



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

ΕΝΙΣΧΥΣΗ ΤΗΣ ΑΣΦΑΛΕΙΑΣ ΚΑΙ ΤΗΣ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑΣ
ΣΤΗ ΜΕΤΑΦΟΡΑ ΨΥΧΟΜΕΝΩΝ ΦΟΡΤΙΩΝ ΜΕ ΤΗ ΧΡΗΣΗ ΤΟΥ
ΔΙΑΔΙΚΤΥΟΥ ΤΩΝ ΠΡΑΓΜΑΤΩΝ

ENHANCING SECURITY AND EFFECTIVENESS IN COLD CARGO
TRANSPORT USING THE INTERNET OF THINGS

ΝΤΑΝΙΕΛ ΛΕΣΑΪ (TML2211)

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΡΑΧΑΝΙΩΤΗΣ

ΠΕΙΡΑΙΑΣ, ΜΑΡΤΙΟΣ 2026

ΔΗΛΩΣΗ

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

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

Ο Φοιτητής

Ντανιέλ Λεσάι

Ο Επιβλέπων

Νικόλαος Ραχανιώτης

Περίληψη

Η ραγδαία εξέλιξη των παγκόσμιων αλυσίδων εφοδιασμού, σε συνδυασμό με τις αυξανόμενες απαιτήσεις για ασφάλεια, διαφάνεια και κανονιστική συμμόρφωση, έχει οδηγήσει στην υιοθέτηση προηγμένων ψηφιακών τεχνολογιών στον τομέα της εφοδιαστικής ψυχόμενων προϊόντων. Η παρούσα εργασία εξετάζει συστηματικά τον ρόλο των συσκευών Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT), της τεχνολογίας blockchain και των έξυπνων συστημάτων παρακολούθησης στη βελτίωση της ιχνηλασιμότητας, της αξιοπιστίας και της λειτουργικής αποδοτικότητας της μεταφοράς και αποθήκευσης ευαίσθητων αγαθών. Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη συνεχή παρακολούθηση κρίσιμων περιβαλλοντικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία, μέσω δικτυωμένων αισθητήρων και πρωτοκόλλων επικοινωνίας χαμηλής ισχύος, καθώς και στη διασύνδεσή τους με υποδομές υπολογιστικής αιχμής και νέφους για επεξεργασία δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και υποστήριξη μηχανισμών έγκαιρης προειδοποίησης.

Παράλληλα, αναλύεται ο συμπληρωματικός ρόλος του blockchain στη διασφάλιση της ακεραιότητας, της σταθερότητας και της διαφάνειας των δεδομένων που παράγονται από τα συστήματα IoT, ενισχύοντας την εμπιστοσύνη μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών και αυτοματοποιώντας διαδικασίες συμμόρφωσης μέσω έξυπνων συμβολαίων. Η μελέτη λαμβάνει υπόψη υφιστάμενα νομικά και κανονιστικά πλαίσια σε ευρωπαϊκό και διεθνές επίπεδο, αναδεικνύοντας τη σημασία της τεκμηριωμένης καταγραφής και της ασφάλειας των δεδομένων για την αποφυγή κυρώσεων και απωλειών προϊόντων. Επιπλέον, παρουσιάζονται συγκριτικές αναλύσεις λογισμικού παρακολούθησης και μελέτες περίπτωσης από τους κλάδους των τροφίμων, των φαρμακευτικών προϊόντων και των logistics, οι οποίες καταδεικνύουν την πρακτική εφαρμογή και τα οφέλη των εξεταζόμενων τεχνολογιών σε πραγματικά περιβάλλοντα.

Τα ευρήματα υπογραμμίζουν ότι η κοινή χρήση IoT και blockchain υπερτερεί έναντι παραδοσιακών συστημάτων παρακολούθησης ως προς τη διαφάνεια, την ασφάλεια και τη διαλειτουργικότητα των αλυσίδων εφοδιασμού. Παρά τα πλεονεκτήματα, εντοπίζονται και περιορισμοί που σχετίζονται με την επεκτασιμότητα, την ενεργειακή κατανάλωση και την ενοποίηση με υφιστάμενες υποδομές, καθιστώντας αναγκαία την ανάπτυξη υβριδικών αρχιτεκτονικών και τυποποιημένων προσεγγίσεων. Συνολικά, η εργασία καταλήγει στο συμπέρασμα ότι ο συνδυασμός έξυπνης παρακολούθησης, ασφαλούς διαχείρισης δεδομένων και προσαρμοστικού σχεδιασμού διεπαφών χρήστη αποτελεί ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο για τη

βιώσιμη και κανονιστικά συμμορφούμενη ψηφιοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας ψυχόμενων προϊόντων.

Abstract

The rapid evolution of global supply chains, combined with increasing demands for safety, transparency and regulatory compliance, has accelerated the adoption of advanced digital technologies in the cold chain logistics sector. This study systematically examines the role of Internet of Things (IoT) devices, blockchain technology and intelligent monitoring systems in enhancing traceability, reliability and operational efficiency in the transportation and storage of temperature-sensitive goods. Particular emphasis is placed on the continuous monitoring of critical environmental parameters, such as temperature and humidity, through networked sensors and low-power communication protocols, as well as their integration with edge and cloud infrastructures to enable real-time data processing and timely alert mechanisms.

In parallel, the complementary role of blockchain technology is analyzed with respect to ensuring data integrity, immutability, and transparency across all stakeholders involved in the supply chain. By enabling tamper-resistant records and supporting the automation of compliance procedures through smart contracts, blockchain strengthens trust and accountability within complex logistics networks. The study further considers existing legal and regulatory frameworks at both European and international levels, highlighting the importance of secure data management and auditable records in preventing penalties, shipment delays, and product losses. Comparative analyses of monitoring software solutions and case studies from the food, pharmaceutical and logistics sectors are also presented, illustrating how these technologies are implemented and evaluated in real-world operational environments.

The findings indicate that the convergence of IoT and blockchain technologies offers significant advantages over conventional monitoring and data management approaches, particularly in terms of transparency, security and interoperability within supply chains. Nevertheless, several limitations are identified, including challenges related to scalability, energy consumption and integration with legacy systems. The constraints underscore the need for hybrid system architectures and standardized protocols to fully exploit the potential of these technologies. Overall, the study concludes that the integration of smart monitoring, secure data infrastructures and user-centered system design constitutes a comprehensive framework for the sustainable and regulation-compliant digital transformation of cold chain logistics.

Ευχαριστίες

Με την ολοκλήρωση της παρούσας διπλωματικής εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω τις ειλικρινείς μου ευχαριστίες σε όλους όσους συνέβαλαν, άμεσα ή έμμεσα, στην συγγραφή της.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον επιβλέποντα καθηγητή μου Νικόλαο Ραχανιώτη για την πολύτιμη καθοδήγηση, την επιστημονική του υποστήριξη και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Η συμβολή του υπήρξε καθοριστική, τόσο σε ακαδημαϊκό όσο και σε προσωπικό επίπεδο.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω θερμά το υπόλοιπο ακαδημαϊκό και διοικητικό προσωπικό του Μεταπτυχιακού Προγράμματος για τη στήριξη, τη συνεργασία και τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφεραν καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου. Η συμβολή τους υπήρξε ουσιαστική στην επιστημονική μου κατάρτιση και στην επιτυχή ολοκλήρωση του προγράμματος.

Τέλος, ένα μεγάλο και εγκάρδιο ευχαριστώ στην οικογένεια μου για την αδιάκοπη υποστήριξη, την κατανόηση και την αγάπη που μου προσέφεραν όλα αυτά τα χρόνια. Η πίστη τους σε εμένα αποτέλεσε τη μεγαλύτερη πηγή δύναμης και έμπνευσης.

Η παρούσα εργασία αποτελεί το επιστέγασμα μιας απαιτητικής αλλά ιδιαίτερα δημιουργικής πορείας, η οποία δεν θα μπορούσε να ολοκληρωθεί χωρίς τη συμβολή όλων των παραπάνω.

Περιεχόμενα

Τίτλος	1
Δήλωση	3
Περίληψη	4
Abstract.....	6
Ευχαριστίες	7
Εισαγωγή	10
Κεφάλαιο 1: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση	13
1.1 Ιστορική αναδρομή της ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας (cold supply chain)	13
1.2 Τεχνολογικές εξελίξεις στο IoT και η επίδρασή τους στη διαχείριση φορτίων.....	14
1.3 Εφαρμογές IoT για παρακολούθηση θερμοκρασίας και ποιότητας	17
1.4 Μελέτες περίπτωσης σε ψυχρές εφοδιαστικές αλυσίδες	19
1.5 Ερευνητικές τάσεις στα ευφυή συστήματα παρακολούθησης	20
Κεφάλαιο 2: Νομοθετικό και Κανονιστικό Πλαίσιο	22
2.1 Ευρωπαϊκή και διεθνής νομοθεσία για τη μεταφορά ευπαθών προϊόντων	22
2.2 Ανάλυση κανονισμών Schengen και CEFTA σε σχέση με τις ψυχόμενες μεταφορές.....	24
2.3 Διαδικασίες τελωνειακού ελέγχου για εμπορεύματα ευπαθούς φύσης.....	25
2.4 Υποχρεώσεις καταγραφής θερμοκρασιών	26
2.5 GDPR: Νομικές απαιτήσεις, ασφάλεια δεδομένων και προστασία απορρήτου.....	28
2.6 Επιπτώσεις μη συμμόρφωσης – πρόστιμα, καθυστερήσεις, καταστροφή φορτίων	30
Κεφάλαιο 3: Τεχνολογίες Blockchain και Διασφάλιση Διαφάνειας στην Εφοδιαστική Αλυσίδα	32
3.1 Εισαγωγή στην τεχνολογία Blockchain και βασικές αρχές	32
3.2 Εφαρμογή Blockchain στην ιχνηλασιμότητα ψυχόμενων προϊόντων (traceability)	33
3.3 Συστήματα αποθήκευσης και διαμοιρασμού δεδομένων.....	34
3.4 Πλεονεκτήματα έναντι συμβατικών βάσεων δεδομένων	36
3.5 Έξυπνα συμβόλαια	37
3.6 Το Blockchain ως μέσο αποτροπής απάτης και παραποίησης δεδομένων.....	38
Κεφάλαιο 4: Ανάλυση Απαιτήσεων και Σχεδίαση Πρωτοτύπου Εφαρμογής IoT.....	40
4.1 Προσδιορισμός χρηστών της εφαρμογής: αποστολείς, παραλήπτες, τελωνεία	40

