΟ_ΔΟΚΙΜΗΣ_1

Εικόνα 5.2 Διαχείριση και προβολή συσκευών

Στην Εικόνα 5.2 απεικονίζεται η λίστα συσκευών της εφαρμογής, με ενδείξεις λειτουργικής κατάστασης και δυνατότητα πρόσβασης σε αναλυτικές πληροφορίες ανά συσκευή.

Η διεπαφή υποστηρίζει επίσης αλληλεπίδραση σε επίπεδο συσκευής, επιτρέποντας την πρόσβαση σε αναλυτική “κάρτα συσκευής”, καθώς και τη διαχείριση των μεταδεδομένων της μέσω ειδικού μενού ενεργειών. Η συσχέτιση κάθε συσκευής με τα αντίστοιχα δεδομένα IoT και τα παραγόμενα συμβάντα επιτρέπει τη μετάβαση από μια απλή λίστα εξοπλισμού σε ένα ενιαίο σημείο εποπτείας, όπου συνδέονται λειτουργική κατάσταση, ειδοποιήσεις και ιστορικά δεδομένα. Η προσέγγιση αυτή υποστηρίζει τον ρόλο της εφαρμογής ως εργαλείο διαχείρισης υποδομών στο πλαίσιο του DPP, διατηρώντας σαφή διαχωρισμό μεταξύ παρουσίασης, επιχειρησιακής λογικής και συλλογής δεδομένων.

5.4.3 Ιστορικό Συντήρησης (Maintenance Logs)

Η ενότητα ιστορικού συντήρησης της εφαρμογής παρέχει πλήρη και χρονολογικά οργανωμένη απεικόνιση των εργασιών συντήρησης που έχουν καταγραφεί στο πλαίσιο της πιλοτικής υλοποίησης του DPP. Κάθε εγγραφή συντήρησης σχετίζεται άμεσα με συγκεκριμένη συσκευή και κτίριο, διασφαλίζοντας την ιχνηλασιμότητα των παρεμβάσεων σε επίπεδο περιουσιακού στοιχείου και την αποτύπωση της λειτουργικής του πορείας στον χρόνο. Η πληροφορία αντλείται δυναμικά από το backend μέσω REST συνδέσεων και παρουσιάζεται σε μορφή πίνακα, ο οποίος λειτουργεί ως ενιαίο σημείο αναφοράς για την τεχνική διαχείριση του εξοπλισμού.

Η κατάσταση κάθε εργασίας συντήρησης αναπαρίσταται μέσω πεπερασμένου συνόλου καταστάσεων (PENDING, COMPLETED, CANCELLED, ESCALATED, AUTO_CLOSED), γεγονός που επιτρέπει την εξαγωγή λειτουργικών δεικτών με απλή καταμέτρηση, χωρίς την ανάγκη έμμεσων υποθέσεων ή πολύπλοκων αναλύσεων. Οι καταστάσεις escalated και auto-closed δεν αποτυπώνουν αποκλειστικά την τεχνική κατάσταση του εξοπλισμού, αλλά τη συμπεριφορά της διαδικασίας συντήρησης, αναδεικνύοντας περιπτώσεις όπου απαιτήθηκε διοικητική παρέμβαση ή όπου μια εργασία έκλεισε αυτόματα βάσει προκαθορισμένων

κανόνων. Με τον τρόπο αυτό, το ιστορικό συντήρησης λειτουργεί τόσο ως τεχνικό αρχείο όσο και ως εργαλείο αξιολόγησης διαδικασιών.

Στην εικόνα 5.3 απεικονίζεται το ιστορικό συντήρησης της εφαρμογής, καθώς και η προβολή των επερχόμενων εργασιών ανά συσκευή.

The screenshot displays a software interface for maintenance logs. On the left is a navigation sidebar with options like Dashboard, Μονάδες, Κτίρια, Συσκευές, Λειτουργίες, Συντήρηση (highlighted), Έγγραφο, Περιβάλλονικά, Διαχείριση, and QR code Scanner. The main area is divided into two sections. The top section is a table of maintenance logs with columns for device ID, technician, and date. The bottom section is a table titled 'Επόμενη Συντήρηση' (Next Maintenance) with columns for device ID, frequency, and date.

Συσκευή	Λειτουργία	Επόμενη συντήρηση
ΣΥΣΚΕΥΗ 1	MONTHLY	2026-01-30
ΣΥΣΚΕΥΗ 2	MONTHLY	2026-01-30
ΣΥΣΚΕΥΗ 3	MONTHLY	2026-01-30
ΣΥΣΚΕΥΗ 4	MONTHLY	2026-01-30

Εικόνα 5.3 Ιστορικό συντήρησης (Maintenance Logs)

Η εφαρμογή υποστηρίζει την ταυτόχρονη διαχείριση ημερήσιων και μηνιαίων συντηρήσεων, ενώ η χρονολογική απεικόνιση των εργασιών επιτρέπει την παρακολούθηση της συνέπειας υλοποίησης του προγράμματος συντήρησης. Παράλληλα, η παρουσία ξεχωριστής προβολής για τις επερχόμενες συντηρήσεις προσφέρει προληπτική εικόνα των επόμενων παρεμβάσεων, με χρωματική κωδικοποίηση που αντανακλά τον χρονικό ορίζοντα εκτέλεσης. Η άμεση σύνδεση των εγγραφών με την αντίστοιχη κάρτα συσκευής επιτρέπει τη μετάβαση από το ιστορικό γεγονός στο συνολικό προφίλ του περιουσιακού στοιχείου, ενισχύοντας τη συνοχή της εφαρμογής ως εργαλείο διαχείρισης κύκλου ζωής στο πλαίσιο του DPP.

5.4.4 Συμβάντα και ειδοποιήσεις (Alerts)

Η ενότητα συμβάντων και ειδοποιήσεων υλοποιεί τον βασικό μηχανισμό παρακολούθησης της επιχειρησιακής κατάστασης των συσκευών του συστήματος DPP. Κάθε ειδοποίηση αντιστοιχεί

σε συγκεκριμένη συσκευή και περιλαμβάνει πληροφορίες για το είδος του συμβάντος, τη χρονική στιγμή εμφάνισης, το επίπεδο κρισιμότητας και την τρέχουσα κατάσταση του. Οι ειδοποιήσεις εμφανίζονται σε συγκεντρωτικό πίνακα, ο οποίος υποστηρίζει αυτόματη ταξινόμηση με βάση τη χρονική σήμανση, επιτρέποντας την άμεση προβολή των πιο πρόσφατων συμβάντων. Η χρονική πληροφορία μορφοποιείται σε αναγνώσιμη μορφή ημερομηνίας και ώρας, διασφαλίζοντας σαφή αποτύπωση της εξέλιξης των γεγονότων στο χρόνο.

Στην εικόνα 5.4 παρουσιάζεται η οθόνη διαχείρισης ειδοποιήσεων της εφαρμογής, με κατηγοριοποίηση ανά συσκευή, χρονική σήμανση και οπτική ένδειξη κρισιμότητας.

Συσκευή	Μήνυμα	Ημερομηνία	Τύπος
ΣΥΣΚΕΥΗ 3	Η συσκευή δεν ανταποκρίθηκε στο ring	30/12/2025 21:34	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 3	Η συσκευή είναι ξανά προσβλέψιμη	30/12/2025 21:35	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 4	Η συσκευή δεν ανταποκρίθηκε στο ring	30/12/2025 21:39	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 1	Υγρασία πάνω από το όριο (σφάλμα παρακολούθησης).	14/10/2025 17:21	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 4	Εντοπίστηκε σφάλμα .	02/11/2025 13:21	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 3	Τάση κάτω από το όριο.	03/11/2025 11:12	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 4	Εντοπίστηκε σφάλμα εκτός σύνδεσης της συσκευής.	11/12/2025 00:42	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 3	Η συσκευή δεν ανταποκρίθηκε στο ring	30/12/2025 22:21	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 3	Η συσκευή είναι ξανά προσβλέψιμη	30/12/2025 22:22	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 3	Η συσκευή δεν ανταποκρίθηκε στο ring	30/12/2025 22:28	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 2	Η συσκευή δεν ανταποκρίθηκε στο ring	30/12/2025 22:34	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 2	Η συσκευή είναι ξανά προσβλέψιμη	30/12/2025 22:35	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 2	Η συσκευή δεν ανταποκρίθηκε στο ring	30/12/2025 22:36	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 2	Η συσκευή είναι ξανά προσβλέψιμη	30/12/2025 22:38	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 3	Η συσκευή είναι ξανά προσβλέψιμη	30/12/2025 22:54	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 4	Η συσκευή είναι ξανά προσβλέψιμη	30/12/2025 22:55	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 1	Η συσκευή δεν ανταποκρίθηκε στο ring	31/12/2025 10:28	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 1	Η συσκευή είναι ξανά προσβλέψιμη	31/12/2025 10:29	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 1	Η συσκευή δεν ανταποκρίθηκε στο ring	31/12/2025 11:38	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 1	Η συσκευή είναι ξανά προσβλέψιμη	31/12/2025 11:39	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 1	Η συσκευή δεν ανταποκρίθηκε στο ring	31/12/2025 11:41	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 1	Η συσκευή είναι ξανά προσβλέψιμη	31/12/2025 11:42	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 1	Η συσκευή δεν ανταποκρίθηκε στο ring	31/12/2025 12:07	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 2	Η συσκευή δεν ανταποκρίθηκε στο ring	31/12/2025 12:07	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 3	Η συσκευή δεν ανταποκρίθηκε στο ring	31/12/2025 12:07	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 1	Η συσκευή είναι ξανά προσβλέψιμη	31/12/2025 14:18	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 2	Η συσκευή είναι ξανά προσβλέψιμη	31/12/2025 14:19	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 3	Η συσκευή είναι ξανά προσβλέψιμη	31/12/2025 14:20	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 3	Η συσκευή δεν ανταποκρίθηκε στο ring	31/12/2025 17:35	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 3	Η συσκευή είναι ξανά προσβλέψιμη	31/12/2025 17:40	Ποιότητα
ΣΥΣΚΕΥΗ 1	Η συσκευή δεν ανταποκρίθηκε στο ring	31/12/2025 18:10	Ποιότητα

Εικόνα 5.4 Συμβάντα και ειδοποιήσεις (Alerts)

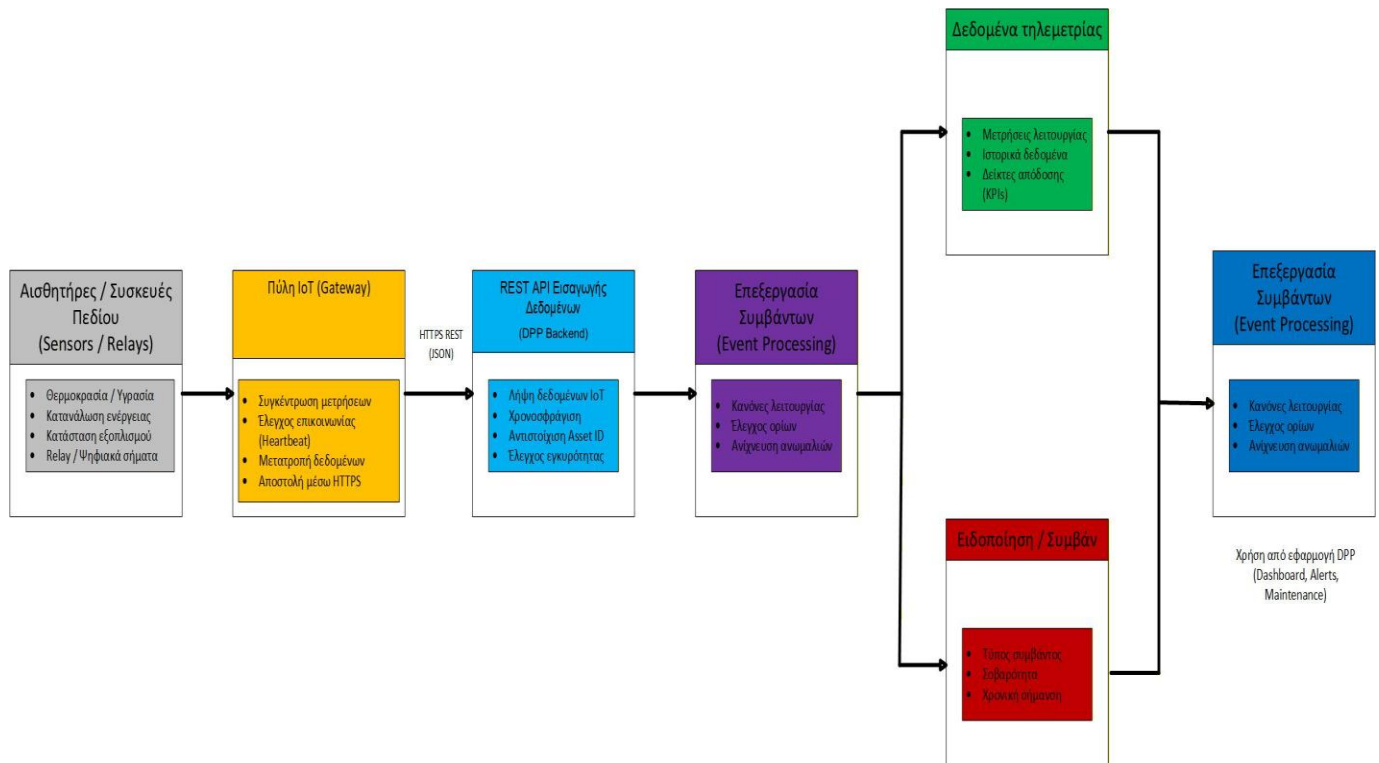
Η κατηγοριοποίηση των ειδοποιήσεων πραγματοποιείται μέσω συνδυασμού κατάστασης και επιπέδου σοβαρότητας (severity). Οι ειδοποιήσεις υψηλής κρισιμότητας (CRITICAL) επισημαίνονται οπτικά στον πίνακα, ώστε να ξεχωρίζουν άμεσα από λιγότερο κρίσιμα συμβάντα. Επιπλέον, η κατάσταση κάθε ειδοποίησης (π.χ. ανοικτή ή κλειστή) αποδίδεται με διακριτή οπτική σήμανση (badge), διευκολύνοντας τη γρήγορη κατανόηση της τρέχουσας επιχειρησιακής εικόνας. Η διεπαφή υποστηρίζει άμεση συσχέτιση ειδοποιήσεων με τις

αντίστοιχες συσκευές. Με διπλό κλικ σε μία ειδοποίηση, ο χρήστης μεταφέρεται στην κάρτα της σχετικής συσκευής, αποκτώντας πρόσβαση σε αναλυτικές πληροφορίες κατάστασης και ιστορικού. Παράλληλα, μέσω μενού ενεργειών, παρέχεται η δυνατότητα επεξεργασίας της ειδοποίησης, υποστηρίζοντας τη διαχείριση του κύκλου ζωής των συμβάντων.