4.2 Ανάλυση λειτουργικών και μη λειτουργικών απαιτήσεων	41
4.3 Ανάλυση διαθέσιμων αισθητήρων, δικτύων και πρωτοκόλλων	42
4.4 Χαρακτηριστικά και απαιτήσεις διεπαφής χρήστη	45
4.5 Ανάλυση ροής δεδομένων: από αισθητήρες σε υπολογιστικό νέφος και από εκεί σε πίνακα ελέγχου	46
4.6 Περιγραφή σεναρίων χρήσης (use cases) και μοντελοποίηση (UML)	48
4.7 Αρχιτεκτονική συστήματος σε επίπεδο λογισμικού και υλικού	50
Κεφάλαιο 5: Σχεδιασμός και Υλοποίηση ενός Συστήματος Παρακολούθησης	53
5.1 Επιλογή και ενσωμάτωση αισθητήρων θερμοκρασίας	53
5.2 Δικτυακή σύνδεση αισθητήρων με χρήση πρωτοκόλλων IoT	55
5.3 Ασφάλεια Δεδομένων μέσω τεχνολογίας Blockchain	57
5.4 Σχεδιασμός διεπαφής χρήστη και μηχανισμοί ειδοποίησης	59
5.5 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί του Blockchain στην ψυχρή αλυσίδα	61
Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα	64
Βιβλιογραφία	66

Εισαγωγή

Η εκθετική μεγέθυνση της παγκοσμιοποίησης και του διεθνούς εμπορίου έχει οδηγήσει στη διαμόρφωση ολοένα και πιο σύνθετων αλυσίδων εφοδιασμού, καθιστώντας την παρακολούθηση, την ασφάλεια και τη λειτουργική αποδοτικότητα των μεταφερόμενων αγαθών, και ιδίως των ευπαθών προϊόντων, ζήτημα κρίσιμης σημασίας. Η διασφάλιση ότι τρόφιμα, φαρμακευτικά και λοιπά προϊόντα ευαίσθητα στη θερμοκρασία διατηρούνται σε κατάλληλες συνθήκες καθ' όλη τη διάρκεια της μεταφοράς και της αποθήκευσης απαιτεί εξειδικευμένες λύσεις εφοδιαστικής αλυσίδας ψυχόμενων προϊόντων, οι οποίες υποστηρίζονται από σύγχρονες τεχνολογίες πληροφορικής. Τα τελευταία χρόνια, η ενσωμάτωση του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT), της τεχνολογίας blockchain και των έξυπνων συστημάτων παρακολούθησης έχει επιφέρει ουσιαστικό μετασχηματισμό στον τρόπο με τον οποίο συλλέγονται, επεξεργάζονται, αποθηκεύονται και διαμοιράζονται τα δεδομένα κατά μήκος της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων έχει επιφέρει ριζικές αλλαγές, επιτρέποντας την παρακολούθηση της θερμοκρασίας, της υγρασίας και άλλων παραμέτρων ποιότητας μέσω αισθητήρων κατά τις φάσεις της μεταφοράς και της αποθήκευσης. Η δικτύωση αισθητήρων μέσω πρωτοκόλλων IoT επιτρέπει στα δεδομένα να ρέουν απρόσκοπτα από συσκευές αιχμής σε πλατφόρμες που βασίζονται στο υπολογιστικό νέφος, όπου μπορούν να αναλυθούν και να απεικονιστούν μέσω διαδραστικών πινάκων ελέγχου. Αυτό όχι μόνο βελτιώνει την επιχειρησιακή αποτελεσματικότητα, αλλά διασφαλίζει επίσης ότι πληρούνται οι νομικές απαιτήσεις που σχετίζονται με την καταγραφή της θερμοκρασίας, την ιχνηλασιμότητα και την ασφάλεια των προϊόντων. Επιπλέον, η ενσωμάτωση φιλικών προς το χρήστη διεπαφών και προσαρμοστικών συστημάτων ειδοποίησης διασφαλίζει ότι τα ενδιαφερόμενα μέρη - από τους παραγωγούς έως τις ρυθμιστικές αρχές - ενημερώνονται άμεσα για τυχόν αποκλίσεις και μπορούν να λάβουν διορθωτικά μέτρα σε πραγματικό χρόνο (Sethi & Sarangi, 2017; Ghiani et al., 2017).

Παράλληλα με το IoT, η τεχνολογία blockchain έχει αναδειχθεί ως ένα ισχυρό εργαλείο για την ασφάλεια, την επικύρωση και την κοινή χρήση δεδομένων σε όλο το οικοσύστημα μιας ψυχρής αλυσίδας. Οι βασικές αρχές της, η αποκέντρωση, η αμετάβλητη φύση και η κρυπτογραφική εμπιστοσύνη, αντιμετωπίζουν μακροχρόνιες προκλήσεις διαφάνειας και αυθεντικότητας δεδομένων. Το Blockchain διευκολύνει την ιχνηλασιμότητα των προϊόντων, ενισχύει τη συμμόρφωση με τη διεθνή νομοθεσία και επιτρέπει την αυτοματοποίηση των διαδικασιών μέσω

έξυπνων συμβολαίων. Ιδιαίτερα στο πλαίσιο της εφοδιαστικής της ψυχρής αλυσίδας, το blockchain μειώνει τους κινδύνους απάτης, διασφαλίζει την λογοδοσία και παρέχει σε όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη μια ενιαία πηγή αλήθειας. Ωστόσο, η υιοθέτησή του φέρνει επίσης προκλήσεις, όπως ζητήματα επεκτασιμότητας, υψηλή κατανάλωση ενέργειας σε ορισμένους μηχανισμούς συναίνεσης και εμπόδια ενσωμάτωσης με τα υπάρχοντα συστήματα διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας (Tian, 2017; Saberi et al., 2019).

Εκτός από τις τεχνολογικές εξελίξεις, το κανονιστικό και νομικό περιβάλλον παίζει καθοριστικό ρόλο στη διαμόρφωση των λειτουργιών της ψυχρής αλυσίδας. Η ευρωπαϊκή και διεθνής νομοθεσία, όπως οι συμφωνίες ATP, ο GDPR για την προστασία των δεδομένων και οι διαδικασίες τελωνειακού ελέγχου, θεσπίζουν αυστηρές υποχρεώσεις σχετικά με την παρακολούθηση της θερμοκρασίας, την τεκμηρίωση και την προστασία των δεδομένων. Η μη συμμόρφωση με αυτές τις απαιτήσεις μπορεί να οδηγήσει σε πρόστιμα, καθυστερήσεις στις αποστολές ή ακόμη και καταστροφή φορτίου, καθιστώντας την τήρηση των προτύπων όχι μόνο νομική υποχρέωση αλλά και επιχειρηματική αναγκαιότητα (Rejeb et al., 2020). Σε αυτό το πλαίσιο, τα έξυπνα συστήματα παρακολούθησης - ενισχυμένα από το IoT και το blockchain - χρησιμεύουν ως κρίσιμοι παράγοντες που καθιστούν δυνατή τη συμμόρφωση και την αποτελεσματικότητα, ευθυγραμμίζοντας την τεχνολογική καινοτομία με τα κανονιστικά πλαίσια.

Η σύγκλιση της παρακολούθησης με δυνατότητα IoT, της ασφάλειας δεδομένων που βασίζεται στο blockchain και των προσαρμοστικών διεπαφών χρήστη παρέχει μια ολιστική προσέγγιση στη σύγχρονη διαχείριση της ψυχρής αλυσίδας. Μαζί, αυτές οι καινοτομίες αντιμετωπίζουν τη διπλή πρόκληση της διασφάλισης της ακεραιότητας των προϊόντων και της συμμόρφωσης με τις νομικές και κανονιστικές απαιτήσεις, βελτιώνοντας παράλληλα τη συνολική αποτελεσματικότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας. Παρ' όλα αυτά, η επιτυχής υιοθέτηση απαιτεί προσεκτική εξέταση των λειτουργικών και μη λειτουργικών απαιτήσεων, της επιλογής αισθητήρων, της αρχιτεκτονικής ροής δεδομένων και του σχεδιασμού αλληλεπίδρασης με τους χρήστες, διασφαλίζοντας ότι η τεχνολογία υποστηρίζει τη λήψη ανθρώπινων αποφάσεων χωρίς να εισάγει περιττή πολυπλοκότητα.

Η εργασία διερευνά, την ιστορική εξέλιξη, τις τεχνολογικές καινοτομίες, τα κανονιστικά πλαίσια και τις πρακτικές εφαρμογές του IoT και του blockchain στην ψυχρή αλυσίδα. Εξετάζει την επιλογή και την ενσωμάτωση αισθητήρων, τη χρήση πρωτοκόλλων IoT για δικτύωση δεδομένων,

τους μηχανισμούς ασφάλειας και διαφάνειας που βασίζονται σε blockchain και τον σχεδιασμό διεπαφών χρήστη και συστημάτων ειδοποιήσεων. Επιπλέον, αξιολογεί τα πλεονεκτήματα και τους περιορισμούς αυτών των τεχνολογιών, αντλώντας από μελέτες περιπτώσεων σε τρόφιμα, φαρμακευτικά προϊόντα και στην ευρύτερη περιοχή των logistics, λαμβάνοντας παράλληλα υπόψη τη συμμόρφωση με την ευρωπαϊκή και διεθνή νομοθεσία. Με αυτόν τον τρόπο, παρέχει μια ολοκληρωμένη επισκόπηση του πώς οι αναδυόμενες τεχνολογίες επαναπροσδιορίζουν την ψυχρή αλυσίδα και διαμορφώνουν το μέλλον των ασφαλών και βιώσιμων παγκόσμιων δικτύων εφοδιασμού.

Στο Κεφάλαιο 1 παρουσιάζεται η βιβλιογραφική ανασκόπηση της ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας, με έμφαση στην ιστορική της εξέλιξη, στις τεχνολογικές προόδους του Διαδικτύου των Πραγμάτων και στις εφαρμογές παρακολούθησης θερμοκρασίας και ποιότητας, ενώ παράλληλα αναλύονται οι διαθέσιμοι αισθητήρες, τα δίκτυα, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας και τα υφιστάμενα λογισμικά, καθώς και αντιπροσωπευτικές μελέτες περίπτωσης από τους τομείς των τροφίμων, των φαρμακευτικών προϊόντων και των logistics. Το Κεφάλαιο 2 επικεντρώνεται στο ευρωπαϊκό και διεθνές νομοθετικό και κανονιστικό πλαίσιο που διέπει τις ψυχόμενες μεταφορές, εξετάζοντας ζητήματα τελωνειακού ελέγχου, υποχρεώσεων καταγραφής θερμοκρασιών, προστασίας δεδομένων και συνεπειών μη συμμόρφωσης. Στο Κεφάλαιο 3 αναλύεται η τεχνολογία blockchain και η συμβολή της στη διασφάλιση της διαφάνειας, της ιχνηλασιμότητας και της ασφάλειας των δεδομένων στην εφοδιαστική αλυσίδα, με ιδιαίτερη αναφορά στα έξυπνα συμβόλαια και στη σύγκρισή της με συμβατικές βάσεις δεδομένων. Το Κεφάλαιο 4 αφορά στην ανάλυση απαιτήσεων και τον σχεδιασμό ενός πρωτοτύπου συστήματος IoT, περιλαμβάνοντας τον προσδιορισμό χρηστών, τη μοντελοποίηση σεναρίων χρήσης και τον σχεδιασμό της αρχιτεκτονικής λογισμικού και υλικού, ενώ το Κεφάλαιο 5 παρουσιάζει την υλοποίηση του συστήματος παρακολούθησης, την επιλογή αισθητήρων, τη δικτύωση, τους μηχανισμούς ασφάλειας μέσω blockchain και τη διεπαφή χρήστη. Τέλος, στο Κεφάλαιο 6 συνοψίζονται τα βασικά συμπεράσματα της εργασίας και αναδεικνύονται τα κύρια οφέλη, οι περιορισμοί και οι μελλοντικές προοπτικές των εξεταζόμενων τεχνολογιών στη σύγχρονη ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα.

Κεφάλαιο 1: Βιβλιογραφική Ανασκόπηση

1.1 Ιστορική αναδρομή της ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας (cold supply chain)

Η ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα αποτελεί κρίσιμο υποσύστημα της σύγχρονης εφοδιαστικής, με ιστορικές ρίζες που ανάγονται στις πρώιμες προσπάθειες διατήρησης ευπαθών προϊόντων μέσω φυσικών μεθόδων ψύξης. Από την αρχαιότητα, κοινωνίες αξιοποιούσαν τον φυσικό πάγο, υπόγειους αποθηκευτικούς χώρους και ειδικά κατασκευασμένα κελάρια για τη συντήρηση τροφίμων, περιορίζοντας την αλλοίωση και επιμηκύνοντας τον χρόνο κατανάλωσης. Οι πρακτικές αυτές, αν και περιορισμένης κλίμακας, έθεσαν τις βάσεις για την κατανόηση της σημασίας της θερμοκρασίας στη διατήρηση της ποιότητας και της ασφάλειας των προϊόντων.

Κατά τον 18ο και 19ο αιώνα, η συστηματική συγκομιδή, αποθήκευση και εμπορική διακίνηση φυσικού πάγου αποτέλεσε το πρώτο οργανωμένο στάδιο της ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας. Η δημιουργία αποθηκών πάγου και η χρήση θερμομονωμένων χώρων αποθήκευσης επέτρεψαν τη διατήρηση ευπαθών αγαθών για μεγαλύτερα χρονικά διαστήματα, διευκολύνοντας τη μεταφορά τους σε αστικές περιοχές με αυξημένες ανάγκες εφοδιασμού (Anonymous, 2024). Η περίοδος αυτή χαρακτηρίζεται από την εξάρτηση από φυσικούς πόρους και γεωγραφικούς περιορισμούς, γεγονός που περιόριζε την κλίμακα και την αξιοπιστία των ψυχόμενων μεταφορών.

Η βιομηχανική επανάσταση σηματοδότησε καθοριστική τομή στην εξέλιξη της ψυχρής αλυσίδας, καθώς η ανάπτυξη μηχανικών συστημάτων ψύξης στα τέλη του 19ου και τις αρχές του 20ού αιώνα αντικατέστησε σταδιακά τις φυσικές μεθόδους. Η εισαγωγή τεχνητής ψύξης επέτρεψε την ακριβέστερη ρύθμιση της θερμοκρασίας, ανεξάρτητα από τις κλιματικές συνθήκες, καθιστώντας δυνατή τη μαζική παραγωγή, αποθήκευση και μεταφορά τροφίμων και φαρμακευτικών προϊόντων. Παράλληλα, η ανάπτυξη ψυκτικών σιδηροδρομικών βαγονιών και πλοίων συνέβαλε στη διεθνοποίηση των αγορών τροφίμων, επιτρέποντας τη διακίνηση νωπών και κατεψυγμένων προϊόντων σε μεγάλες αποστάσεις.

Κατά τον 20ό αιώνα, και ιδιαίτερα μετά τον Β΄ Παγκόσμιο Πόλεμο, η ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα επεκτάθηκε ραγδαία, ακολουθώντας την αύξηση της αστικοποίησης, τη μεταβολή των καταναλωτικών συνηθειών και την ανάπτυξη της βιομηχανίας κατεψυγμένων τροφίμων. Η ευρεία διάδοση των οικιακών ψυγείων, η δημιουργία μεγάλων ψυκτικών αποθηκών και η βελτίωση των

συστημάτων μεταφοράς οδήγησαν στην ενσωμάτωση των ψυχόμενων προϊόντων στην καθημερινή κατανάλωση. Παράλληλα, η αυξανόμενη ανησυχία για τη δημόσια υγεία και την ασφάλεια των τροφίμων οδήγησε στη σταδιακή διαμόρφωση εθνικών και διεθνών κανονιστικών πλαισίων, τα οποία απαιτούσαν ελεγχόμενες και τεκμηριωμένες συνθήκες μεταφοράς (Anonymous, 2024).

Στις τελευταίες δεκαετίες, η επιστημονική έρευνα και η πρακτική εφαρμογή στον τομέα της ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας έχουν στραφεί προς τη βελτιστοποίηση της αποδοτικότητας, του κόστους και της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Σύγχρονες μελέτες υπογραμμίζουν τη σημασία ολοκληρωμένων μοντέλων διαχείρισης, τα οποία λαμβάνουν υπόψη τόσο τις τεχνικές παραμέτρους ψύξης όσο και τις οργανωτικές και λειτουργικές πτυχές της εφοδιαστικής (Shi et al., 2024). Ιδιαίτερη έμφαση δίνεται στη μείωση των απωλειών τροφίμων, στη βελτίωση της ενεργειακής αποδοτικότητας και στην ενίσχυση της ανθεκτικότητας της ψυχρής αλυσίδας απέναντι σε διαταραχές.

Παράλληλα, πρόσφατες βιβλιογραφικές ανασκοπήσεις αναδεικνύουν τη μετάβαση από παραδοσιακά, απομονωμένα συστήματα ψύξης σε ολοκληρωμένες και διασυνδεδεμένες αλυσίδες εφοδιασμού, όπου η πληροφορία αποκτά κεντρικό ρόλο στη λήψη αποφάσεων (Muhammad, et al., 2024). Η ιστορική αυτή εξέλιξη καταδεικνύει ότι η ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα δεν αποτελεί στατικό σύστημα, αλλά ένα δυναμικό πεδίο που εξελίσσεται συνεχώς υπό την επίδραση τεχνολογικών, οικονομικών και κανονιστικών παραγόντων. Το πλαίσιο αυτό δημιουργεί τις προϋποθέσεις για την ενσωμάτωση σύγχρονων ψηφιακών τεχνολογιών, όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων και το blockchain, οι οποίες αναλύονται στις επόμενες ενότητες της παρούσας εργασίας.

1.2 Τεχνολογικές εξελίξεις στο IoT και η επίδρασή τους στη διαχείριση φορτίων

Τα τελευταία χρόνια, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT) έχει μετασηματίσει ουσιαστικά τη διαχείριση φορτίων, προσφέροντας πρωτοφανή επίπεδα ορατότητας, ελέγχου και λειτουργικής βελτιστοποίησης σε όλο το φάσμα των δραστηριοτήτων της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Μία από τις πλέον καθοριστικές εξελίξεις αφορά στην ενσωμάτωση τεχνολογιών παρακολούθησης σε πραγματικό χρόνο, όπως αισθητήρες θερμοκρασίας, υγρασίας, κραδασμών και φωτός, καθώς και τεχνολογίες RFID και GPS, οι οποίες εγκαθίστανται απευθείας σε εμπορευματοκιβώτια, παλέτες και μεταφορικά μέσα. Οι αισθητήρες αυτοί συλλέγουν και μεταδίδουν συνεχώς δεδομένα που αφορούν τόσο στην κατάσταση των εμπορευμάτων όσο και στη χωρική και χρονική τους κίνηση, ενισχύοντας την προληπτική διαχείριση κινδύνων, τη διατήρηση της ποιότητας ευαίσθητων αγαθών (π.χ. νωπά και φαρμακευτικά προϊόντα) και τη συνολική ασφάλεια των μεταφορών.