Ο ρόλος των ειδοποιήσεων υπερβαίνει την απλή καταγραφή γεγονότων, καθώς λειτουργεί ως μηχανισμός έγκαιρης προειδοποίησης και βασική πηγή πληροφόρησης για την εκτίμηση επιχειρησιακής πίεσης στο σύστημα. Τα δεδομένα των ειδοποιήσεων αξιοποιούνται τόσο στη λειτουργική εποπτεία όσο και στον υπολογισμό δεικτών κινδύνου και υγείας του συνόλου των συσκευών, ενισχύοντας τον ρόλο τους ως κρίσιμο στοιχείο της συνολικής αρχιτεκτονικής του DPP.

5.5 Ενσωμάτωση δεδομένων IoT στην εφαρμογή

Η πιλοτική εφαρμογή υποστηρίζει την ενσωμάτωση δεδομένων IoT με στόχο την απόκτηση πληροφοριών για την κατάσταση των συσκευών, χωρίς την υλοποίηση εξειδικευμένων μηχανισμών ανάλυσης ή πρόβλεψης. Τα δεδομένα IoT λειτουργούν ως πρωτογενείς ενδείξεις λειτουργίας και τροφοδοτούν τις λειτουργίες ανώτερων επιπέδων για εποπτεία και αξιολόγηση κινδύνων. Στο διάγραμμα 5.7 απεικονίζεται η συλλογή δεδομένων από αισθητήρες και συσκευές πεδίου, η μετάδοσή τους μέσω πύλης IoT στο backend σύστημα, η επεξεργασία συμβάντων και η διάκριση μεταξύ δεδομένων τηλεμετρίας και ειδοποιήσεων, τα οποία ενσωματώνονται στο DPP για σκοπούς εποπτείας, καταγραφής και υποστήριξης αποφάσεων.



Διάγραμμα 5.7 Διάγραμμα ροής δεδομένων IoT στην πιλοτική εφαρμογή του Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος.

Τα δεδομένα που λαμβάνονται περιλαμβάνουν ενδεικτικά:

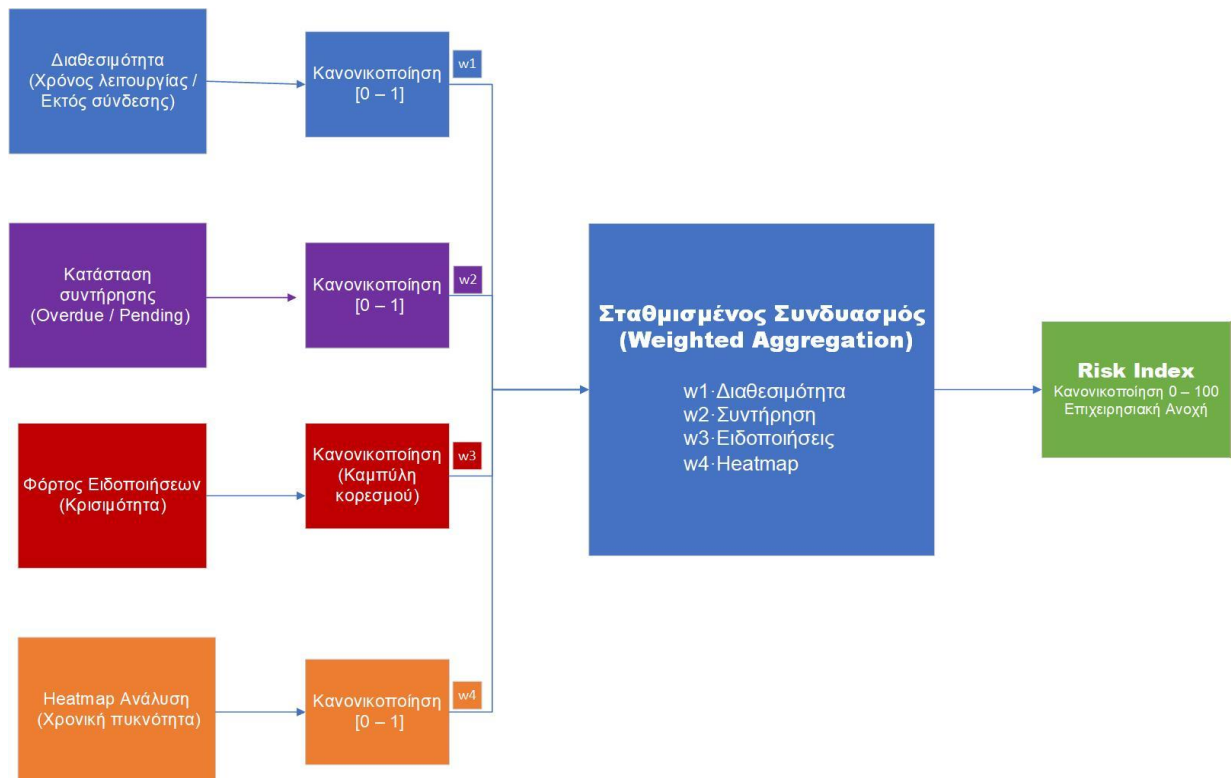
1. Κατάσταση συσκευής (online / offline),
2. Βασικά λειτουργικά σήματα (heartbeat),
3. Απλά μετρικά κατάστασης, όπως θερμοκρασία ή τάση, όπου είναι διαθέσιμα.

Στο επίπεδο του client, τα δεδομένα αυτά δεν προβάλλονται ως συνεχείς χρονοσειρές, αλλά ενσωματώνονται σε μορφή καταστάσεων και συμβάντων. Η αλλαγή κατάστασης συσκευής ή η απώλεια επικοινωνίας οδηγεί στη δημιουργία ειδοποιήσεων, οι οποίες συνδέονται άμεσα με τη συσκευή και αποτυπώνονται στο dashboard και στη λίστα alerts. Παράλληλα, τα δεδομένα IoT συσχετίζονται έμμεσα με τις διαδικασίες συντήρησης, καθώς επαναλαμβανόμενες ή κρίσιμες ειδοποιήσεις μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία ή επιτάχυνση εργασιών συντήρησης. Με τον τρόπο αυτό, τα δεδομένα IoT δεν λειτουργούν αυτόνομα, αλλά

ενσωματώνονται οργανικά στο λειτουργικό κύκλο παρακολούθησης, ειδοποίησης και συντήρησης του DPP.

5.6 Υπολογισμός συνολικής κατάστασης και δεικτών κινδύνου

Πριν την παρουσίαση της λογικής και των επιμέρους παραγόντων, στο διάγραμμα 5.8 αποτυπώνεται εννοιολογικά ο τρόπος υπολογισμού του συνολικού Δείκτη Κινδύνου. Ο δείκτης προκύπτει από τον κανονικοποιημένο και σταθμισμένο συνδυασμό τεσσάρων βασικών παραμέτρων που αποτυπώνουν τη λειτουργική κατάσταση του συστήματος: διαθεσιμότητα συσκευών, κατάσταση συντήρησης, επιχειρησιακό φορτίο ειδοποιήσεων και χρονική συγκέντρωση συμβάντων. Η προσέγγιση είναι βασισμένη σε κανόνες (rule-based) και όχι σε προγνωστικά μοντέλα, διασφαλίζοντας διαφάνεια και ερμηνευσιμότητα του αποτελέσματος.



Διάγραμμα 5.8: Εννοιολογικό διάγραμμα υπολογισμού του συνολικού Δείκτη Κινδύνου (Risk Index).

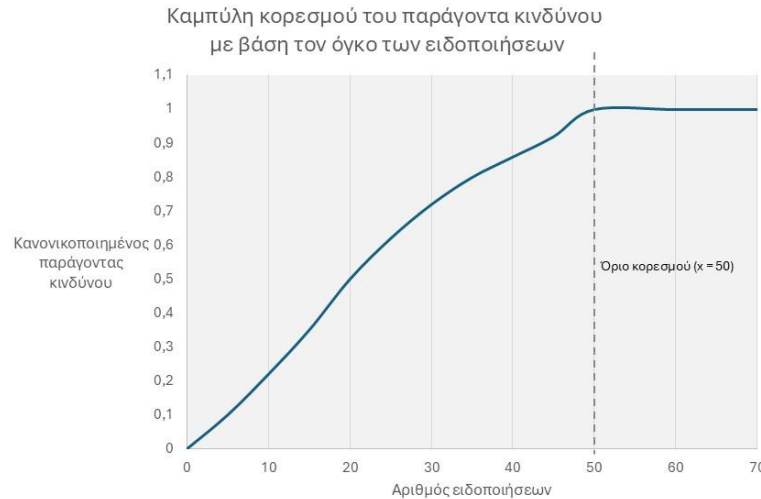
Η συνολική κατάσταση του συστήματος και οι δείκτες κινδύνου που απεικονίζονται στο dashboard προκύπτουν από τον συνδυασμό και την αξιολόγηση τρέχοντων και ιστορικών λειτουργικών δεδομένων του συνόλου των συσκευών, με χρήση προκαθορισμένων κανόνων και μαθηματικών κανονικοποιήσεων. Η προσέγγιση που υιοθετήθηκε είναι βασισμένη σε κανόνες (rule-based) και δεν περιλαμβάνει μηχανισμούς πρόβλεψης, εκμάθησης ή εκτίμησης μελλοντικής συμπεριφοράς του εξοπλισμού. Ο κύριος στόχος αυτής της προσέγγισης είναι η διαφανή και ερμηνεύσιμη αποτίμηση της τρέχουσας έκθεσης του συστήματος.

Αρχικά, υπολογίζεται η συνολική υγεία των συσκευών (Fleet Health), η οποία βασίζεται στον συνολικό αριθμό συσκευών, στον αριθμό online και offline συσκευών και στον μέσο δείκτη διαθεσιμότητας (uptime) ανά συσκευή. Ο δείκτης fleet uptime εκφράζεται ως μέσος όρος των επιμέρους ποσοστών διαθεσιμότητας και αποτυπώνει τη γενική αξιοπιστία του συστήματος (υποδομή) σε δεδομένη χρονική στιγμή. Παράλληλα, ο offline ratio (αναλογία offline συσκευών) λειτουργεί ως κρίσιμος δείκτης, καθώς ακόμη και μικρός αριθμός μη διαθέσιμων συσκευών μπορεί να δημιουργήσει επιχειρησιακά «τυφλά σημεία», ιδιαίτερα σε συστήματα ασφάλειας ή υποδομών ζωτικής σημασίας.

Στη συνέχεια, ενσωματώνεται ο επιχειρησιακός φόρτος από ειδοποιήσεις (alerts weighting). Οι ειδοποιήσεις δεν αντιμετωπίζονται ισοβαρώς, αλλά σταθμίζονται με βάση τη σοβαρότητά τους (severity), ώστε κρίσιμα συμβάντα να επηρεάζουν δυσανάλογα περισσότερο τον συνολικό δείκτη κινδύνου σε σχέση με απλές ενημερώσεις ή χαμηλής σημασίας alerts. Με τον τρόπο αυτό, ο δείκτης δεν αντανακλά απλώς τον όγκο των ειδοποιήσεων, αλλά τη λειτουργική ένταση και την επιχειρησιακή επιβάρυνση του συστήματος.

Ιδιαίτερη σημασία δίνεται στη χρονική κατανομή των συμβάντων μέσω heatmap-based risk. Η θερμική απεικόνιση βλαβών και ειδοποιήσεων αξιοποιείται όχι μόνο ως οπτικό εργαλείο, αλλά και ως ποσοτικός παράγοντας κινδύνου. Λαμβάνονται υπόψη το συνολικό φορτίο συμβάντων, η μέγιστη ένταση σε μεμονωμένες χρονικές ζώνες και ο βαθμός χρονικής συγκέντρωσης. Έτσι, ο κίνδυνος αυξάνεται όχι μόνο όταν υπάρχουν πολλά συμβάντα, αλλά κυρίως όταν αυτά εμφανίζονται συμπυκνωμένα σε συγκεκριμένες ώρες ή ημέρες, υποδηλώνοντας συστημική πίεση. Για την αποφυγή υπερεκτίμησης του κινδύνου σε περιπτώσεις πολύ μεγάλου αριθμού ειδοποιήσεων, εφαρμόζεται καμπύλη κορεσμού στον παράγοντα alerts, όπως απεικονίζεται στο

εικόνα 5.5. Η καμπύλη κορεσμού του παράγοντα ειδοποιήσεων που απεικονίζεται αποτελεί απλό μαθηματικό μετασχηματισμό κανονικοποίησης και όχι μηχανισμό εκμάθησης και αντιστοιχεί στη μαθηματική διατύπωση που παρουσιάστηκε στο Κεφάλαιο 3.



Εικόνα 5.5 Καμπύλη Κορεσμού

Η καμπύλη αυτή μετατρέπει τον απόλυτο αριθμό ειδοποιήσεων σε κανονικοποιημένο δείκτη $[0-1]$, με σταδιακή αύξηση και σαφές όριο κορεσμού. Πέρα από ένα καθορισμένο σημείο, η περαιτέρω αύξηση των ειδοποιήσεων δεν οδηγεί σε γραμμική αύξηση του κινδύνου, αντανακλώντας την έννοια της επιχειρησιακής ανοχής και αποτρέποντας τη στρέβλωση του συνολικού δείκτη.

Ο τελικός Δείκτης Κινδύνου (Risk Index) προκύπτει ως κανονικοποιημένο και σταθμισμένο άθροισμα των παραπάνω συνιστωσών (διαθεσιμότητα, συντηρησιμότητα, alerts και heatmap) και αποτυπώνει τη συγκεντρωτική επιχειρησιακή επιβάρυνση του συστήματος σε μια δεδομένη χρονική στιγμή. Στο dashboard απεικονίζεται και σαν ποσοστό και σαν οπτικός δείκτης κατάστασης. Η μεθοδολογία λειτουργεί ως μηχανισμός έγκαιρης προειδοποίησης και υποστήριξης αποφάσεων, χωρίς να εισάγει ισχυρισμούς τεχνητής νοημοσύνης ή πρόβλεψης μελλοντικών αστοχιών.

Για λόγους σαφήνειας, επισημαίνεται ότι στο πλαίσιο της παρούσας πιλοτικής εφαρμογής δεν υλοποιούνται τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης, μηχανικής μάθησης ή προγνωστικής συντήρησης, και ο Δείκτης Κινδύνου λειτουργεί αποκλειστικά ως εργαλείο περιγραφικής και λειτουργικής αξιολόγησης της τρέχουσας κατάστασης του συστήματος.

5.7 Συνοπτική αξιολόγηση λειτουργικότητας εφαρμογής

Η πιλοτική εφαρμογή που υλοποιήθηκε στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας αποδεικνύει στην πράξη τη δυνατότητα εφαρμογής της φιλοσοφίας του DPP σε κτιριακές υποδομές και συστήματα αποτελούμε από ετερογενείς συσκευές, συνδυάζοντας δεδομένα κατάστασης συσκευών, συντήρησης και λειτουργικών συμβάντων σε ένα ενιαίο πληροφοριακό περιβάλλον. Η εφαρμογή λειτουργεί ως κεντρικός μηχανισμός εποπτείας, επιτρέποντας την άμεση αποτύπωση της επιχειρησιακής κατάστασης και τη συσχέτιση ετερογενών δεδομένων σε επίπεδο συσκευής και κτιρίου.

Η υποστήριξη του DPP επιτυγχάνεται μέσω της αποθήκευσης και προβολής μεταδεδομένων κύκλου ζωής, όπως κατάσταση λειτουργίας, ιστορικό συντηρήσεων, ειδοποιήσεις και δείκτες απόδοσης. Ο client λειτουργεί ως διεπαφή λήψης αποφάσεων, ενώ το backend αναλαμβάνει την ενοποίηση και κανονικοποίηση των δεδομένων, επιτρέποντας την εξαγωγή δεικτών υγείας του συστήματος (στόλου, fleet health) και λειτουργικού κινδύνου χωρίς εξειδικευμένα αναλυτικά ή προγνωστικά μοντέλα. Με τον τρόπο αυτό, το σύστημα παραμένει διαφανές, επεκτάσιμο και συμβατό με κανονιστικά πλαίσια διαχείρισης κινδύνου.

Η αρχιτεκτονική της εφαρμογής επιτρέπει μελλοντικές επεκτάσεις, όπως την ενσωμάτωση πρόσθετων πηγών IoT δεδομένων, τη λεπτομερέστερη ανάλυση τάσεων συντήρησης, την υποστήριξη πολλαπλών κτιρίων και οργανωτικών μονάδων, καθώς και τη διασύνδεση με εξωτερικά συστήματα BIM, ERP ή CMMS. Παράλληλα, η χρήση κανονικοποιημένων δεικτών και σαφώς ορισμένων καταστάσεων (states) διευκολύνει την προσθήκη νέων KPIs χωρίς ανασχεδιασμό της βασικής λογικής.

Ωστόσο, η πιλοτική υλοποίηση παρουσιάζει και περιορισμούς. Η ανάλυση βασίζεται σε δείκτες που διαμορφώνονται από κανόνες και εμπειρικές παραμέτρους, χωρίς αξιοποίηση ιστορικών δεδομένων μεγάλης κλίμακας ή προγνωστικών αλγορίθμων. Επιπλέον, η ενσωμάτωση IoT δεδομένων περιορίζεται σε βασικά γεγονότα κατάστασης και ειδοποιήσεων, ενώ δεν εξετάζονται σενάρια πραγματικού χρόνου υψηλού ρυθμού δεδομένων. Οι περιορισμοί αυτοί είναι αποδεκτοί στο πλαίσιο πιλοτικής εφαρμογής και δεν αναιρούν τη λειτουργική και μεθοδολογική εγκυρότητα της προσέγγισης.

Συνολικά, το κεφάλαιο 5 παρουσίασε την πλήρη υλοποίηση και αξιολόγηση της πιλοτικής εφαρμογής σχετικά με το Digital Product Passport, αναδεικνύοντας τον τρόπο με τον οποίο ετερογενή δεδομένα συσκευών, συντήρησης, IoT και ειδοποιήσεων ενοποιούνται σε ένα σύστημα υποστήριξης αποφάσεων. Η ανάλυση αυτή αποτελεί τη βάση για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη σκοπιμότητα, την αποτελεσματικότητα και τα όρια της προτεινόμενης προσέγγισης. Στο επόμενο κεφάλαιο, τα ευρήματα της πιλοτικής υλοποίησης αξιοποιούνται για τη διατύπωση συνολικών συμπερασμάτων, προτάσεων βελτίωσης και κατευθύνσεων μελλοντικής επιχειρησιακής και τεχνολογικής αξιοποίησης.

6. Αξιολόγηση και Μελλοντικές Προοπτικές

6.1 Οφέλη από την Υιοθέτηση του DPP

6.1.1 Αύξηση της Λειτουργικής Αποδοτικότητας

Αξιολογώντας τα οφέλη στη λειτουργική αποδοτικότητα που επιτυγχάνονται με την υιοθέτηση ενός Digital Product Passport (DPP) σε εγκαταστάσεις των Ενόπλων Δυνάμεων της Ελλάδας, παρατηρείται ότι τέτοια συστήματα μετασχηματίζουν τη συντήρηση και τη διαχείριση υποδομών από στατικές, αποσπασματικές και έντονα γραφειοκρατικές διαδικασίες σε προσεγγίσεις οι οποίες είναι ενοποιημένες, δυναμικές και βασισμένες σε δεδομένα. Η αύξηση της αποδοτικότητας προκύπτει πρωτίστως από τη συγκέντρωση και ενοποίηση πληροφοριών σχετικά με τον κύκλο ζωής των περιουσιακών στοιχείων, συνδυάζοντας στατικά δεδομένα που τεκμηριώνονται κατά τη

φάση απογραφής και χαρτογράφησης (Çetin et al., 2023) με συνεχώς ενημερωμένες λειτουργικές παραμέτρους που συλλέγονται μέσω δικτύων αισθητήρων και συστημάτων IoT (Voulgaridis et al., 2024). Η ενοποίηση αυτή εξαλείφει τις καθυστερήσεις που είναι εγγενείς στη χειροκίνητη διασταύρωση πληροφοριών μεταξύ έντυπων αρχείων, παλαιών ψηφιακών αποθετηρίων και κατακερματισμένων συστημάτων διαφορετικών οργανωτικών μονάδων, μειώνοντας σημαντικά τον χρόνο από τον εντοπισμό ενός συμβάντος έως τη λήψη διορθωτικών ενεργειών. Παράλληλα, η αυτοματοποίηση που υποστηρίζεται από το πλαίσιο του DPP περιορίζει τον διοικητικό φόρτο, επιτρέποντας την τυποποιημένη δημιουργία ενεργειών συντήρησης βάσει καθορισμένων κανόνων λειτουργίας και χρονικών διαστημάτων (Kühn et al., 2025).

Σε ένα γενικότερο πλαίσιο, τα σύγχρονα συστήματα DPP μπορούν να λειτουργήσουν ως σταθερή βάση για προηγμένες μεθόδους ανάλυσης κατάστασης και αξιολόγησης κινδύνου, συνδυάζοντας κανόνες ασφάλειας με στατιστική επεξεργασία ιστορικών δεδομένων εξοπλισμού. Αν και η πιλοτική εφαρμογή της παρούσας εργασίας περιορίζεται σε δείκτες που βασίζονται σε κανόνες και κανονικοποιημένες μετρήσεις σχετικά με τη λειτουργική κατάσταση, η αρχιτεκτονική της έχει σχεδιαστεί με τρόπο που επιτρέπει τη μελλοντική ενσωμάτωση πιο σύνθετων αναλυτικών ή υποστηρικτικών μηχανισμών. Η ενσωμάτωση επιτυγχάνεται χωρίς την ανάγκη ανασχεδιασμού της βασικής δομής του συστήματος.

Η διασύνδεση των μηχανισμών λήψης αποφάσεων του DPP με συστήματα προμηθειών και διαχείρισης πόρων (ERP) δύναται να ενισχύσει περαιτέρω τη λειτουργική αποδοτικότητα, επιτρέποντας την έναρξη διαδικασιών παραγγελίας ανταλλακτικών παράλληλα με τον προγραμματισμό εργασιών συντήρησης (Langley et al., 2023). Με τον τρόπο αυτό μειώνονται οι καθυστερήσεις που συνήθως προκύπτουν από τη διαδοχική εκτέλεση των διαδικασιών συντήρησης και εφοδιασμού, ενώ διασφαλίζεται καλύτερη ευθυγράμμιση της εφοδιαστικής αλυσίδας με τις πραγματικές επιχειρησιακές ανάγκες. Επιπλέον, όταν τα αναγνωριστικά εξαρτημάτων και συσκευών είναι συνεπή μεταξύ των μεταδεδομένων των αντικειμένων BIM και των ταξινομήσεων αποθεμάτων των συστημάτων ERP, καθίσταται δυνατή η αυτοματοποίηση ελέγχων συμβατότητας και διαθεσιμότητας, χωρίς την ανάγκη χειροκίνητων παρεμβάσεων από τεχνικό προσωπικό (Alsofiani, 2024).

Η χωρική διάσταση που εισάγεται μέσω της συσχέτισης του DPP με δεδομένα BIM συμβάλλει επίσης στην επιχειρησιακή αποδοτικότητα, καθώς επιτρέπει τον ακριβή προγραμματισμό

παρεμβάσεων πριν από τη μετάβαση των συνεργειών στον χώρο εγκατάστασης (Cetin et al., 2023). Η δυνατότητα αυτή είναι ιδιαίτερα κρίσιμη σε μεγάλες στρατιωτικές εγκαταστάσεις, όπου η βελτιστοποίηση των διαδρομών μετακίνησης, η ομαδοποίηση εργασιών στον ίδιο γεωγραφικά χώρο και η συμμόρφωση με πρωτόκολλα περιορισμένης πρόσβασης αποτελούν βασικές επιχειρησιακές απαιτήσεις. Παράλληλα, η ενσωμάτωση δεδομένων περιβαλλοντικής έκθεσης στον προγραμματισμό συντήρησης επιτρέπει την προσαρμογή των κύκλων παρέμβασης στις πραγματικές συνθήκες φθοράς που επικρατούν τοπικά ενισχύοντας περαιτέρω την αποδοτικότητα και τη βιωσιμότητα των παρεμβάσεων. Για παράδειγμα, σε παράκτιες εγκαταστάσεις, η συντήρηση του εξοπλισμού μπορεί να ενεργοποιείται βάσει μετρήσεων περιβαλλοντικής έκθεσης, όπως η συγκέντρωση αλατιού πάνω από προκαθορισμένα όρια για συγκεκριμένο χρονικό διάστημα, αντί να ακολουθούνται αυστηρά σταθερά εποχιακά προγράμματα. Η προσέγγιση αυτή αποτρέπει τόσο την πρόωγη εκτέλεση εργασιών όσο και την καθυστερημένη επέμβαση σε προχωρημένο στάδιο διάβρωσης, συμβάλλοντας στην παράταση της ωφέλιμης ζωής του εξοπλισμού και στη μείωση των περιττών δαπανών συντήρησης. Ιδιαίτερα σε εγκαταστάσεις όπου συνυπάρχουν εργολάβοι, προμηθευτές και εποπτικές αρχές, ένα σύνηθες φαινόμενο σε στρατιωτικές υποδομές, αναδεικνύονται σημαντικά οφέλη από την αξιοποίηση του DPP. Η εφαρμογή ελέγχου πρόσβασης σε επίπεδο χαρακτηριστικών του διαβατηρίου διασφαλίζει ότι κάθε φορέας έχει ορατότητα μόνο στα δεδομένα που σχετίζονται με τον ρόλο του, περιορίζοντας τον χρόνο που απαιτείται για διευκρινίσεις, εκ νέου επεξεργασία ή χειροκίνητο φιλτράρισμα εγγράφων πριν από την κοινή χρήση (Westerlund, 2023).