Ειδικότερα, η παρακολούθηση περιβαλλοντικών παραμέτρων, όπως η θερμοκρασία και η υγρασία, μέσω συστημάτων IoT διασφαλίζει ότι τα ευπαθή φορτία παραμένουν εντός προκαθορισμένων ορίων καθ' όλη τη διάρκεια της μεταφοράς. Παράλληλα, αισθητήρες κραδασμών και φωτός μπορούν να εντοπίσουν ενδείξεις κακομεταχείρισης, μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης ή παραβίασης των φορτίων, προσφέροντας έγκαιρες ειδοποιήσεις στους εμπλεκόμενους φορείς (CCJ Digital, 2024). Η αυξημένη αυτή διαφάνεια δεν ωφελεί μόνο τους παρόχους υπηρεσιών logistics, αλλά και τις ασφαλιστικές εταιρείες φορτίου, οι οποίες δύνανται να βασίζονται σε εμπειρικά καταγεγραμμένα δεδομένα συμβάντων για την ακριβέστερη αξιολόγηση κινδύνου και τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης απαιτήσεων και αποζημιώσεων.

Πέρα από την απλή παρακολούθηση της κατάστασης των φορτίων, το IoT εισάγει νέες δυνατότητες αυτονομίας και αλληλεπίδρασης εντός της εφοδιαστικής αλυσίδας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί η έννοια του «έξυπνου φορτίου», όπως έχει παρουσιαστεί από τη DHL, σύμφωνα με την οποία το ίδιο το φορτίο είναι σε θέση να επικοινωνεί αυτόνομα με τα πληροφοριακά συστήματα, να ενεργοποιεί ειδοποιήσεις βάσει προκαθορισμένων κανόνων και να ενισχύει την ορατότητα από άκρο σε άκρο στην αλυσίδα εφοδιασμού (DHL, 2023). Η εν λόγω παραδειγματική μεταφορά μετασχηματίζει τα φορτία από παθητικά αντικείμενα μεταφοράς σε ενεργούς, επικοινωνιακούς κόμβους ενός ευρύτερου ψηφιακού οικοσυστήματος.

Η ναυτιλία αποτελεί έναν από τους τομείς όπου η υιοθέτηση υποδομών IoT έχει προχωρήσει με ιδιαίτερη δυναμική. Οι Wang και Hsu (2025) αναλύουν πολυεπίπεδες αρχιτεκτονικές IoT που περιλαμβάνουν το επίπεδο αντίληψης (perception layer), το επίπεδο δικτύου (network layer) και το επίπεδο εφαρμογών (application layer) προσαρμοσμένες στις ανάγκες της διαχείρισης θαλάσσιων φορτίων. Μέσω της συνεχούς παρακολούθησης πλοίων και φορτίων σε πραγματικό

χρόνο, της άμεσης ροής πληροφοριών και της αξιοποίησης προηγμένων τεχνικών ανάλυσης δεδομένων, τα συστήματα αυτά συμβάλλουν στη βελτίωση του επιχειρησιακού προγραμματισμού, στη βελτιστοποίηση των δρομολογίων και στη διαχείριση αποθεμάτων. Ως αποτέλεσμα, παρατηρείται μείωση του λειτουργικού κόστους και ταυτόχρονη αναβάθμιση της ποιότητας των παρεχόμενων υπηρεσιών.

Αντίστοιχα σημαντικός είναι ο ρόλος του IoT στην αποθήκευση και τη διαχείριση αποθεμάτων. Πρόσφατες μελέτες καταδεικνύουν ότι η υιοθέτηση τεχνολογιών IoT οδηγεί σε αυξημένη ακρίβεια καταγραφής αποθεμάτων, μείωση των χρόνων παράδοσης παραγγελιών και συνολική ενίσχυση της επιχειρησιακής παραγωγικότητας. Οι Jarašūniene et al. (2023) διερεύνησαν τον αντίκτυπο του Διαδικτύου των Πραγμάτων σε οργανισμούς διαφόρων μεγεθών και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι, παρότι οι δείκτες απόδοσης βελτιώνονται αισθητά, η εφαρμογή του IoT συνοδεύεται και από προκλήσεις. Σε αυτές περιλαμβάνονται το υψηλό αρχικό κόστος επένδυσης, οι αυξημένες απαιτήσεις συντήρησης, η ανάγκη για εξειδικευμένο ανθρώπινο δυναμικό πληροφορικής και η αναγκαιότητα επιχειρησιακής αναδιάρθρωσης.

Ο Oladele (2024) επισημαίνει ότι οι διασυνδεδεμένες συσκευές IoT — όπως αισθητήρες θερμοκρασίας, συστήματα GPS, ετικέτες RFID και έξυπνα οχήματα — παράγουν συνεχείς και πλούσιες ροές δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Τα δεδομένα αυτά, όταν αξιοποιούνται μέσω εργαλείων ανάλυσης, υποστηρίζουν τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης αποθεμάτων, τον αποτελεσματικότερο σχεδιασμό μεταφορών και τη βελτίωση των λειτουργιών αποθήκευσης. Το αποτέλεσμα είναι αυξημένη διαφάνεια, αποδοτικότητα και έλεγχος σε ολόκληρο το φάσμα των διαδικασιών.

Σε στρατηγικό επίπεδο, ο ψηφιακός μετασχηματισμός των εμπορευματικών μεταφορών ενισχύεται σημαντικά από τη συνέργεια του IoT με το cloud computing, την Τεχνητή Νοημοσύνη και την ανάλυση μεγάλων δεδομένων. Μελέτη του Υπουργείου Μεταφορών του Ηνωμένου Βασιλείου ανέδειξε το IoT και το cloud computing ως ώριμες τεχνολογίες που λειτουργούν ως θεμέλιο για τα σύγχρονα συστήματα μεταφορών και logistics, υποστηρίζοντας βελτιωμένη λήψη αποφάσεων, αυξημένη παραγωγικότητα, πιο ανθεκτικές αλυσίδες εφοδιασμού και την ανάπτυξη νέων ψηφιακών επιχειρηματικών μοντέλων (UK Department for Transport, 2018).

Παρά τα σημαντικά οφέλη, η μελέτη αυτή επισημαίνει ότι εξακολουθούν να υφίστανται κρίσιμες προκλήσεις, οι οποίες σχετίζονται με το κόστος ανάπτυξης και συντήρησης των υποδομών,

ζητήματα κυβερνοασφάλειας, ελλείψεις σε επαγγελματικές και ψηφιακές δεξιότητες, καθώς και την απουσία κοινά αποδεκτών προτύπων και διαλειτουργικότητας μεταξύ συστημάτων.

1.3 Εφαρμογές IoT για παρακολούθηση θερμοκρασίας και ποιότητας

Η ραγδαία εξέλιξη του Διαδικτύου των Πραγμάτων (Internet of Things – IoT) έχει εγκαινιάσει μια νέα εποχή στην παρακολούθηση της θερμοκρασίας και της ποιότητας, ιδίως σε αλυσίδες εφοδιασμού που διαχειρίζονται ευπαθή προϊόντα. Η ενσωμάτωση ασύρματων δικτύων αισθητήρων (Wireless Sensor Networks – WSN) και αισθητήρων θερμοκρασίας και υγρασίας με δυνατότητες IoT επιτρέπει τη συνεχή καταγραφή κρίσιμων περιβαλλοντικών παραμέτρων σε όλα τα στάδια της εφοδιαστικής διαδικασίας. Μέσω της συλλογής και μετάδοσης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, καθίσταται δυνατή η έγκαιρη ανίχνευση αποκλίσεων από τα προκαθορισμένα όρια, ενισχύοντας τη συμμόρφωση με ποιοτικά και κανονιστικά πρότυπα και περιορίζοντας τον κίνδυνο αλλοίωσης των προϊόντων.

Χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής αποτελεί η μελέτη του Protopappas (2025), ο οποίος παρουσιάζει ένα οικονομικά προσιτό σύστημα ιχνηλασιμότητας σε πραγματικό χρόνο για αλυσίδες εφοδιασμού αγροδιατροφικών προϊόντων. Το προτεινόμενο σύστημα αξιοποιεί τεχνολογίες IoT και WSN, όπως το LoRaWAN, για τη συνεχή παρακολούθηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας κατά το στάδιο της μεταφοράς τελευταίου μιλίου. Η εφαρμογή αυτή συμβάλλει ουσιαστικά στη διατήρηση τόσο των αισθητικών όσο και των φυσικοχημικών ιδιοτήτων των τροφίμων, μειώνοντας τις απώλειες και βελτιώνοντας τη συνολική ποιότητα των παρατιδόμενων προϊόντων.

Η αξιοποίηση του IoT για την παρακολούθηση θερμοκρασίας επεκτείνεται και σε πιο σύνθετα περιβάλλοντα εφοδιαστικής, όπου απαιτείται υψηλή ακρίβεια και συνεχής έλεγχος. Οι Rajić et al. (2024) προτείνουν ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο προηγμένης παρακολούθησης θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια τόσο της μεταφοράς όσο και της αποθήκευσης. Το προτεινόμενο μοντέλο βασίζεται στην ενσωμάτωση αισθητήρων υψηλής ακρίβειας και σε συστήματα διαχείρισης δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, με στόχο την παροχή συνεχών και αξιόπιστων μετρήσεων σε όλα τα στάδια της εφοδιαστικής αλυσίδας. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει τη διαφάνεια των διαδικασιών και υποστηρίζει την τεκμηριωμένη λήψη αποφάσεων σε επιχειρησιακό επίπεδο.