Στο πλαίσιο των εργασιών ανάκτησης υλικών και εξοπλισμού στο τέλος του κύκλου ζωής, οι φορείς ανακύκλωσης δύνανται να λαμβάνουν μεταδεδομένα σύνθεσης και οδηγίες αποσυναρμολόγησης μέσω ελεγχόμενων καναλιών πρόσβασης (Koppelaar et al., 2023), επιτρέποντας την έγκαιρη λήψη αποφάσεων χωρίς να απαιτείται η ολοκλήρωση όλων των εργασιών επί τόπου. Η συγκέντρωση ιστορικών και λειτουργικών δεδομένων σε ένα ενιαίο πλαίσιο DPP δημιουργεί τις προϋποθέσεις για προηγμένες πρακτικές αξιολόγησης κατάστασης και μείωσης του μη προγραμματισμένου χρόνου διακοπής λειτουργίας. Η συστηματική παρακολούθηση επαναλαμβανόμενων καταστάσεων και συμβάντων σε συγκεντρωτικά δεδομένα αισθητήρων μπορεί να συμβάλει στον έγκαιρο εντοπισμό αυξημένου λειτουργικού κινδύνου (Voulgaridis et al., 2024), επιτρέποντας τον προγραμματισμό παρεμβάσεων σε χρονικά παράθυρα όπου το κόστος μη λειτουργίας του συστήματος είναι χαμηλό.

Η ανατροφοδότηση των αποτελεσμάτων από τις παρεμβάσεις συντήρησης σε ιστορικά αρχεία επιθεώρησης βελτιώνει σταδιακά την ποιότητα των ορίων και των κανόνων αξιολόγησης μέσω ανθρώπινης παρέμβασης και εμπειρικής αναπροσαρμογής των παραμέτρων, περιορίζοντας τις περιπτώσεις ψευδών ενδείξεων που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε άσκοπη κατανάλωση πόρων (Kühn et al., 2025). Παράλληλα, η ύπαρξη αξιόπιστων και χρονοσημασμένων καταγραφών συμβάντων απλοποιεί τις διαδικασίες συμμόρφωσης, καθώς η κανονιστική αναφορά μπορεί να αντλείται απευθείας από δομημένες καταχωρήσεις διαβατηρίων, αντί να συγκεντρώνεται αναδρομικά από πολλαπλές πηγές (Abedi et al., 2024).

Συνοψίζοντας, τα οφέλη της επιχειρησιακής αποδοτικότητας που προκύπτουν από την υιοθέτηση ενός DPP δεν περιορίζονται σε οριακές εξοικονομήσεις χρόνου ή κόστους. Αντιθέτως, συνιστούν ποιοτική μεταβολή στον τρόπο διαχείρισης των υποδομών: η λήψη αποφάσεων γίνεται περισσότερο προληπτική και τεκμηριωμένη, η κατανομή εργασίας εστιάζει σε στοχευμένες παρεμβάσεις βάσει αξιόπιστων δεδομένων, η συμμόρφωση ενσωματώνεται οργανικά στις ροές εργασίας και η εφοδιαστική υποστήριξη συγχρονίζεται στενότερα με τα πραγματικά τεχνικά ερεθίσματα. Στο πλαίσιο των Ενόπλων Δυνάμεων της Ελλάδας, η αρχιτεκτονική DPP αναδεικνύεται ως μηχανισμός ενοποίησης σχεδιασμού, λειτουργίας, συντήρησης και εποπτείας, ενισχύοντας την επιχειρησιακή ετοιμότητα και την αποδοτική αξιοποίηση των διαθέσιμων πόρων.

6.1.2 Βελτιωμένη Διαφάνεια και Ιχνηλασιμότητα

Η ενίσχυση της διαφάνειας και της ιχνηλασιμότητας αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα οφέλη που προκύπτουν από την εφαρμογή ενός Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος (DPP). Μέσω του DPP, πληροφορίες που παραδοσιακά τηρούνται σε αποσπασματικά αρχεία, διαφορετικά πληροφοριακά συστήματα ή ακόμη και σε έντυπη μορφή, συγκεντρώνονται σε ένα ενιαίο και δομημένο πλαίσιο δεδομένων. Το πλαίσιο αυτό αποτυπώνει με συνέπεια τον πλήρη κύκλο ζωής κάθε περιουσιακού στοιχείου, από την προμήθεια έως τη λειτουργία, τη συντήρηση και την τελική απόσυρση.

Στο περιβάλλον των στρατιωτικών υποδομών, η διαφάνεια αποκτά ιδιαίτερη βαρύτητα, καθώς η αξιόπιστη γνώση της σύστασης, της κατάστασης και του ιστορικού του εξοπλισμού συνδέεται

άμεσα με την επιχειρησιακή ασφάλεια, τη συμμόρφωση με κανονιστικά πλαίσια και την αποτελεσματική αξιοποίηση των πόρων. Η διαφάνεια δεν περιορίζεται στις απαιτήσεις πολιτικών κανονισμών, όπως ο Κανονισμός ESPR, που εστιάζουν στη σύνθεση υλικών, τους δείκτες ανακυκλωσιμότητας και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Westerlund, 2023). Σε αμυντικά περιβάλλοντα, επεκτείνεται στη σαφή γνώση του ποια υλικά και συστήματα βρίσκονται σε χρήση, πού είναι εγκατεστημένα και ποιες παρεμβάσεις έχουν πραγματοποιηθεί σε αυτά. Η ενοποίηση μοναδικών στοιχείων ταυτότητας για κάθε περιουσιακό στοιχείο αποτελεί το θεμέλιο αυτής της λειτουργικότητας. Μέσω ετικετών αναγνώρισης, όπως QR ή NFC, οι οποίες συνδέονται άμεσα με τις εγγραφές του DPP (Hulea et al., 2024), οι τεχνικοί και οι εξουσιοδοτημένοι χρήστες αποκτούν άμεση πρόσβαση σε επικαιροποιημένα δεδομένα, χρησιμοποιώντας ασφαλείς διεπαφές εντός ελεγχόμενων δικτύων. Με τον τρόπο αυτό περιορίζεται η εξάρτηση από άτυπες πρακτικές μεταφοράς γνώσης ή από απομονωμένα αρχεία διαφορετικών οργανωτικών τμημάτων, οι οποίες συχνά οδηγούν σε ασυνέπειες ή απώλεια πληροφορίας με την πάροδο του χρόνου.

Η ιχνηλασιμότητα ενισχύεται περαιτέρω μέσω της συστηματικής καταγραφής όλων των μεταβολών που υφίσταται ένα περιουσιακό στοιχείο κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του. Στοιχεία που αφορούν την προέλευση κατασκευής, όπως κωδικοί προμηθευτών, αριθμοί παρτίδων και χώρα παραγωγής, καταχωρίζονται κατά το στάδιο της προμήθειας και παραμένουν συνδεδεμένα με το στοιχείο σε όλα τα επόμενα στάδια (Langley et al., 2023). Οι πληροφορίες αυτές συνοδεύουν την εγκατάσταση στον χώρο, τη γεωγραφική σήμανση μέσω συστημάτων GIS ή GNSS (Wagner, 2025), τη φάση της επιχειρησιακής χρήσης και τελικά την απόσυρση ή ανακύκλωση. Η διασύνδεση του DPP με συστήματα ERP συμβάλλει ουσιαστικά στη διατήρηση της συνέχειας των δεδομένων. Μετακινήσεις εξοπλισμού μεταξύ εγκαταστάσεων ή αλλαγές αποθεμάτων καταγράφονται αυτόματα, μειώνοντας τα κενά πληροφόρησης που συχνά προκύπτουν από χειροκίνητες διαδικασίες. Για αναπτυσσόμενα ή κρίσιμα συστήματα, όπως εξοπλισμός επικοινωνιών, το επίπεδο αυτό ιχνηλασιμότητας επιτρέπει στους υπευθύνους σχεδιασμού να αξιολογούν την επιχειρησιακή ετοιμότητα χωρίς την ανάγκη άμεσης φυσικής επιθεώρησης. Παράλληλα, η ύπαρξη χρονοσημασμένων και αξιόπιστων καταγραφών διευκολύνει τις διαδικασίες ελέγχου και διερεύνησης μετά από περιστατικά, καθώς και την τεκμηρίωση της συμμόρφωσης στο πλαίσιο της διοικητικής εποπτείας των αμυντικών δαπανών (Χανιάς, 2020). Σε αρχιτεκτονικές που υποστηρίζουν μηχανισμούς αμετάβλητης καταγραφής συμβάντων, η

αυθεντικότητα των εγγραφών μπορεί να ενισχυθεί περαιτέρω, χωρίς ωστόσο να αποτελεί προϋπόθεση για τη βασική λειτουργία του DPP (Abedi et al., 2024).

Η διαφάνεια σε επίπεδο υλικών αποτελεί επίσης κρίσιμο παράγοντα για την εφαρμογή αρχών κυκλικής οικονομίας στις στρατιωτικές υποδομές. Η διαθεσιμότητα αξιόπιστων μεταδεδομένων σύνθεσης και οδηγιών αποσυναρμολόγησης διευκολύνει την υψηλής ποιότητας ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση εξοπλισμού στο τέλος του κύκλου ζωής του (Korpelaar et al., 2023). Τα δεδομένα αυτά επιτρέπουν την επαλήθευση της καταλληλότητας των υλικών πριν την επεξεργασία τους και υποστηρίζουν τη βελτίωση μελλοντικών σχεδιαστικών επιλογών με βάση πραγματικά αποτελέσματα ανάκτησης. Ιδιαίτερη σημασία αποκτά η προστασία ευαίσθητων πληροφοριών, ειδικά σε περιπτώσεις κρίσιμων πρώτων υλών (CRM). Μέσω μηχανισμών ελέγχου πρόσβασης βάσει ρόλων, διασφαλίζεται ότι οι τεχνικές λεπτομέρειες της σύνθεσης παραμένουν προσβάσιμες μόνο σε εξουσιοδοτημένους χρήστες, χωρίς να υπονομεύεται η συνολική ιχνηλασιμότητα (Westerlund, 2023). Παρά τη διαφοροποίηση στην προβολή των δεδομένων, όλες οι πληροφορίες αντλούνται από το ίδιο ενιαίο και ενημερωμένο σύνολο, αποφεύγοντας τη διπλή αποθήκευση και τις αποκλίσεις εκδόσεων.

Συνολικά, οι μηχανισμοί διαφάνειας και ιχνηλασιμότητας που ενσωματώνονται στο DPP συγκλίνουν σε ένα συνεκτικό μοντέλο διαχείρισης του κύκλου ζωής των υποδομών. Η διασύνδεση με συστήματα ERP (Langley et al., 2023), οι ενημερώσεις BIM (Alsofiani, 2024), τα δυναμικά δεδομένα αισθητήρων (Voulgaridis et al., 2024) και οι δηλώσεις Critical Raw Materials της εφοδιαστικής αλυσίδας (Korpelaar et al., 2023) δημιουργούν ένα περιβάλλον όπου η λήψη αποφάσεων βασίζεται σε διαφανείς, ανιχνεύσιμες και τεκμηριωμένες ροές πληροφορίας. Η συνοχή αυτή μειώνει τις ασάφειες ως προς την ευθύνη, επιταχύνει τη διερεύνηση και επίλυση συμβάντων και ενισχύει την εμπιστοσύνη τόσο εντός του οργανισμού όσο και έναντι των εποπτικών φορέων, σε υποδομές με ιδιαίτερα μεγάλο χρονικό ορίζοντα ζωής.

6.2 Προτάσεις για Μελλοντική Επέκταση

6.2.1 Τεχνητή Νοημοσύνη και Προγνωστική Συντήρηση

Η αρχιτεκτονική του DPP, όπως παρουσιάστηκε στην παρούσα εργασία, έχει σχεδιαστεί με γνώμονα την επεκτασιμότητα και τη μελλοντική ενσωμάτωση προηγμένων μηχανισμών ανάλυσης. Αν και η πιλοτική εφαρμογή επικεντρώνεται σε κανόνες λειτουργίας, κανονικοποιημένους δείκτες και ιστορικά δεδομένα για την υποστήριξη της λήψης αποφάσεων, το ενιαίο και δομημένο σύνολο δεδομένων που συγκεντρώνεται μέσω του DPP δημιουργεί τις προϋποθέσεις για την αξιοποίηση τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης και προγνωστικής συντήρησης (predictive maintenance) σε μελλοντικό στάδιο. Η προγνωστική συντήρηση βασίζεται στη συσχέτιση ιστορικών δεδομένων λειτουργίας, συμβάντων συντήρησης και περιβαλλοντικών παραμέτρων με την εμφάνιση αστοχιών ή υποβάθμισης της απόδοσης. Στο πλαίσιο ενός DPP, τα δεδομένα αυτά δεν συλλέγονται αποσπασματικά, αλλά εντάσσονται σε συνεκτικό μοντέλο κύκλου ζωής, όπου κάθε μέτρηση, ειδοποίηση ή παρέμβαση συνδέεται με συγκεκριμένο περιουσιακό στοιχείο, χωρική θέση και χρονικό πλαίσιο. Η ιδιότητα αυτή καθιστά το DPP κατάλληλο υπόβαθρο για την εκπαίδευση μοντέλων μηχανικής μάθησης, μειώνοντας την ανάγκη εκτεταμένης ενοποίησης δεδομένων από ετερογενείς πηγές..

Σε ένα μελλοντικό σενάριο επέκτασης, αλγόριθμοι επιβλεπόμενης ή μη επιβλεπόμενης μάθησης θα μπορούσαν να αξιοποιηθούν για την ανίχνευση ανωμαλιών (anomaly detection) σε χρονοσειρές αισθητήρων, την εκτίμηση υπολειπόμενου χρόνου ζωής (Remaining Useful Life – RUL) κρίσιμων υποσυστημάτων ή την πρόβλεψη αυξημένης πιθανότητας αστοχίας βάσει επαναλαμβανόμενων μοτίβων λειτουργικής επιβάρυνσης. Τα αποτελέσματα αυτών των μοντέλων δεν θα αντικαθιστούσαν τους υφιστάμενους κανόνες συντήρησης, αλλά θα λειτουργούσαν συμπληρωματικά, ενισχύοντας την ακρίβεια και τη χρονική στόχευση των παρεμβάσεων. Ιδιαίτερη σημασία αποκτά το γεγονός ότι, σε αμυντικά περιβάλλοντα, η υιοθέτηση τεχνητής νοημοσύνης πρέπει να γίνεται με ελεγχόμενο και διαφανή τρόπο. Η ενσωμάτωση προγνωστικών μηχανισμών στο πλαίσιο του DPP επιτρέπει την ιχνηλασιμότητα των δεδομένων εισόδου και των αποτελεσμάτων, καθώς κάθε πρόβλεψη μπορεί να συνδέεται με συγκεκριμένα ιστορικά στοιχεία και μετρήσεις. Με τον τρόπο αυτό περιορίζεται ο κίνδυνος λήψης αποφάσεων βάσει «αδιαφανών»

μοντέλων, ενώ διατηρείται η δυνατότητα επαλήθευσης και τεκμηρίωσης των εκτιμήσεων κινδύνου ή φθοράς. Επιπλέον, η σταδιακή ενσωμάτωση τεχνικών τεχνητής νοημοσύνης θα μπορούσε να υποστηρίξει τη βελτιστοποίηση των ορίων και των κανόνων που χρησιμοποιούνται στα υφιστάμενα σχήματα αξιολόγησης, όπως ο λειτουργικός δείκτης κινδύνου. Αντί τα όρια αυτά να παραμένουν στατικά, θα μπορούσαν να αναπροσαρμόζονται δυναμικά βάσει της συσσωρευμένης εμπειρίας λειτουργίας και συντήρησης, μειώνοντας τις περιπτώσεις ψευδών συναγερμών ή καθυστερημένης επέμβασης.

Τέλος, η αξιοποίηση προγνωστικής συντήρησης σε συνδυασμό με τη διασύνδεση του DPP με συστήματα ERP δύναται να ενισχύσει περαιτέρω τον επιχειρησιακό σχεδιασμό, επιτρέποντας την έγκαιρη πρόβλεψη αναγκών σε ανταλλακτικά, τη βελτιστοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας και τη μείωση του μη προγραμματισμένου χρόνου εκτός λειτουργίας κρίσιμων υποδομών. Η προσέγγιση αυτή ευθυγραμμίζεται με τη φιλοσοφία της παρούσας εργασίας, σύμφωνα με την οποία το DPP λειτουργεί ως ενοποιημένο ψηφιακό θεμέλιο, πάνω στο οποίο μπορούν να οικοδομηθούν σταδιακά πιο σύνθετες και ευφυείς λειτουργίες, χωρίς να διακυβεύεται η ασφάλεια, η διαφάνεια και η ελεγχόμενη διαχείριση των δεδομένων.

6.2.2 Χρήση Τεχνολογιών Blockchain για Ενίσχυση Ακεραιότητας και Διαλειτουργικότητας

Παρότι η πιλοτική εφαρμογή του DPP της παρούσας εργασίας επιτυγχάνει την απαιτούμενη ακεραιότητα και ιχνηλασιμότητα μέσω ελεγχόμενων μηχανισμών καταγραφής, χρονικής σήμανσης και ελέγχου πρόσβασης, η αξιοποίηση τεχνολογιών κατανεμημένου καθολικού (blockchain) θα μπορούσε να εξεταστεί ως μελλοντική επέκταση για ειδικά σενάρια αυξημένων απαιτήσεων διαλειτουργικότητας και εμπιστοσύνης μεταξύ ανεξάρτητων φορέων.

Η βασική συνεισφορά του blockchain στο πλαίσιο ενός DPP δεν έγκειται στην αντικατάσταση των υφιστάμενων μηχανισμών αποθήκευσης ή λειτουργίας, αλλά στη δυνατότητα παροχής πρόσθετης εγγύησης ακεραιότητας για επιλεγμένα σύνολα δεδομένων. Ειδικότερα, κρίσιμα μεταδεδομένα, όπως συνοπτικά αποτυπώματα καταγραφών συντήρησης, πιστοποιήσεις συμμόρφωσης ή χρονικά σημεία αλλαγής κατάστασης περιουσιακών στοιχείων, θα μπορούσαν να αγκιστρώνονται (anchoring) σε ένα blockchain. Με τον τρόπο αυτό καθίσταται δυνατή η

ανεξάρτητη επαλήθευση της μη αλλοίωσης των εγγραφών, χωρίς την ανάγκη αποθήκευσης πλήρους ή ευαίσθητου περιεχομένου εκτός των ελεγχόμενων πληροφοριακών συστημάτων. Σε αμυντικά περιβάλλοντα, όπου η πλήρης αποκέντρωση δεδομένων δεν είναι επιθυμητή, η χρήση permissioned blockchain ή ιδιωτικών blockchain μπορεί να προσφέρει ένα ισορροπημένο μοντέλο μεταξύ ασφάλειας και διαφάνειας. Στο μοντέλο αυτό, μόνο εξουσιοδοτημένοι φορείς (π.χ. κεντρικές υπηρεσίες συντήρησης, εποπτικές αρχές ή πιστοποιημένοι εξωτερικοί συντηρητές) συμμετέχουν στη διαδικασία επικύρωσης, ενώ η πρόσβαση στο περιεχόμενο παραμένει αυστηρά ελεγχόμενη μέσω των μηχανισμών του DPP. Έτσι, το blockchain λειτουργεί επικουρικά ως μηχανισμός απόδειξης ακεραιότητας και όχι ως κύριο αποθετήριο δεδομένων.

Η ενσωμάτωση τέτοιων τεχνολογιών θα μπορούσε να αποδειχθεί ιδιαίτερα χρήσιμη σε σενάρια διαλειτουργικότητας μεταξύ διαφορετικών οργανισμών ή κρατών, όπως σε κοινές εγκαταστάσεις ή προγράμματα υποστήριξης στο πλαίσιο συμμαχικών δομών. Σε αυτές τις περιπτώσεις, η ύπαρξη ενός κοινού μηχανισμού επαλήθευσης θα μπορούσε να ενισχύσει την εμπιστοσύνη μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών, χωρίς να απαιτείται πλήρης ανταλλαγή ευαίσθητων τεχνικών λεπτομερειών ή επιχειρησιακών δεδομένων. Παράλληλα, θα διευκολυνόταν η τεκμηρίωση της συμμόρφωσης σε κοινά πρότυπα ή συμφωνίες, περιορίζοντας τις χρονοβόρες διαδικασίες ελέγχου. Ωστόσο, η υιοθέτηση blockchain τεχνολογιών συνοδεύεται και από σημαντικές προκλήσεις, όπως η αυξημένη πολυπλοκότητα διαχείρισης, οι απαιτήσεις υπολογιστικών πόρων και η ανάγκη σαφούς καθορισμού των δεδομένων που είναι κατάλληλα για αγκύρωση σε καταναμημένα καθολικά. Για τον λόγο αυτό, η παρούσα εργασία αντιμετωπίζει το blockchain όχι ως αναγκαίο συστατικό του DPP, αλλά ως προαιρετική μελλοντική επιλογή, η οποία μπορεί να ενεργοποιηθεί στοχευμένα, όταν οι επιχειρησιακές και κανονιστικές συνθήκες το απαιτούν.

Συνοψίζοντας, η πιθανή αξιοποίηση blockchain σε μελλοντικές εκδόσεις του DPP ενισχύει τη στρατηγική αντίληψη του διαβατηρίου ως μακροχρόνιας ψηφιακής υποδομής. Το DPP παραμένει το κεντρικό σημείο ενοποίησης και διαχείρισης δεδομένων, ενώ το blockchain μπορεί να λειτουργήσει συμπληρωματικά, προσφέροντας πρόσθετα επίπεδα εμπιστοσύνης, επαληθευσιμότητας και διαλειτουργικότητας, χωρίς να θίγεται η επιχειρησιακή ασφάλεια ή ο έλεγχος των πληροφοριών.

6.2.3 Μελλοντική επέκταση του DPP σε όλους τους κλάδους των Ενόπλων Δυνάμεων

Η παρούσα ενότητα εξετάζει σε θεωρητικό επίπεδο τις προϋποθέσεις μελλοντικής επέκτασης του πλαισίου του DPP σε όλους τους κλάδους των Ενόπλων Δυνάμεων, βασιζόμενη στα συμπεράσματα της πιλοτικής και ενδεικτικής εφαρμογής. Η επέκταση του πλαισίου του DPP ώστε να καλύψει το σύνολο των κλάδων των Ενόπλων Δυνάμεων της Ελλάδας απαιτεί μια προσεκτικά σχεδιασμένη προσέγγιση αρχιτεκτονικής και διακυβέρνησης. Η προσέγγιση αυτή οφείλει να λαμβάνει υπόψη την έντονη ποικιλομορφία των υποδομών και των επιχειρησιακών απαιτήσεων μεταξύ των κλάδων, διατηρώντας ταυτόχρονα μια ενοποιημένη ψηφιακή υποδομή που θα επιτρέπει τη διαλειτουργικότητα και τη συγκεντρωτική εποπτεία.

Όπως προκύπτει από την αξιολόγηση της λειτουργικής αποδοτικότητας στην ενότητα 6.1.1, τα βασικά οφέλη του DPP αναδείχθηκαν μέσω της εννοιολογικής σύζευξης ERP, BIM και IoT. Η διατήρηση αυτών των οφελών σε ευρύτερη κλίμακα εξαρτάται από την ικανότητα ενσωμάτωσης παρόμοιων μηχανισμών ενοποίησης στα ιδιαίτερα επιχειρησιακά πλαίσια κάθε κλάδου, με παράλληλη τυποποίηση ενός κοινού βασικού σχήματος δεδομένων για την ανταλλαγή πληροφοριών. Κρίσιμος παράγοντας στην κλιμάκωση αποτελεί η ετερογένεια των τύπων υποδομών. Οι ναυτικές βάσεις, για παράδειγμα, εκτίθενται σε έντονα φαινόμενα διάβρωσης (Χανιάς, 2020), ενώ οι αεροπορικές εγκαταστάσεις περιλαμβάνουν εκτεταμένους διαδρόμους, συστήματα πλοήγησης και ενισχυμένα καταφύγια αεροσκαφών με αυξημένες απαιτήσεις φορτίου. Αντίστοιχα, τα χερσαία στρατόπεδα φιλοξενούν ποικιλία κτιριακών και μηχανολογικών συστημάτων διαφορετικών ηλικιών και τεχνολογικών γενεών. Για τον λόγο αυτό, τα στατικά πεδία δεδομένων του DPP πρέπει να ακολουθούν αρθρωτή (modular) δομή. Το βασικό σχήμα οφείλει να περιλαμβάνει καθολικά αναγνωριστικά περιουσιακών στοιχείων, κωδικούς κατασκευαστών και ταξινομήσεις υλικών (Westerlund, 2023), ενώ προαιρετικά υπομοντέλα μπορούν να καταγράφουν παραμέτρους ειδικές ανά κλάδο, όπως κύκλους συντήρησης ναυτικών συστημάτων ή δείκτες συμμόρφωσης ICAO για υποδομές αεροδρομίων. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίζεται ένα κοινό μορφότυπο διαβατηρίου χωρίς απώλεια συνάφειας σε εξειδικευμένα περιβάλλοντα.

Παράλληλα, οι διαφοροποιήσεις στις περιβαλλοντικές συνθήκες επιβάλλουν προσαρμοσμένες στρατηγικές διαχείρισης δυναμικών δεδομένων. Οι παράκτιες εγκαταστάσεις μπορούν να δώσουν έμφαση στη συνεχή παρακολούθηση περιβαλλοντολογικών παραμέτρων μέσω αισθητήρων IoT

(Voulgaridis et al., 2024), ενώ ορεινές εγκαταστάσεις ραντάρ απαιτούν μηχανισμούς ανίχνευσης φαινομένων παγετού και κύκλων απόψυξης (Harmon et al., 2014). Το middleware εισαγωγής δεδομένων οφείλει να λαμβάνει υπόψη το επιχειρησιακό πλαίσιο κάθε κλάδου κατά τη χαρτογράφηση των δεδομένων στα αντίστοιχα υπομοντέλα του DPP, αποφεύγοντας την εφαρμογή γενικευμένων ορίων που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε εσφαλμένες εκτιμήσεις.

Η κλιμάκωση σε επίπεδο όλων των κλάδων εντείνει και τις απαιτήσεις ασφάλειας. Οι μηχανισμοί ελέγχου πρόσβασης σε επίπεδο χαρακτηριστικών που εφαρμόστηκαν στο πιλοτικό πρόγραμμα (Langley et al., 2023) πρέπει να εναρμονιστούν σε ενιαία μήτρα εξουσιοδοτήσεων, επιτρέποντας φιλτραρισμένη πρόσβαση ακόμη και σε περιβάλλοντα διακλαδικής ή συμμαχικής συνεργασίας. Η συμμόρφωση με πρότυπα κωδικοποίησης συμβατά με STANAG (Χανιάς, 2020) μπορεί να διευκολύνει την ανταλλαγή επιλεγμένων πληροφοριών, διασφαλίζοντας ταυτόχρονα την απόκρυψη ευαίσθητων επιχειρησιακών στοιχείων.