Ο συνδυασμός των τεχνολογιών IoT με τεχνικές τεχνητής νοημοσύνης ενισχύει περαιτέρω την αποτελεσματικότητα των συστημάτων παρακολούθησης. Οι Wang και Du (2025) αναπτύσσουν ένα σύστημα παρακολούθησης βασισμένο στη συλλογή δεδομένων IoT και στη χρήση μοντέλων πρόβλεψης Long Short-Term Memory (LSTM), σε συνδυασμό με τεχνικές βελτιστοποίησης σμήνους σωματιδίων (Particle Swarm Optimization - PSO). Η προτεινόμενη λύση επιτυγχάνει αυξημένη ακρίβεια στον έλεγχο της θερμοκρασίας και της υγρασίας, η οποία φθάνει έως και το 94%, ενώ παράλληλα επιτυγχάνει μείωση της κατανάλωσης ενέργειας κατά περίπου 20% και περιορισμό του χρόνου μεταφοράς κατά 8,33%. Τα αποτελέσματα αυτά καταδεικνύουν τη δυνατότητα των ευφών συστημάτων IoT να βελτιστοποιούν ταυτόχρονα την ποιότητα και την ενεργειακή αποδοτικότητα των εφοδιαστικών διαδικασιών.

Παρά τα σημαντικά τεχνολογικά οφέλη, η εφαρμογή συστημάτων IoT για παρακολούθηση θερμοκρασίας και ποιότητας συνοδεύεται από ουσιαστικές τεχνικές και λειτουργικές προκλήσεις. Οι Lamberty και Kreyenschmidt (2025) πραγματοποίησαν εκτενή ανασκόπηση, σε συνδυασμό με δοκιμές σε πραγματικές συνθήκες, σε αλυσίδες εφοδιασμού φρούτων και λαχανικών. Τα ευρήματά τους αναδεικνύουν αυστηρές τεχνικές απαιτήσεις, όπως διάρκεια ζωής μπαταρίας τριών έως τεσσάρων εβδομάδων, διαστήματα μέτρησης μικρότερα ή ίσα των δέκα λεπτών και χαμηλά ποσοστά απώλειας δεδομένων (της τάξης του 2%). Αν και η ακρίβεια γεωεντοπισμού και η απόδοση των μπαταριών κρίθηκαν ικανοποιητικές, εντοπίστηκαν αδυναμίες στην αξιοπιστία της μετάδοσης δεδομένων και στη συνολική βιωσιμότητα των συσκευών, γεγονός που υποδεικνύει την ανάγκη περαιτέρω τεχνολογικής βελτίωσης.

Στον τομέα της υγειονομικής εφοδιαστικής, οι εφαρμογές IoT εστιάζουν ιδιαίτερα στην ανάπτυξη οικονομικών και φορητών λύσεων για περιβάλλοντα με περιορισμένες υποδομές. Οι Datta et al. (2024) παρουσιάζουν το σύστημα ALIVE, μια αυτόνομη μονάδα αποθήκευσης εμβολίων εκτός δικτύου, η οποία συνδυάζει παρακολούθηση IoT, ενεργή ψύξη και αλγορίθμους ελέγχου τύπου PID. Το ALIVE παρέχει δυνατότητες παρακολούθησης θερμοκρασίας σε πραγματικό χρόνο, απομακρυσμένης ενεργοποίησης και κοινής χρήσης δεδομένων, προσφέροντας μια κλιμακούμενη και οικονομικά βιώσιμη λύση για την αντιμετώπιση των προκλήσεων παράδοσης στο τελευταίο μίλι.

Τέλος, η αποτελεσματική υιοθέτηση συστημάτων IoT για τη διασφάλιση της θερμοκρασίας και της ποιότητας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την κατανόηση και την αντιμετώπιση των

εμποδίων εφαρμογής. Οι Ahmad et al. (2024) εφαρμόζουν τις μεθοδολογίες ISM-MICMAC και DEMATEL για τον εντοπισμό κρίσιμων παραγόντων που παρεμποδίζουν την ανάπτυξη συστημάτων IoT, όπως ζητήματα κανονιστικής συμμόρφωσης και περιορισμοί των υποδομών. Η ανάλυσή τους αναδεικνύει την ανάγκη συνδυασμένων τεχνολογικών, οργανωτικών και θεσμικών παρεμβάσεων, προκειμένου να επιτευχθεί η βιώσιμη και αποτελεσματική αξιοποίηση του IoT στις σύγχρονες αλυσίδες εφοδιασμού.

1.4 Μελέτες περίπτωσης σε ψυχρές εφοδιαστικές αλυσίδες

Στη βιομηχανία τροφίμων, οι πρόσφατες καινοτομίες υπογραμμίζουν τον τρόπο με τον οποίο τα συστήματα ιχνηλασιμότητας που βασίζονται στο IoT μετασχηματίζουν τις αλυσίδες εφοδιασμού ευπαθών προϊόντων. Ο Protopappas (2025) παρουσιάζει ένα πιλοτικό πρόγραμμα ενός οικονομικά αποδοτικού συστήματος ιχνηλασιμότητας που χρησιμοποιεί ασύρματους αισθητήρες με δυνατότητα LoRaWAN για τη συνεχή παρακολούθηση της θερμοκρασίας και της υγρασίας στην εφοδιαστική αλυσίδα αγροδιατροφής. Η ανάπτυξη κατέδειξε βελτιωμένη ορατότητα, έγκαιρη ανίχνευση ανωμαλιών και ισχυρότερο έλεγχο των περιβαλλοντικών συνθηκών κατά τη μεταφορά. Ομοίως, ένα σύστημα ιχνηλασιμότητας τροφίμων που βασίζεται σε smartphone και δοκιμάστηκε στην κορεατική αλυσίδα εφοδιασμού kimchi αξιοποιεί αισθητήρες RFID και ενσωματωμένους αισθητήρες smartphone, παρακολουθώντας τη θερμοκρασία, την υγρασία και την τοποθεσία σε πραγματικό χρόνο. Αυτή η προσέγγιση βελτίωσε την αποτελεσματικότητα της διαχείρισης δεδομένων και ενισχύει τη διαφάνεια στην ασφάλεια των τροφίμων και την ποιότητα από τον παραγωγό στον καταναλωτή (Syafrudin et al., 2025).

Μεταβαίνοντας στις εφαρμογές ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας σε διακλαδικό επίπεδο, ο Orpenheim (2024) περιγράφει πώς η παρακολούθηση με δυνατότητα IoT αναδιαμορφώνει τη μεταφορά ευπαθών αγαθών. Με μια εντυπωσιακή πρόβλεψη που δείχνει 725.000 μονάδες ψυκτικής αλυσίδας εξοπλισμένες με κυψελοειδή ή δορυφορική παρακολούθηση το 2022 - και προβλέπεται να αυξηθούν σε 1,2 εκατομμύρια έως το 2027 - η ενσωμάτωση του IoT και του cloud παρέχει στους managers εφοδιαστικής ζωντανά δεδομένα σχετικά με τη θερμοκρασία και την τοποθεσία. Αυτό επιτρέπει την προληπτική παρέμβαση, διατηρεί την ακεραιότητα του προϊόντος, μειώνει τα απόβλητα και ενισχύει τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς σε όλα τα τρόφιμα και τα φαρμακευτικά προϊόντα.

Ένα άλλο εφαρμοσμένο παράδειγμα από την JUSDA υπογραμμίζει την ανάπτυξη προηγμένων αισθητήρων IoT και ανάλυσης που βασίζεται στην Τεχνητή Νοημοσύνη, τόσο στην εφοδιαστική τροφίμων όσο και στη φαρμακευτική. Για έναν πελάτη στον τομέα της εφοδιαστικής τροφίμων, η παρακολούθηση της θερμοκρασίας σε πραγματικό χρόνο σε συνδυασμό με τη βελτιστοποιημένη από την τεχνητή νοημοσύνη δρομολόγηση οδήγησε σε βελτιωμένη ποιότητα προϊόντων, ταχύτερες παραδόσεις και χαμηλότερο κόστος. Στον φαρμακευτικό χώρο, η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο σε συνδυασμό με πληροφορίες για τα μεγάλα δεδομένα βελτίωσε τη συμμόρφωση με τους αυστηρούς κανονισμούς, ενίσχυσε τη λειτουργική διαφάνεια και αύξησε την αξιοπιστία της εφοδιαστικής αλυσίδας (JUSDA Global, 2024).

1.5 Ερευνητικές τάσεις στα ευφυή συστήματα παρακολούθησης

Τα τελευταία χρόνια, τα έξυπνα συστήματα παρακολούθησης έχουν εξελιχθεί σημαντικά, κυρίως λόγω των εξελίξεων στο IoT, την τεχνητή νοημοσύνη (AI), την υπολογιστική αιχμής και τις τεχνολογίες δικτύων όπως το 5G. Αυτά τα συστήματα χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο σε τομείς όπως οι έξυπνες πόλεις, η υγειονομική περίθαλψη, η περιβαλλοντική διαχείριση, οι βιομηχανικές λειτουργίες και η προγνωστική συντήρηση. Μια σημαντική τάση είναι η ενσωμάτωση του IoT και της Τεχνητής Νοημοσύνης, όπου τα συνδεδεμένα δίκτυα αισθητήρων παρέχουν ροές δεδομένων που αναλύονται σε πραγματικό χρόνο χρησιμοποιώντας αλγόριθμους μηχανικής μάθησης για την ανίχνευση ανωμαλιών, την πρόβλεψη βλαβών ή τη βελτιστοποίηση της χρήσης ενέργειας. Σύμφωνα με τους Witezak και Szymoniak (2024), τα έξυπνα συστήματα παρακολούθησης σήμερα βασίζονται όχι μόνο σε δυνατότητες ανίχνευσης αλλά και σε καταναμημένη νοημοσύνη και έλεγχο, επιτρέποντας την ανταπόκριση και την αυτονομία.

Σε βιομηχανικές εφαρμογές, η παρακολούθηση χρησιμοποιώντας Τεχνητή Νοημοσύνη έχει αναδειχθεί σε κρίσιμο ερευνητικό αντικείμενο. Οι Kudelina et al. (2021) τονίζουν τη χρήση της μηχανικής μάθησης για την ανίχνευση σφαλμάτων σε ηλεκτρικές μηχανές. Η ανασκόπησή τους δείχνει ότι μοντέλα όπως οι μηχανές διανυσμάτων υποστήριξης (SVM), τα τεχνητά νευρωνικά δίκτυα (ANN) και τα τυχαία δάση χρησιμοποιούνται για τον εντοπισμό πρώιμων σημάδιων υποβάθμισης του κινητήρα.

Μια άλλη τάση αφορά την παρακολούθηση του περιβάλλοντος και των εκπομπών, ειδικά με την ανίχνευση με ενισχυμένη τεχνητή νοημοσύνη. Ο Garcia (2025) περιγράφει πώς τα μοντέλα

τεχνητής νοημοσύνης χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο για τη βελτίωση των συστημάτων παρακολούθησης της ποιότητας του αέρα μέσω της συλλογής δεδομένων, της ανίχνευσης ανωμαλιών και της βραχυπρόθεσμης πρόβλεψης. Ομοίως, οι Wang et al. (2025) επισημαίνουν μια μετατόπιση από τα παραδοσιακά Συστήματα Συνεχούς Παρακολούθησης Εκπομπών (CEMS) σε Συστήματα Προγνωστικής Παρακολούθησης Εκπομπών (PEMS) που βασίζονται σε λογισμικό, τα οποία χρησιμοποιούν τεχνητή νοημοσύνη και στατιστικά μοντέλα για την εκτίμηση των εκπομπών με λιγότερες απαιτήσεις υλικού και μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα.

Η υπολογιστική αιχμή και η παρακολούθηση με επίγνωση της ιδιωτικότητας είναι επίσης ταχέως αναπτυσσόμενοι τομείς. Οι Kim et al. (2023) προτείνουν μια αρχιτεκτονική έξυπνου συστήματος παρακολούθησης που χρησιμοποιεί τεχνητή νοημοσύνη αιχμής για την επεξεργασία και την ανωνυμοποίηση ευαίσθητων δεδομένων, μειώνοντας έτσι την εξάρτηση από κεντρικούς διακομιστές και αντιμετωπίζοντας ανησυχίες για την προστασία των δεδομένων. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό στις εφαρμογές υγειονομικής περίθαλψης και επιτήρησης, όπου η λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο πρέπει να εξισορροπείται με αυστηρή συμμόρφωση με τους κανονισμούς.

Μια κρίσιμη και αναδυόμενη εστίαση είναι η διαχείριση περιβαλλόντων IoT μαζικής κλίμακας, ή MIoT. Οι Cheikh et al. (2025) παρέχουν έναν οδικό χάρτη για την κατασκευή κλιμακωτών, έξυπνων πλαισίων παρακολούθησης που συνδυάζουν Τεχνητή Νοημοσύνη, κατακερματισμό δικτύου και στρατηγικές πράσινης ενέργειας, όπως η συγκομιδή ενέργειας. Η ανασκόπησή τους επισημαίνει την ανάγκη για συλλογική μάθηση, αποκεντρωμένες αρχιτεκτονικές (π.χ., blockchain για ασφάλεια) και υπολογιστική αιχμή για την αποτελεσματική διαχείριση του αυξανόμενου αριθμού συνδεδεμένων συσκευών.

Τέλος, ο Marengo (2024) παρέχει μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση της σύγκλισης AI-IoT, εντοπίζοντας τάσεις όπως η αυτοβελτιστοποίηση, η επίγνωση του περιβάλλοντος και η προσαρμοστική μάθηση. Αυτά τα χαρακτηριστικά επιτρέπουν στα έξυπνα συστήματα παρακολούθησης να προσαρμόζουν δυναμικά τη λειτουργία τους με βάση τις τρέχουσες συνθήκες και στόχους, μειώνοντας περαιτέρω την ανθρώπινη παρέμβαση και ενισχύοντας την αξιοπιστία.

Κεφάλαιο 2: Νομοθετικό και Κανονιστικό Πλαίσιο

2.1 Ευρωπαϊκή και διεθνής νομοθεσία για τη μεταφορά ευπαθών προϊόντων

Τα ευρωπαϊκά και διεθνή νομοθετικά και κανονιστικά πλαίσια διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη διασφάλιση της ακεραιότητας και της ποιότητας των ευπαθών προϊόντων κατά τη μεταφορά τους, καλύπτοντας τόσο τεχνικές όσο και λειτουργικές πτυχές της εφοδιαστικής αλυσίδας. Η ρύθμιση της μεταφοράς τέτοιων αγαθών δεν περιορίζεται μόνο στην προστασία της δημόσιας υγείας, αλλά επεκτείνεται στη διασφάλιση της ιχνηλασιμότητας, της συμμόρφωσης με τεχνικά πρότυπα και της σαφούς κατανομής ευθυνών μεταξύ των εμπλεκόμενων φορέων.

Σε επίπεδο Ευρωπαϊκής Ένωσης, η πολιτική εστιάζει στην εναρμόνιση των συστημάτων μεταφοράς και στη δημιουργία ενιαίων κανόνων που διασφαλίζουν την ομαλή διακίνηση αγαθών εντός της εσωτερικής αγοράς (Directorate for EU affairs, 2025). Το κανονιστικό αυτό πλαίσιο υποστηρίζει ειδικότερα τη μεταφορά ευπαθών προϊόντων, θέτοντας απαιτήσεις που αφορούν τη συσκευασία, την επισήμανση, τις συνθήκες μεταφοράς και τη συμμόρφωση με τη ψυχρή αλυσίδα, ώστε να διατηρείται η ποιότητα των προϊόντων καθ' όλη τη διάρκεια της διακίνησής τους (European Commission, 2024)^a.

Κεντρικό ρόλο στο διεθνές πλαίσιο κατέχει η Συμφωνία ATP (Agreement on the International Carriage of Perishable Foodstuffs and on the Special Equipment to be Used for such Carriage), η οποία υιοθετήθηκε το 1970 υπό την αιγίδα της Οικονομικής Επιτροπής των Ηνωμένων Εθνών για την Ευρώπη (UNECE) και επικαιροποιείται διαρκώς. Η Συμφωνία ATP θεσπίζει δεσμευτικές τεχνικές προδιαγραφές για τον εξοπλισμό μεταφοράς ευπαθών τροφίμων, όπως π.χ. ψυχώμενα και ισοθερμικά οχήματα, καθώς και διαδικασίες πιστοποίησης και περιοδικού ελέγχου. Μέσω της τυποποίησης αυτών των απαιτήσεων, διασφαλίζεται η ομοιόμορφη ταξινόμηση των μεταφορικών μέσων βάσει της θερμοκρασιακής τους απόδοσης και της ψυκτικής τους ικανότητας, προστατεύοντας την ακεραιότητα της ψυχρής αλυσίδας (UNECE, 2024^a; UNECE, 2024^b)

Πέραν των τεχνικών προδιαγραφών εξοπλισμού, ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται στις λειτουργικές διαδικασίες μεταφοράς, ιδίως στον τομέα των αερομεταφορών. Οι Κανονισμοί για τα Ευπαθή Φορτία (Perishable Cargo Regulations – PCR) της Διεθνούς Ένωσης Αερομεταφορών (IATA) παρέχουν εξειδικευμένες οδηγίες για τον σχεδιασμό συσκευασίας, τη σήμανση, την τεκμηρίωση,

τις διαδικασίες χειρισμού και τα πρωτόκολλα κράτησης ευπαθών προϊόντων. Το πλαίσιο αυτό απευθύνεται κυρίως σε επαγγελματίες του κλάδου και αποσκοπεί στη μείωση των λειτουργικών κινδύνων και στην ενίσχυση της συμμόρφωσης σε όλη την εφοδιαστική αλυσίδα αεροπορικών μεταφορών (IATA, 2023).

Σε διεθνές επίπεδο, η Συμφωνία ATP λειτουργεί συμπληρωματικά με άλλες συμβάσεις μεταφοράς. Ενδεικτικά, η Σύμβαση περί της Διεθνούς Οδικής Μεταφοράς Εμπορευμάτων (CMR) ρυθμίζει τη νομική ευθύνη, την τεκμηρίωση και τους συμβατικούς όρους που διέπουν τις οδικές μεταφορές, συμπεριλαμβανομένων των ευπαθών προϊόντων. Το πλαίσιο της CMR καθορίζει σαφώς τα όρια ευθύνης των μεταφορέων και τις υποχρεώσεις τεκμηρίωσης, λειτουργώντας συμπληρωματικά προς τις τεχνικές απαιτήσεις της ATP (ASERS Publishing, 2019).

Παράλληλα, τα εμπορικά πρότυπα και οι συμβατικοί κανόνες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη ρύθμιση της μεταφοράς ευπαθών προϊόντων. Οι Incoterms, που εκδίδονται από το Διεθνές Εμπορικό Επιμελητήριο (ICC), καθορίζουν με σαφήνεια την κατανομή ευθυνών, κόστους και κινδύνου μεταξύ πωλητών και αγοραστών, επηρεάζοντας άμεσα τον τρόπο οργάνωσης της μεταφοράς και της ασφάλισης ευπαθών φορτίων (Number Analytics, 2025).

Στον τομέα της ασφάλειας τροφίμων, διεθνή πρότυπα όπως το ISO 22000 και το International Featured Standards (IFS) λειτουργούν ως σημεία αναφοράς για τη διαχείριση της ασφάλειας και της ποιότητας σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού. Τα πρότυπα αυτά δεν περιορίζονται στη φάση της παραγωγής, αλλά επεκτείνονται στη μεταφορά και αποθήκευση, ενισχύοντας τη συμμόρφωση με τις απαιτήσεις της ψυχρής αλυσίδας και υποστηρίζοντας την ιχνηλασιμότητα των διαδικασιών (ISO, 2018).

Συνολικά, το ισχύον ευρωπαϊκό και διεθνές πλαίσιο για τη μεταφορά ευπαθών προϊόντων συγκροτεί ένα πολυεπίπεδο σύστημα κανόνων που συνδυάζει τεχνικούς κανονισμούς (ATP), λειτουργικές οδηγίες (IATA PCR), συμβατικές ρυθμίσεις (CMR, Incoterms) και πρότυπα ασφάλειας τροφίμων (ISO 22000, IFS). Η συμμόρφωση με το πλαίσιο αυτό αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για τις επιχειρήσεις, καθώς συμβάλλει στη διατήρηση της ποιότητας των προϊόντων, στην προστασία της υγείας των καταναλωτών και στην αποφυγή σημαντικών νομικών και οικονομικών συνεπειών.