Σε επίπεδο διακυβέρνησης, η συμμετοχή πολλαπλών κλάδων σε κοινή υποδομή DPP καθιστά αναγκαία τη δημιουργία κεντρικού φορέα συντονισμού. Μια τέτοια αρχή θα μπορούσε να καθορίζει πρότυπα μεταδεδομένων, προδιαγραφές API και κανόνες διαλειτουργικότητας, ενώ η διαχείριση των επεκτάσεων θα ανατίθεται σε επιμέρους διαχειριστές σε επίπεδο μονάδας (Langley et al., 2023). Το μοντέλο αυτό εξασφαλίζει συνοχή και αποτρέπει τον κατακερματισμό των δεδομένων, διατηρώντας παράλληλα την απαραίτητη ευελιξία προσαρμογής σε νέες επιχειρησιακές ανάγκες.

Ιδιαίτερη πρόκληση αποτελεί η διασύνδεση με τα υφιστάμενα συστήματα ERP σε μεγάλη κλίμακα, καθώς οι εφαρμογές εφοδιαστικής του ναυτικού διαφέρουν ουσιαστικά από τα συστήματα διαχείρισης εγκαταστάσεων του στρατού ή της αεροπορίας (Langley et al., 2023). Η εμπειρία του πιλοτικού προγράμματος καταδεικνύει ότι το middleware πρέπει να ενσωματώνει μηχανισμούς μετάφρασης σχημάτων και πρωτοκόλλων, οι οποίοι μπορούν να επεκταθούν με εξειδικευμένες διεπαφές μεταξύ των κλάδων.

Η εκπαίδευση του προσωπικού αποτελεί επίσης κρίσιμο παράγοντα επιτυχίας. Η υιοθέτηση του DPP σε όλους τους κλάδους προϋποθέτει προγράμματα κατάρτισης βάσει ρόλων, τα οποία λαμβάνουν υπόψη τις διαφορετικές επιχειρησιακές κουλτούρες και ροές εργασίας (Langley et al., 2023). Οι χρήστες πρέπει να κατανοούν με σαφήνεια τόσο τις τεχνικές διαδικασίες (π.χ. σάρωση ετικετών, καταχώριση μεταδεδομένων) όσο και τα όρια των εξουσιοδοτήσεών τους (Westerlund,

2023). Η μετάβαση σε πλήρη κλίμακα θα πρέπει να ακολουθήσει σταδιακή προσέγγιση, ξεκινώντας από μη κρίσιμες αλλά αντιπροσωπευτικές εγκαταστάσεις ανά κλάδο. Μόνο όταν οι βασικοί δείκτες απόδοσης επιβεβαιώσουν την ισοδυναμία με τα αποτελέσματα του πιλοτικού προγράμματος, η υλοποίηση θα πρέπει να επεκταθεί σε περιοχές υψηλής διαβάθμισης, όπως κέντρα διοίκησης ή κρίσιμες αποθήκες (Abedi et al., 2024).

Τέλος, η πλήρης κάλυψη όλων των κλάδων επιτρέπει τη συγκεντρωτική αξιοποίηση δεικτών βιωσιμότητας στο πλαίσιο των απαιτήσεων του ESPR. Οι κεντρικές αναλύσεις μπορούν να αποδίδουν συνοπτικούς δείκτες ανακυκλωσιμότητας και ενεργειακής απόδοσης σε γενικευμένη μορφή, ενώ τα αναλυτικά δεδομένα παραμένουν διαθέσιμα μόνο σε εξουσιοδοτημένους χρήστες. Με τον τρόπο αυτό ενισχύεται η δημόσια λογοδοσία χωρίς να θίγεται το επιχειρησιακό απόρρητο, επιτρέποντας στις Ένοπλες Δυνάμεις της Ελλάδας να επεκτείνουν το DPP με συνέπεια, ασφάλεια και μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα (Korpelaar et al., 2023; Langley et al., 2023; Westerlund, 2023).

6.3 Περιορισμοί και Μεθοδολογικές Παραδοχές

Στο συγκεκριμένο κεφάλαιο αναφέραμε τα σημαντικά οφέλη που προκύπτουν από την υιοθέτηση του DPP σε αντιπροσωπευτικό περιβάλλον στρατιωτικών υποδομών. Επίσης, παρουσιάστηκαν προτάσεις για μελλοντικές επεκτάσεις της αρχιτεκτονικής όπως η τεχνητή νοημοσύνη, η προγνωστική συντήρηση και το blockchain. Ωστόσο, όπως σε κάθε ερευνητική εργασία, τα αποτελέσματα και τα συμπεράσματα πρέπει να ερμηνεύονται λαμβάνοντας υπόψη συγκεκριμένους περιορισμούς και μεθοδολογικές παραδοχές.

Ο πρώτος βασικός περιορισμός αφορά την κλίμακα της πιλοτικής εφαρμογής. Η υλοποίηση πραγματοποιήθηκε σε περιορισμένο αριθμό περιουσιακών στοιχείων και υποσυστημάτων, τα οποία, αν και επιλέχθηκαν ώστε να είναι αντιπροσωπευτικά διαφορετικών κατηγοριών εξοπλισμού και λειτουργιών, δεν καλύπτουν το πλήρες φάσμα της πολυπλοκότητας που χαρακτηρίζει το σύνολο των στρατιωτικών εγκαταστάσεων. Ως εκ τούτου, οι παρατηρούμενες επιδόσεις και τα οφέλη του DPP αποτυπώνουν κυρίως τάσεις και όχι απόλυτες μετρήσεις που μπορούν να γενικευθούν αυτούσιες σε όλα τα περιβάλλοντα.

Δεύτερος σημαντικός περιορισμός σχετίζεται με τη διαθεσιμότητα, την ποιότητα των την χρονική έκταση των δεδομένων. Τα στατικά δεδομένα προήλθαν από τεχνικές μελέτες και απογραφές που θεωρήθηκαν αξιόπιστες και επικαιροποιημένες, ενώ τα δυναμικά δεδομένα αισθητήρων συλλέχθηκαν σε ελεγχόμενο και σχετικά περιορισμένο χρονικό διάστημα. Η περιορισμένη χρονική έκταση των μετρήσεων δεν επιτρέπει την εξαγωγή μακροχρόνιων συμπερασμάτων σχετικά με φαινόμενα αργής υποβάθμισης ή σπάνιας αστοχίας, τα οποία απαιτούν πολυετή ιστορικά σύνολα δεδομένων.

Ιδιαίτερη μεθοδολογική παραδοχή αφορά τον υπολογισμό του λειτουργικού δείκτη κινδύνου. Ο δείκτης σχεδιάστηκε ως συνθετικό μέτρο επιχειρησιακής κατάστασης και όχι ως αυστηρά πιθανοκρατικό μοντέλο αστοχίας ή προγνωστικός μηχανισμός. Οι συναρτήσεις κανονικοποίησης και τα βάρη των επιμέρους παραγόντων επιλέχθηκαν εμπειρικά, με γνώμονα τη λειτουργική ερμηνευσιμότητα και τη χρηστικότητα από τους διαχειριστές υποδομών. Η προσέγγιση αυτή ευνοεί τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο, αλλά δεν υποκαθιστά εξειδικευμένες αναλύσεις αξιοπιστίας ή μηχανισμούς πρόβλεψης βασισμένους σε εκτενή ιστορικά δεδομένα. Επιπλέον, η αρχιτεκτονική του συστήματος υλοποιήθηκε με κανόνες και όρια βασισμένα σε επιχειρησιακές παραδοχές, χωρίς την ενσωμάτωση αλγορίθμων μηχανικής μάθησης ή αυτόματης προσαρμογής. Η επιλογή αυτή έγινε σκόπιμα, ώστε να διασφαλιστεί η διαφάνεια, η ερμηνευσιμότητα και η αποδοχή του συστήματος σε περιβάλλοντα αυξημένων απαιτήσεων ασφάλειας. Ωστόσο, περιορίζει τη δυνατότητα αυτόματης βελτιστοποίησης των κανόνων με βάση εξελισσόμενα πρότυπα φθοράς. Ακόμη, η εργασία βασίστηκε στην παραδοχή ότι τα υφιστάμενα συστήματα ERP και BIM μπορούν να παρέχουν σταθερές και συνεπείς διεπαφές ανταλλαγής δεδομένων. Στην πράξη, η ετερογένεια των πληροφοριακών συστημάτων, οι παλαιότερες εκδόσεις λογισμικού και οι αποκλίσεις στα σχήματα δεδομένων ενδέχεται να απαιτήσουν πρόσθετες προσαρμογές κατά τη γενικευμένη υιοθέτηση του DPP σε μεγαλύτερη κλίμακα.

Τέλος, οι περιορισμοί που απορρέουν από τα πρωτόκολλα διαβάθμισης και την επιχειρησιακή ασφάλεια των στρατιωτικών υποδομών επηρέασαν τον βαθμό λεπτομέρειας που μπορούσε να ενσωματωθεί στο πιλοτικό σύστημα. Ορισμένα δεδομένα είτε δεν συλλέχθηκαν είτε παρουσιάστηκαν σε γενικευμένη μορφή, προκειμένου να διασφαλιστεί η συμμόρφωση με τα πρωτόκολλα διαβάθμισης και επιχειρησιακής προστασίας. Η παραδοχή αυτή περιορίζει την

πληρότητα ορισμένων αναλύσεων, αλλά αντικατοπτρίζει ρεαλιστικά τις συνθήκες υπό τις οποίες καλείται να λειτουργήσει ένα τέτοιο σύστημα στην πράξη.

Οι ανωτέρω περιορισμοί και παραδοχές δεν αναιρούν τη συμβολή της παρούσας εργασίας, αλλά οριοθετούν το πλαίσιο εντός του οποίου πρέπει να ερμηνεύονται τα αποτελέσματα. Παράλληλα, αναδεικνύουν σαφείς κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα και εξέλιξη του DPP, τόσο σε επίπεδο τεχνικής ωρίμανσης όσο και σε επίπεδο επιχειρησιακής αξιοποίησης. Οι βασικοί περιορισμοί της πιλοτικής υλοποίησης, οι επιπτώσεις τους και οι προτεινόμενες κατευθύνσεις αντιμετώπισης συνοψίζονται στον Πίνακα 6.1, ο οποίος λειτουργεί ως γέφυρα μεταξύ της παρούσας αξιολόγησης και των μελλοντικών επεκτάσεων του συστήματος.

Περιορισμός	Επιπτώσεις στην Πιλοτική Εφαρμογή	Προτεινόμενη Μελλοντική Αντιμετώπιση
Περιορισμένη κλίμακα πιλοτικής υλοποίησης	Τα αποτελέσματα αντανακλούν τάσεις και όχι πλήρη γενίκευση για το σύνολο των στρατιωτικών υποδομών	Κλιμακωτή επέκταση σε πολλαπλές εγκαταστάσεις διαφορετικών κλάδων (Στρατός, Ναυτικό, Αεροπορία) με συγκριτική αξιολόγηση
Περιορισμένο χρονικό εύρος συλλογής δεδομένων αισθητήρων	Αδυναμία ανίχνευσης μακροχρόνιων μηχανισμών φθοράς ή σπάνιων αστοχιών	Συνεχής πολυετής συλλογή δεδομένων και δημιουργία ιστορικών βάσεων για μακροπρόθεσμη ανάλυση
Εμπειρικός καθορισμός βαρών στον δείκτη κινδύνου	Πιθανή υποκειμενικότητα στη σχετική σημασία επιμέρους παραγόντων	Αναθεώρηση βαρών μέσω στατιστικής ανάλυσης, AHP ή εκπαίδευσης μοντέλων με πραγματικά δεδομένα
Απουσία προγνωστικών αλγορίθμων μηχανικής μάθησης	Ο δείκτης κινδύνου λειτουργεί ως εργαλείο κατάστασης και όχι πρόβλεψης αστοχίας	Ενσωμάτωση LSTM, Random Forest ή Bayesian μοντέλων για Predictive Maintenance

Εξάρτηση από ποιότητα και πληρότητα υφιστάμενων τεχνικών μελετών	Πιθανές αποκλίσεις μεταξύ ψηφιακής αναπαράστασης και πραγματικής κατάστασης υποδομών	Συνδυασμός με επιτόπιες αποτυπώσεις, BIM ενημερώσεις και αυτοματοποιημένη επαλήθευση δεδομένων
Ετερογένεια ERP και BIM συστημάτων μεταξύ κλάδων	Αυξημένη πολυπλοκότητα διασύνδεσης και ανάγκη προσαρμογών middleware	Τυποποίηση APIs και λεξικών μεταδεδομένων σε επίπεδο Υπουργείου Άμυνας
Περιορισμοί διαβάθμισης και επιχειρησιακής ασφάλειας	Περιορισμένη λεπτομέρεια σε ορισμένα δεδομένα και αναλύσεις	Πολυεπίπεδοι μηχανισμοί πρόσβασης και ανωνυμοποιημένες προβολές δεδομένων
Περιορισμένη εκπαίδευση χρηστών στο πιλοτικό στάδιο	Πιθανή ανομοιογένεια στη χρήση και καταγραφή δεδομένων	Ανάπτυξη προγραμμάτων εκπαίδευσης βάσει ρόλων και πιστοποίησης χρηστών
Μη πλήρης ενσωμάτωση εφοδιαστικής αλυσίδας	Περιορισμένη αξιοποίηση δεδομένων CRM και ανακύκλωσης	Ενοποίηση προμηθειών, αποθεμάτων και ανακύκλωσης σε ενιαίο πλαίσιο DPP