2.2 Ανάλυση κανονισμών Schengen και CEFTA σε σχέση με τις ψυχόμενες μεταφορές

Εντός του ευρωπαϊκού τοπίου, η μεταφορά ευπαθών αγαθών με ψυγεία πρέπει να ακολουθεί όχι μόνο τεχνικά πρότυπα όπως η Συμφωνία ATP, αλλά και περιφερειακούς τελωνειακούς κανόνες και κανόνες διαμετακόμισης που διαμορφώνονται από συμφωνίες όπως η Σένγκεν και η CEFTA. Η Ζώνη Σένγκεν, επιτρέποντας την κυκλοφορία χωρίς διαβατήριο στα περισσότερα κράτη της ΕΕ και της ΕΖΕΣ, προσφέρει ένα απρόσκοπτο περιβάλλον για τη διαμετακόμιση ευαίσθητων στη θερμοκρασία φορτίων μέσω οδικών και σιδηροδρομικών γραμμών, ελαχιστοποιώντας αποτελεσματικά τις καθυστερήσεις στις επιθεωρήσεις στα εσωτερικά σύνορα. Αυτό διευκολύνει τη διατήρηση της ακεραιότητας της ψυχρής αλυσίδας σε πολλές χώρες, κάτι κρίσιμο για τις μεταφορές ευπαθών αγαθών. Ωστόσο, πέρα από τη διαχείριση των συνόρων, οι κανονισμοί ATP παραμένουν θεμελιώδεις: επιβάλλουν τεχνικά πρότυπα μόνωσης οχημάτων, πρωτόκολλα πιστοποίησης και κριτήρια θερμικής απόδοσης - απαραίτητα για τη συμμόρφωση των μεταφορών με ψυγεία σε ολόκληρο το Σένγκεν και πέραν αυτού (CSI-SPA, 2025; UNECE, 2024^a).

Για τις χώρες της Νοτιοανατολικής Ευρώπης, η Συμφωνία Ελεύθερων Συναλλαγών της Κεντρικής Ευρώπης (CEFTA) παίζει καθοριστικό ρόλο. Η CEFTA διασφαλίζει προτιμησιακά δασμολογικά καθεστώτα (preferential tariff arrangements) και τυποποιημένες τελωνειακές διαδικασίες μεταξύ των μελών της, συμπεριλαμβανομένων των αγαθών υπό διαμετακόμιση (CEFTA, 2021). Αν και δεν αφορούν συγκεκριμένα ψυγμένα φορτία, τα πρωτόκολλα της CEFTA για την προσωρινή εισαγωγή, την ελευθερία διέλευσης και την ομοιόμορφη τεκμηρίωση εκτελωνισμού επιτρέπουν στα ψυγεία οχήματα να διασχίζουν αποτελεσματικά τα σύνορα των μελών - κάτι κρίσιμο για τα ευπαθή αγαθά, των οποίων η ποιότητα εξαρτάται από την ταχεία και αδιάλειπτη μεταφορά (CEFTA, 2021, Άρθρα 11–12).

Κατά τη διάρκεια της πανδημίας COVID-19, η πρωτοβουλία Πράσινοι Διάδρομοι/Πράσινες Λωρίδες στο πλαίσιο της CEFTA κατέδειξε περαιτέρω την περιφερειακή προσαρμοστικότητα. Αυτός ο μηχανισμός επέτρεψε την ιεράρχηση προτεραιοτήτων στην ταχεία τελωνειακή επεξεργασία για βασικά αγαθά -συμπεριλαμβανομένων των ιατρικών και ευπαθών προϊόντων- αξιοποιώντας την ηλεκτρονική ανταλλαγή δεδομένων πριν από την άφιξη (CEFTA 2025).

Παρά τα οφέλη αυτά, η έλλειψη ειδικής ρύθμισης ψύξης εντός της CEFTA σημαίνει ότι η συμμόρφωση με τα τεχνικά πρότυπα εξακολουθεί να βασίζεται σε μεγάλο βαθμό στους κανόνες ATP. Έτσι, ο συντονισμός της πιστοποίησης εξαπλισμού ATP με τις πολιτικές διευκόλυνσης των τελωνείων της CEFTA καθίσταται απαραίτητος για την αποτελεσματική ψυχρή εφοδιαστική στη Νοτιοανατολική Ευρώπη.

2.3 Διαδικασίες τελωνειακού ελέγχου για εμπορεύματα ευπαθούς φύσης

Οι τελωνειακές αρχές σε όλο τον κόσμο αναγνωρίζουν ότι τα ευπαθή αγαθά - όπως τα φρέσκα προϊόντα, τα κρέατα, τα γαλακτοκομικά ή τα φαρμακευτικά προϊόντα - αλλοιώνονται γρήγορα χωρίς την κατάλληλη διαχείριση. Όπως ορίζεται στη Συμφωνία Διευκόλυνσης του Εμπορίου του ΠΟΕ, το Άρθρο 7.9 ορίζει ότι μόλις πληρούνται οι κανονιστικές απαιτήσεις, τα ευπαθή αγαθά πρέπει να αποδεσμεύονται το συντομότερο δυνατό, ακόμη και εκτός του κανονικού ωραρίου εργασίας όταν είναι απαραίτητο. Αυτή η διάταξη δίνει επίσης έμφαση στην προτεραιότητα στις ευπαθείς αποστολές κατά τους ελέγχους και στην πρόσβαση σε εγκεκριμένες εγκαταστάσεις αποθήκευσης εν αναμονή του εκτελωνισμού, για την πρόληψη της απώλειας υλικών και την προστασία της ποιότητας (WTO, 2019).

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η διαδικασία εκτελωνισμού για τις εισαγωγές - συμπεριλαμβανομένων των ευπαθών - είναι ιδιαίτερα δομημένη. Οι εισαγωγείς πρέπει να λάβουν αριθμό εγγραφής και αναγνώρισης οικονομικών φορέων (EORI) και να υποβάλουν απαραίτητα έγγραφα όπως εμπορικά τιμολόγια, φορτωτικές, πιστοποιητικά προέλευσης και, ανάλογα με το εμπορικό καθεστώς, τελωνειακές διασαφηνίσεις όπως το Ενιαίο Διοικητικό Έγγραφο (ΕΔΕ) (European Commission, 2025). Για αγαθά που προέρχονται από ζώα ή ζωικά προϊόντα, χρησιμοποιούνται συστήματα όπως το TRACES (Trade Control and Exports System) για τη δημιουργία και τη διαχείριση υποχρεωτικών υγειονομικών και κτηνιατρικών πιστοποιητικών, την παρακολούθηση της διασυνοριακής κίνησης των αποστολών και την ενεργοποίηση ειδοποιήσεων σε πραγματικό χρόνο σε περίπτωση κινδύνων για την υγεία (European Commission, 2024)^b.

Οι βασικές λειτουργικές πρακτικές για τους εμπλεκόμενους φορείς στην ψυχρή αλυσίδα πρέπει επίσης να ευθυγραμμίζονται με τις τελωνειακές απαιτήσεις: τα αρχεία καταγραφής θερμοκρασίας, η σωστή συσκευασία και η σαφής επισήμανση είναι απαραίτητα. Η τεκμηρίωση μπορεί να

χρειαστεί να περιλαμβάνει υγειονομικά ή φυτοϋγειονομικά πιστοποιητικά και απόδειξη ελέγχου θερμοκρασίας κατά τη διαμετακόμιση. Οι αποκλίσεις ή η μη συμμόρφωση μπορούν να οδηγήσουν σε καθυστερημένο εκτελωνισμό, πρόστιμα ή ακόμη και στην μη αποδοχή της αποστολής (DHL, 2023).

Οι μεταφορείς εμπορευμάτων και οι επαγγελματίες της εφοδιαστικής τονίζουν ότι ένας ομαλός εκτελωνισμός εξαρτάται από την προετοιμασία: Μια λίστα ελέγχου συμμόρφωσης για τις απαιτήσεις που αφορούν τον συγκεκριμένο προορισμό, η συνεργασία με εξειδικευμένους συνεργάτες με γνώσεις στις εισαγωγές ψυχρής αλυσίδας, η ψηφιοποίηση εγγράφων και η διασφάλιση της ορατότητας της ψυχρής αλυσίδας από άκρο σε άκρο, είναι απαραίτητα για την ελαχιστοποίηση των καθυστερήσεων που διαβρώνουν την ποιότητα των ευπαθών προϊόντων (Zarach Logistics, 2025).

Πολλές τελωνειακές ζώνες προσφέρουν πλέον αναστολή δασμών, όπως ειδικές τελωνειακές αποθήκες όπου τα ευπαθή εμπορεύματα μπορούν να περνούν υπό τελωνειακό έλεγχο χωρίς άμεσες πληρωμές δασμών και ΦΠΑ. Αυτός ο ευέλικτος μηχανισμός βοηθά την ροή της εφοδιαστικής αλυσίδας και την χρηματοοικονομική διαχείριση (I.C.E. Transport, 2025).

2.4 Υποχρεώσεις καταγραφής θερμοκρασιών

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, η παρακολούθηση και η καταγραφή των θερμοκρασιών σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού τροφίμων ταχείας κατάψυξης είναι υποχρεωτική. Ο κανονισμός (ΕΚ) αριθ. 37/2005 της Επιτροπής απαιτεί τα μέσα μεταφοράς και αποθήκευσης να είναι εξοπλισμένα με όργανα που παρακολουθούν τη θερμοκρασία του αέρα σε συχνά και τακτά χρονικά διαστήματα. Αυτά τα όργανα πρέπει να συμμορφώνονται με τα εναρμονισμένα ευρωπαϊκά πρότυπα (EN12830, EN13485 και EN13486). Επιπλέον, τα αρχεία των μετρήσεων θερμοκρασίας πρέπει να διατηρούνται για τουλάχιστον ένα έτος ή περισσότερο, με βάση τη διάρκεια ζωής του τροφίμου (European Commission, 2005).