Πίνακας 6.1 – Περιορισμοί, Επιπτώσεις και Μελλοντική Αντιμετώπιση της Προτεινόμενης Προσέγγισης DPP

6.4 Σύνοψη των Βασικών Ευρημάτων

Η αξιολόγηση της πιλοτικής εφαρμογής του Ψηφιακού Διαβατηρίου Προϊόντος ανέδειξε ένα σύνολο ευρημάτων τα οποία, σε συνδυασμό, διαμορφώνουν μια συνεκτική εικόνα των επιτευγμάτων σε τεχνικό, οργανωτικό και επιχειρησιακό επίπεδο. Η σταδιακή υλοποίηση κατέδειξε ότι η συγκέντρωση και ενοποίηση πληροφοριών που αφορούν τα περιουσιακά στοιχεία σε ένα κοινό ψηφιακό πλαίσιο παρείχε σαφή λειτουργικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις παραδοσιακές, αποσπασματικές πρακτικές τεκμηρίωσης. Η συνύπαρξη στατικών δεδομένων προϊόντος με δυναμικές λειτουργικές εισροές επέτρεψε την πρόσβαση σε ένα ενιαίο και συνεπές

σύνολο πληροφοριών, μειώνοντας ασυνέπειες και καθυστερήσεις που προέκυπταν από την ύπαρξη πολλαπλών, μη συγχρονισμένων αρχείων (Çetin et al., 2023; Voulgaridis et al., 2024). Η διασύνδεση δεδομένων αισθητήρων, ροών ERP και αναφορών σε μοντέλα BIM επέτρεψε την ταχύτερη ανίχνευση και εντοπισμό μεταβολών στη λειτουργική κατάσταση των συστημάτων. Στο πλαίσιο της πιλοτικής εφαρμογής, η συσχέτιση αυτών των δεδομένων υποστήριξε την έγκαιρη ενημέρωση του προσωπικού και τη βελτιωμένη τεκμηρίωση των ενεργειών συντήρησης, μειώνοντας τον χρόνο που απαιτείται από την αναγνώριση ενός συμβάντος έως τη δρομολόγηση διορθωτικών ενεργειών (Langley et al., 2023). Αν και οι μηχανισμοί αυτοματοποιημένης ενεργοποίησης ενεργειών εφαρμόστηκαν κυρίως σε επίπεδο κανόνων, τα αποτελέσματα υποδεικνύουν ότι η αρχιτεκτονική είναι κατάλληλη για μελλοντική ενσωμάτωση πιο σύνθετων αναλυτικών ή προγνωστικών μηχανισμών (Kühn et al., 2025).

Ιδιαίτερη σημασία είχε η εφαρμογή ελέγχων πρόσβασης σε επίπεδο χαρακτηριστικών του διαβατηρίου, οι οποίοι επέτρεψαν την εξισορρόπηση των απαιτήσεων διαφάνειας με τις ανάγκες προστασίας ευαίσθητων πληροφοριών. Στο πλαίσιο της πιλοτικής εφαρμογής αποδείχθηκε ότι είναι εφικτή η παροχή συγκεντρωτικών ή ανωνυμοποιημένων δεδομένων για σκοπούς συμμόρφωσης και αναφοράς, χωρίς να εκτίθενται τεχνικές λεπτομέρειες ή επιχειρησιακά κρίσιμες παράμετροι (Westerlund, 2023). Η επιλεκτική αυτή προσέγγιση ενισχύει τη δυνατότητα συνεργασίας με εξωτερικούς φορείς, όπως εργολάβους ή εποπτικές αρχές, χωρίς να διαταράσσεται η συνοχή ή η ασφάλεια του ενιαίου συνόλου δεδομένων (Korpelaar et al., 2023). Σε ό,τι αφορά τη συντήρηση, η πιλοτική εφαρμογή επιβεβαίωσε ότι ο συνδυασμός κανόνα-βασισμένων μηχανισμών με αξιοποίηση ιστορικών δεδομένων λειτουργίας μπορεί να βελτιώσει τον χρονισμό των παρεμβάσεων σε σχέση με στατικά προγράμματα σταθερών διαστημάτων. Για εξοπλισμό που εκτίθεται σε ιδιαίτερες περιβαλλοντικές συνθήκες, όπως συστήματα HVAC σε παράκτιες περιοχές, η ενσωμάτωση μετρήσεων περιβαλλοντικής έκθεσης υποστήριξε την προσαρμογή των κύκλων συντήρησης στις πραγματικές συνθήκες φθοράς (Χανιάς, 2020). Σημειώνεται ότι στην παρούσα πιλοτική υλοποίηση δεν εφαρμόστηκαν προγνωστικά μοντέλα ή αλγόριθμοι μηχανικής μάθησης και η αξιολόγηση της κατάστασης βασίστηκε αποκλειστικά σε ερμηνεύσιμους κανόνες και δείκτες. Παρ' όλα αυτά, τα ευρήματα υποδεικνύουν ότι η προσέγγιση αυτή μπορεί να περιορίσει τόσο πρόωρες όσο και καθυστερημένες παρεμβάσεις, μειώνοντας την πιθανότητα αιφνίδιων αστοχιών

Η ενσωμάτωση πληροφοριών σύνθεσης υλικών και στοιχείων κρίσιμων πρώτων υλών (CRM) στο πλαίσιο του DPP αποδείχθηκε χρήσιμη για τη σύνδεση των αρχικών δηλώσεων των προμηθευτών με τις διαδικασίες απόσυρσης και ανάκτησης στο τέλος του κύκλου ζωής. Ακόμη και σε ένα ελεγχόμενο αμυντικό περιβάλλον, όπου οι λεπτομέρειες διάταξης δεν είναι πλήρως διαθέσιμες, η ύπαρξη τυποποιημένων και ανωνυμοποιημένων κατηγοριοποιήσεων υποστήριξε τη λήψη αποφάσεων σχετικά με την ανακύκλωση και την επαναχρησιμοποίηση υλικών, ευθυγραμμίζοντας τις πρακτικές αυτές με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας (Koppelaar et al., 2023).

Τα λειτουργικά οφέλη που παρατηρήθηκαν κατά τη διάρκεια των δοκιμών περιλάμβαναν μείωση του διοικητικού φόρτου, καλύτερο χωρικό προγραμματισμό των παρεμβάσεων και βελτιωμένη προετοιμασία των συνεργείων πριν από τη μετάβαση στον χώρο. Η οπτικοποίηση των ειδοποιήσεων συνέβαλε στη μείωση του μέσου χρόνου αποκατάστασης των συστημάτων, χωρίς να διακυβεύεται η τήρηση των πρωτοκόλλων ασφαλείας (Alsofiani, 2024; Langley et al., 2023).

Συνολικά, τα ευρήματα της πιλοτικής εφαρμογής παρέχουν μια τεκμηριωμένη βάση για τη βελτίωση και την κλιμάκωση του πλαισίου DPP σε ευρύτερη κλίμακα. Η εμπειρία που αποκτήθηκε επιβεβαιώνει τη λειτουργική αξία της προσέγγισης, ενώ παράλληλα αναδεικνύει τα τεχνικά και οργανωτικά σημεία που απαιτούν περαιτέρω ενίσχυση πριν από την ανάπτυξη του συστήματος σε πιο κρίσιμες στρατιωτικές εγκαταστάσεις.

7 Συμπέρασμα

Η ενσωμάτωση των Ψηφιακών Διαβατηρίων Προϊόντων (Digital Product Passports – DPP) στη διαχείριση υποδομών των Ενόπλων Δυνάμεων της Ελλάδας καταδεικνύει μια μετασχηματιστική προσέγγιση στην τεκμηρίωση του κύκλου ζωής των περιουσιακών στοιχείων, στην επιχειρησιακή αποδοτικότητα και στη συμμόρφωση με κανονιστικά πλαίσια. Μέσω της ενοποίησης στατικών δεδομένων προϊόντων με δυναμικές εισροές που προέρχονται από δίκτυα αισθητήρων IoT, συστήματα προγραμματισμού επιχειρησιακών πόρων (ERP) και πλατφόρμες μοντελοποίησης πληροφοριών κτιρίων (BIM), το προτεινόμενο σύστημα συγκροτεί ένα ενοποιημένο, προσβάσιμο και επαληθεύσιμο αποθετήριο δεδομένων. Το αποθετήριο αυτό υποστηρίζει τόσο τις καθημερινές εργασίες συντήρησης όσο και τη λήψη αποφάσεων σε ανώτερο επιχειρησιακό επίπεδο. Με τον τρόπο αυτόν μειώνονται οι καθυστερήσεις και τα σφάλματα που συνδέονται με την κατακερματισμένη τήρηση αρχείων και επιτρέπεται η μετάβαση από αντιδραστικές σε περισσότερο προληπτικές και τεκμηριωμένες παρεμβάσεις.

Η πιλοτική εφαρμογή ανέδειξε τη χρησιμότητα αυτοματοποιημένων μηχανισμών παρακολούθησης, ειδοποίησης και προγραμματισμού συντήρησης, οι οποίοι βασίζονται σε συνδυασμό λειτουργικών δεδομένων, ιστορικών καταγραφών και κανόνων αξιολόγησης κατάστασης. Παρότι η παρούσα υλοποίηση δεν ενσωματώνει αλγορίθμους μηχανικής μάθησης ή προγνωστικά μοντέλα αστοχίας, η αρχιτεκτονική της έχει σχεδιαστεί με τρόπο που επιτρέπει τη μελλοντική ενσωμάτωση τεχνικών predictive maintenance. Τέτοιες τεχνικές θα μπορούσαν να αξιοποιούν εκτεταμένα ιστορικά και περιβαλλοντικά δεδομένα, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαίτερες συνθήκες κάθε εγκατάστασης, όπως η διάβρωση σε παράκτιες περιοχές ή οι κύκλοι ψύξης–απόψυξης σε ορεινά περιβάλλοντα. Οι μηχανισμοί ανατροφοδότησης μεταξύ αποτελεσμάτων συντήρησης και επαναβαθμονόμησης μοντέλων συνιστούν μια ρεαλιστική κατεύθυνση μελλοντικής εξέλιξης, με στόχο τη βελτίωση της ακρίβειας εκτιμήσεων και την επιμήκυνση της ωφέλιμης ζωής των περιουσιακών στοιχείων. Παράλληλα, η ενσωμάτωση της παρακολούθησης κρίσιμων πρώτων υλών (Critical Raw Materials – CRM) στο πλαίσιο του DPP αναδεικνύεται ως σημαντικός παράγοντας υποστήριξης των στόχων κυκλικής οικονομίας. Η συσχέτιση δεδομένων σύνθεσης υλικών με τις φάσεις απόσυρσης και ανακύκλωσης επιτρέπει τη σύνδεση των

αποτελεσμάτων επεξεργασίας στο τέλος του κύκλου ζωής με τα στάδια του σχεδιασμού και της προμήθειας, χωρίς να διακυβεύεται η επιχειρησιακή ετοιμότητα.

Οι απαιτήσεις ασφάλειας και εμπιστευτικότητας αποτελούν κεντρικό άξονα του προτεινόμενου πλαισίου. Η αρχιτεκτονική βασίζεται σε ελέγχους πρόσβασης βάσει ρόλων, κρυπτογραφημένες επικοινωνίες και σαφή διαχωρισμό επιπέδων πληροφορίας, διασφαλίζοντας ότι τα ευαίσθητα δεδομένα προστατεύονται χωρίς να περιορίζεται η αναγκαία διαφάνεια για σκοπούς εποπτείας και συμμόρφωσης. Σε αυτό το πλαίσιο, τεχνολογίες αμετάβλητης καταγραφής, όπως permissioned ή υβριδικά blockchain σχήματα, μπορούν να εξεταστούν αποκλειστικά ως μελλοντική και προαιρετική επέκταση με στόχο την ενίσχυση της ακεραιότητας και της ιχνηλασιμότητας επιλεγμένων εγγραφών, χωρίς να αποτελούν προϋπόθεση για τη βασική λειτουργικότητα της παρούσας υλοποίησης.

Τα αποτελέσματα της πιλοτικής εφαρμογής επιβεβαιώνουν ότι ένα ενοποιημένο ψηφιακό οικοσύστημα βασισμένο σε αρχές DPP μπορεί να προσφέρει μετρήσιμες βελτιώσεις στην αποδοτικότητα της συντήρησης, στη διαφάνεια και στην ιχνηλασιμότητα των υποδομών. Ταυτόχρονα, οι προκλήσεις που αναδείχθηκαν — όπως η ενσωμάτωση παλαιών συστημάτων, η ανομοιογένεια των διαθέσιμων δεδομένων και η υιοθέτηση από τους χρήστες — υπογραμμίζουν τη σημασία της διακυβέρνησης, της τυποποίησης και της διαχείρισης αλλαγών ως αναπόσπαστων στοιχείων της τεχνολογικής εξέλιξης.

Συνολικά, η προτεινόμενη προσέγγιση θεμελιώνει ένα συνεκτικό και επεκτάσιμο πλαίσιο διαχείρισης στρατιωτικών υποδομών σε εκτεταμένους κύκλους ζωής, εξισορροπώντας επιχειρησιακές ανάγκες, κανονιστικές απαιτήσεις και περιβαλλοντικές ευθύνες. Τα οφέλη που καταγράφηκαν σε επίπεδο ετοιμότητας, βελτιστοποίησης πόρων και διαφάνειας συμμόρφωσης καθιστούν το μοντέλο διαχείρισης που βασίζεται στο DPP μια ρεαλιστική και βιώσιμη κατεύθυνση για τη μακροπρόθεσμη υποστήριξη των αμυντικών υποδομών.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Ελληνική Δημοκρατία. (2014). *Κοινή Υπουργική Απόφαση 23615/651/Ε.103 – Εναλλακτική διαχείριση αποβλήτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (ΦΕΚ Β' 1184/2014)*. Αθήνα: Εθνικό Τυπογραφείο.
- Ελληνική Δημοκρατία. (2010). *Κοινή Υπουργική Απόφαση 36259/1757/Ε103 – Εναλλακτική διαχείριση αποβλήτων εκσκαφών, κατασκευών και κατεδαφίσεων (ΦΕΚ Β' 1312/24.08.2010)*. Αθήνα: Εθνικό Τυπογραφείο.
- Ελληνική Δημοκρατία. (2016). *Νόμος 4412/2016 – Δημόσιες συμβάσεις έργων, προμηθειών και υπηρεσιών (ΦΕΚ Α' 147/08.08.2016)*. Αθήνα: Εθνικό Τυπογραφείο.
- Ελληνική Δημοκρατία. (2011). *Νόμος 3978/2011 – Δημόσιες συμβάσεις έργων, προμηθειών και υπηρεσιών στους τομείς της άμυνας και της ασφάλειας (ΦΕΚ Α' 137/16.06.2011)*. Αθήνα: Εθνικό Τυπογραφείο.
- Ελληνική Δημοκρατία. (2021). *Νόμος 4782/2021 – Εκσυγχρονισμός, απλοποίηση και αναμόρφωση του ρυθμιστικού πλαισίου των δημοσίων συμβάσεων (ΦΕΚ Α' 36/09.03.2021)*. Αθήνα: Εθνικό Τυπογραφείο.
- Ελληνική Δημοκρατία. (2021). *Νόμος 4819/2021 – Ολοκληρωμένο πλαίσιο για τη διαχείριση αποβλήτων (ΦΕΚ Α' 129/23.07.2021)*. Αθήνα: Εθνικό Τυπογραφείο.
- Πολεμική Αεροπορία. (2023, Μάρτιος). *Βασικό δόγμα Πολεμικής Αεροπορίας*. Υπουργείο Εθνικής Άμυνας.
- Υπουργείο Ανάπτυξης και Επενδύσεων, Διεύθυνση Διαχείρισης, Ανάπτυξης και Υποστήριξης ΕΣΗΔΗΣ. (n.d.). *Πλατφόρμα Ανοιχτών Δεδομένων Δημοσίων Συμβάσεων (PWG Open Data)*. Ανακτήθηκε από <https://pwgopendata.eprocurement.gov.gr> (διαθέσιμη κατά τον χρόνο συγγραφής της εργασίας)
- Υπουργείο Εθνικής Άμυνας. (2024). *Εθνικός Κανονισμός Ασφαλείας (Υ.Α. Φ.120/511579/Σ.4510/2024, ΦΕΚ Β' 2713/2024)*. Αθήνα: ΥΠΕΘΑ. Ανακτήθηκε από <https://www.kodiko.gr/nomothesia/document/1020481>

- Υπουργείο Εθνικής Άμυνας. (2013). *Πράσινη Βίβλος*. Τμήμα Υποδομής ΥΠΕΘΑ. Τυπογραφείο Ελληνικού Στρατού. ISBN 978-618-80914-0-5. Διαθέσιμο στο <http://www.greenarmedforces.mil.gr>
- Υπουργείο Εξωτερικών. (2024). *Η Ελλάδα και το NATO*. Ελληνική Δημοκρατία – Υπουργείο Εξωτερικών. <https://www.mfa.gr/foreign-policy/greece-in-nato/>
- Χανιάς, Ε. (2020). *Αειφορικός σχεδιασμός βασικών στρατιωτικών εγκαταστάσεων* [Μεταπτυχιακή διπλωματική εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο]. Αποθετήριο ΑΠΟΘΕΣΗ. <https://apothesis.eap.gr/archive/item/156242?lang=el>
- Abedi, F., Saari, U. A., & Hakola, L. (2024). *Implementation and adoption of digital product passports: A systematic literature review*. In 2024 IEEE International Conference on Engineering, Technology, and Innovation (ICE/ITMC). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICE/ITMC61926.2024.10794320>
- Alsofiani, M. A. (2024). *Digitalization in infrastructure construction projects: A PRISMA-based review of benefits and obstacles* [Preprint]. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.16875>
- Çetin, S., Raghu, D., Honic, M., Straub, A., & Gruis, V. (2023). Data requirements and availabilities for material passports: A digitally enabled framework for improving the circularity of existing buildings. *Sustainable Production and Consumption*, 40, 422–437. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.07.011>
- Cortiços, N. D. (2018). Automation for building performance and maintenance efficiency. *Proceedings of the Creative Construction Conference*. <https://doi.org/10.3311/CCC2018-004>
- Domskienė, J., & Gaidule, E. (2024). An overview of technological challenges in implementing the digital product passport in the textile and clothing industry. *Autex Research Journal*, 24(1), Article 0002. <https://doi.org/10.1515/aut-2024-0002>

- D’Orazio, M., & Bernardini, G. (2023). Towards a technical sentiment lexicon for the maintenance of human-centred buildings. *TEMA: Technologies Engineering Materials Architecture*, 9(1), 52. <https://doi.org/10.30682/tema0901e>
- European Commission. (n.d.). *Ecodesign for sustainable products regulation*. European Commission. Retrieved August 18, 2025, from https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/ecodesign-sustainable-products-regulation_en
- Gligorić, N., Krco, S., Hakola, L., Vehmas, K., De, S., Moessner, K., Jansson, K., Polenz, I., & Van Kranenburg, R. (2019). *SmartTags: IoT Product Passport for Circular Economy Based on Printed Sensors and Unique Item-Level Identifiers*. *Sensors*, 19(3), Article 586. <https://doi.org/10.3390/s19030586>
- Hellenic Air Force. (n.d.). *Αρχηγείο Τακτικής Αεροπορίας (ATA)*. Retrieved October 11, 2025, from <https://www.haf.gr/structure/ata/>
- Hellenic National Defence General Staff. (n.d.). *Official website of the Hellenic National Defence General Staff (GEETHA)*. Retrieved October 11, 2025, from <https://geetha.mil.gr/>
- Hakimi, O., Liu, H., & Abudayyeh, O. (2024). Digital twin-enabled smart facility management: A bibliometric review. *Frontiers of Engineering Management*, 11(1), 32–49. <https://doi.org/10.1007/s42524-023-0254-4>
- Harmon, B. A., Goran, W. D., & Harmon, R. S. (2014). *Military installations and cities in the twenty-first century: Towards sustainable military installations and adaptable cities* (pp. 34–61). <https://doi.org/10.1007/978-94-007-7161-1>
- Hulea, M., Miron, R., & Muresan, V. (2024). *Digital product passport implementation based on multi-blockchain approach with decentralized identifier provider*. *Applied Sciences*, 14(11), 4874. <https://doi.org/10.3390/app14114874>
- International Electrotechnical Commission. (2019). IEC 31010:2019 Risk management — Risk assessment techniques. Geneva, Switzerland: IEC.

International Organization for Standardization. (2018).ISO 31000:2018 Risk management — Guidelines.Geneva, Switzerland: ISO.

Kühn, M., Baumann, M., Volz, F., & Stojanovic, L. (2025). Digital product passports for industrial assets: Integrating sustainability and lifecycle data management. *Sustainability*, 17(3), 969. <https://doi.org/10.3390/su17030969>

Kim, J., Lee, S., & Kim, H. (2024). *Blockchain-based digital product passport for the circular economy*. In *Proceedings of the 2024 International Conference on Platform Technology and Service (PlatCon)* (pp. 188–191). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PLATCON63925.2024.10830745>

Kim, J., Moon, J., Do, Y., Kim, H., & Jeong, J. (2023). Research on a SaaS (software as a service)-based digital product passport system model for the EV battery industry value chain. *WSEAS Transactions on Business and Economics*, 20(1), 2466. <https://doi.org/10.37394/23207.2023.20.211>

Koppelaar, R. H. E. M., Pamidi, S., Hajósi, E., Herreras, L., Leroy, P., Jung, H.-Y., Concheso, A., Daniel, R., Francisco, F. B., Parrado, C., Dell’Ambrogio, S., Guggiari, F., Leone, D., & Fontana, A. (2023). A digital product passport for critical raw materials reuse and recycling. *Sustainability*, 15(2), 1405. <https://doi.org/10.3390/su15021405>

Kumar, G. S. A., Roy, A., Singh, R., Gehlot, A., Iqbal, M. I., & Akram, S. V. (2023). A comprehensive approach to real-time site monitoring and risk assessment in construction settings using Internet of Things and artificial intelligence. *SSRG International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 10(8), 112–126. <https://doi.org/10.14445/23488379/IJEEE-V10I8P111>

Langley, D. J., Rosca, E., Angelopoulos, M., Kamminga, O., & Hooijer, C. (2023). Orchestrating a smart circular economy: Guiding principles for digital product passports. *Journal of Business Research*, 169, 114259. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2023.114259>

- Lövdahl, J., Hallstedt, S. I., & Schulte, J. (2023). Implications of EU instruments on company capabilities to design more sustainable solutions: Product environmental footprint and digital product passport. <https://doi.org/10.1017/pds.2023.225>
- Mangialardo, A., & Micelli, E. (2018). Rethinking the construction industry under the circular economy: Principles and case studies. In A. Bisello, D. Vettorato, P. Laconte, & S. Costa (Eds.), *Smart and sustainable planning for cities and regions* (pp. 333–344). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75774-2_23
- Massafra, A., Predari, G., & Gulli, R. (2022). Towards digital twin driven cultural heritage management: A HBIM-based workflow for energy improvement of modern buildings. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLVI-5/W1-2022*, 149–156. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-5-W1-2022-149-202>
- Murdock, A., Lunt, G., & Ross, A. (n.d.). *TN-1491 Edition 2: Profiles for binding metadata to a data object* (Technical Note 1491 Edition 2). NATO Communications and Information Agency. https://storage.nisp.nw3.dk/TN-1491_Edition2-Binding_Profiles_v1.0-Signed.pdf
- NATO. (2022, September 29). *NATO standardization agreements (STANAGs)*. NATO. https://www.nato.int/cps/en/natohq/topics_69269.htm
- NATO. (2024). *Greece and the North Atlantic Treaty Organization (NATO)*. NATO. https://www.nato.int/cps/en/natohq/topics_52044.htm
- NATO Standardization Office. (2021). *STANAG 4609 – NATO digital motion imagery standard*. NATO Standardization Office. <https://nso.nato.int>
- Piéttron, D., Staab, P., & Hofmann, F. (2023). Digital circular ecosystems: A data governance approach. *GAIA*, 32(S1), 40–46. <https://doi.org/10.14512/gaia.32.S1.7>
- Psarommatis, F., & May, G. (2024). Digital product passport: A pathway to circularity and sustainability in modern manufacturing. *Sustainability*, 16(1), 396. <https://doi.org/10.3390/su16010396>

- Rumetshofer, T., & Fischer, J. (2023). Information-based plastic material tracking for circular economy: A review. *Polymers*, 15(7), 1623. <https://doi.org/10.3390/polym15071623>
- Saeed, S., Altamimi, S. A., Alkayyal, N. A., Alshehri, E., & Alabbad, D. A. (2023). Digital transformation and cybersecurity challenges for businesses resilience: Issues and recommendations. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 23(15), 6630. <https://doi.org/10.3390/s23156666>
- Stamp, J., Eddy, J., Jensen, R., & Muñoz-Ramos, K. (2015). *Microgrid design analysis using technology management optimization and the performance reliability model*.
- Toyin, J., & Mewomo, M. (2022). Critical review of the impacts of successful BIM technology application on construction projects. In S. O. Olatunji, O. O. Ogundipe, & J. A. Akinradewo (Eds.), *Emerging technologies for construction delivery* (pp. 85–102). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97748-1_6
- Voulgaridis, K., Lagkas, T., Angelopoulos, C. M., Boulogeorgos, A.-A. A., Argyriou, V., & Sarigiannidis, P. (2024). Digital product passports as enablers of digital circular economy: A framework based on technological perspective. *Telecommunication Systems*, 85, 699–715. <https://doi.org/10.1007/s11235-024-01104-x>
- Wagner, E. (2025). Information barriers to circularity for electronic products and the potential of digital product passports. *Sustainability*, 17(12), 5554. <https://doi.org/10.3390/su17125554>
- Walden, J., Steinbrecher, A. M., & Marinkovic, M. (2021). Digital product passports as enabler of the circular economy. *Chemie Ingenieur Technik*, 93(11), 1717–1727. <https://doi.org/10.1002/cite.202100121>
- Westerlund, L. (2023). *Enabling a circular economy with digital product passports: Information requirements and data collection practices* [Doctoral dissertation, KTH Royal Institute of Technology]. DiVA Portal. <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-329565>

Williams, I. D., & Shittu, O. S. (2022). Development of sustainable electronic products, business models and designs using circular economy thinking. *Detritus*, *21*, 45–54. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2022.16228>

Xiao, B., Zhong, J., Bao, X., Chen, L., Bao, J., & Zheng, Y. (2024). Digital twin-driven prognostics and health management for industrial assets. *Scientific Reports*, *14*, 13443. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-63990-0>