Πέρα από τα κατεψυγμένα τρόφιμα, η ευρύτερη νομοθεσία για την υγιεινή των τροφίμων βάσει του κανονισμού (ΕΚ) αριθ. 853/2004, σε συνδυασμό με τον κανονισμό (ΕΚ) αριθ. 852/2004, ορίζει ότι οι υπεύθυνοι επιχειρήσεων τροφίμων πρέπει να εφαρμόζουν τον έλεγχο της θερμοκρασίας ως κρίσιμη πρακτική υγιεινής. Οι επιχειρήσεις υποχρεούνται να εφαρμόζουν τις

αρχές της Ανάλυσης Κινδύνων και των Κρίσιμων Σημείων Ελέγχου (HACCP), συμπεριλαμβανομένων των διαδικασιών παρακολούθησης και καταγραφής, των διορθωτικών ενεργειών και της διατήρησης τεκμηρίωσης ανάλογης με τη φύση και το μέγεθος της επιχείρησης (European Parliament and Council, 2004).

Για τον φαρμακευτικό τομέα, οι διεθνείς οδηγίες θέτουν ένα πολύ αυστηρότερο πρότυπο. Το Παράρτημα 9 του Παγκόσμιου Οργανισμού Υγείας για τα ευαίσθητα στο χρόνο και τη θερμοκρασία φαρμακευτικά προϊόντα (TTSPPs) ορίζει ότι τα περιβάλλοντα αποθήκευσης και μεταφοράς πρέπει να είναι διαμορφωμένα κατάλληλα και να παρακολουθούνται συνεχώς. Οι συσκευές καταγραφής πρέπει να διατηρούν τη θερμοκρασία και την υγρασία εντός των καθορισμένων τιμών (π.χ. ακρίβεια $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$), να καταγράφουν τουλάχιστον έξι μετρήσεις ανά ώρα και να λειτουργούν απρόσκοπτα κατά τη διάρκεια διακοπών ρεύματος. Τα αρχεία πρέπει να τηρούνται και να είναι προσβάσιμα, με τις διαδικασίες για συστήματα συναγερμού, βαθμονόμηση και διορθωτικές ενέργειες να τεκμηριώνονται δεόντως (WHO, 2011).

Οι οδηγίες του Ηνωμένου Βασιλείου για τα ψυχόμενα φαρμακευτικά προϊόντα επιβάλλουν την καθημερινή παρακολούθηση της ελάχιστης και μέγιστης θερμοκρασίας, βαθμονομημένες συσκευές καταγραφής, αναθεωρημένα αρχεία ανά αποστολή και τεκμηριωμένες διορθωτικές ενέργειες σε περίπτωση αποκλίσεων (Todd, 2016).

Στις διεθνείς μεταφορές, όπως οι αεροπορικές μεταφορές ευπαθών προϊόντων, οι Κανονισμοί Ευπαθών Φορτίων (PCR) της IATA συνιστούν έντονα την τυποποιημένη καταγραφή της θερμοκρασίας. Αν και δεν αποτελούν επίσημη νομική απαίτηση, αυτοί οι κανονισμοί χρησιμεύουν ως βέλτιστη πρακτική του κλάδου, περιγράφοντας λεπτομερώς τα βήματα συσκευασίας, χειρισμού και καταγραφής - συμπεριλαμβανομένης της τοποθέτησης κατάλληλων συσκευών παρακολούθησης της θερμοκρασίας στις αποστολές για τη διατήρηση της ακεραιότητας του προϊόντος καθ' όλη τη διάρκεια της μεταφοράς (IATA, 2023).

Σε εθνικό επίπεδο βιομηχανίας, το Σουηδικό Συμβούλιο για την Αλυσίδα Εφοδιασμού Ψυγμένων και Κατεψυγμένων Προϊόντων δημοσιεύει εθελοντικές αλλά επιδραστικές οδηγίες με τίτλο «Σωστή Θερμοκρασία κατά την Αποθήκευση και τη Μεταφορά Ψυγμένων και Κατεψυγμένων Τροφίμων». Αυτές συμβουλεύουν για προγράμματα αυτοπαρακολούθησης με τεκμηριωμένες διαδικασίες από την αποβάθρα του παραγωγού έως την αποβάθρα παραλαβής του λιανοπωλητή, δίνοντας έμφαση στην ασφάλεια των τροφίμων, τη διασφάλιση της ποιότητας και την

ιχνηλασιμότητα - με καταγεγραμμένες απαιτήσεις θερμοκρασίας σε βασικά σημεία ελέγχου (Swedish Food Retailer Federation, 2021).

Στις Ηνωμένες Πολιτείες, κανόνας του FDA σχετικά με την υγειονομική μεταφορά τροφίμων (2016) εγκατέλειψε τις προδιαγραφόμενες εντολές για συσκευές συνεχούς παρακολούθησης της θερμοκρασίας. Αντ' αυτού, επιτρέπει ευέλικτες ρυθμίσεις όπου οι αποστολείς και οι μεταφορείς συμφωνούν σε κατάλληλα συστήματα παρακολούθησης. Συγκεκριμένα, εάν εντοπιστεί απόκλιση θερμοκρασίας, πρέπει να καταγραφεί διορθωτική ενέργεια από ένα αρμόδιο μέρος πριν συνεχιστεί η διανομή (U.S. FDA, 2016).

2.5 GDPR: Νομικές απαιτήσεις, ασφάλεια δεδομένων και προστασία απορρήτου

Ο Γενικός Κανονισμός για την Προστασία Δεδομένων - ΓΚΠΔ (General Data Protection Regulation -GDPR), επίσημα γνωστός ως Κανονισμός (ΕΕ) 2016/679, είναι το πιο ολοκληρωμένο νομικό πλαίσιο της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη διασφάλιση της προστασίας των δεδομένων, της ιδιωτικότητας και της ασφάλειας. Ο GDPR, ο οποίος τέθηκε σε ισχύ από τις 25 Μαΐου 2018, ισχύει για όλους τους οργανισμούς —εντός και εκτός ΕΕ— που επεξεργάζονται τα προσωπικά δεδομένα των κατοίκων της ΕΕ. Ο βασικός στόχος του είναι η εναρμόνιση των νόμων περί προστασίας δεδομένων σε ολόκληρη την Ευρώπη, παρέχοντας παράλληλα στα άτομα μεγαλύτερο έλεγχο επί των προσωπικών τους πληροφοριών. Στον πυρήνα του GDPR βρίσκονται αρκετές θεμελιώδεις αρχές που περιλαμβάνουν τη νομιμότητα, τη δικαιοσύνη και τη διαφάνεια, τον περιορισμό του σκοπού, την ελαχιστοποίηση των δεδομένων, την ακρίβεια, τον περιορισμό της αποθήκευσης, καθώς και την ακεραιότητα και την εμπιστευτικότητα. Αυτές οι αρχές ορίζονται στο Άρθρο 5 του κανονισμού και πρέπει να ενσωματώνονται σε όλες τις δραστηριότητες επεξεργασίας δεδομένων που αναλαμβάνονται από τους υπευθύνους επεξεργασίας και τους εκτελούντες την επεξεργασία (Voigt & Von dem Bussche, 2017).

Η νομική συμμόρφωση με τον ΓΚΠΔ απαιτεί από τους οργανισμούς να προσδιορίζουν και να τεκμηριώνουν τη νομική βάση για την επεξεργασία δεδομένων προσωπικού χαρακτήρα βάσει του Αρθρου 6. Αυτή περιλαμβάνει τη συγκατάθεση του υποκειμένου των δεδομένων, την αναγκαιότητα για την εκτέλεση μιας σύμβασης, τη συμμόρφωση με μια νομική υποχρέωση, την προστασία ζωτικών συμφερόντων, την εκτέλεση μιας εργασίας που εκτελείται προς το δημόσιο

συμφέρον ή τα έννομα συμφέροντα που επιδιώκει ο υπεύθυνος επεξεργασίας. Επιπλέον, οι λειτουργίες επεξεργασίας δεδομένων υψηλού κινδύνου -ιδίως εκείνες που περιλαμβάνουν μεγάλης κλίμακας χρήση ευαίσθητων δεδομένων, βιομετρική ταυτοποίηση ή δημιουργία προφίλ- απαιτούν Εκτίμηση Επιπτώσεων στην Προστασία Δεδομένων (ΕΕΠΔ) βάσει του Άρθρου 35. Οι οργανισμοί πρέπει επίσης να εφαρμόζουν την Προστασία Δεδομένων από Σχεδιασμό και από Προεπιλογή (Άρθρο 25), η οποία τους υποχρεώνει να ενσωματώνουν ελέγχους απορρήτου στα συστήματα επεξεργασίας δεδομένων από την αρχή (Tikkinen-Piri et al., 2018).

Σχετικά με το θέμα της ασφάλειας δεδομένων, το Άρθρο 32 του ΓΚΠΔ ορίζει ότι οι υπεύθυνοι επεξεργασίας και οι επεξεργαστές δεδομένων εφαρμόζουν «τεχνικά και οργανωτικά μέτρα» για να επιτύχουν ένα επίπεδο ασφάλειας κατάλληλο για την αντιμετώπιση του κινδύνου. Αυτά μπορεί να περιλαμβάνουν κρυπτογράφηση, ψευδωνυμοποίηση, ελέγχους πρόσβασης, δημιουργία αντιγράφων ασφαλείας δεδομένων, ανθεκτικότητα συστήματος και τακτικές δοκιμές ασφαλείας. Ο κανονισμός απαιτεί επίσης ένα σαφώς καθορισμένο σχέδιο αντιμετώπισης περιστατικών: οποιαδήποτε παραβίαση προσωπικών δεδομένων που είναι πιθανό να οδηγήσει σε κίνδυνο για τα ατομικά δικαιώματα πρέπει να αναφέρεται στην αρμόδια εποπτική αρχή εντός 72 ωρών από την στιγμή που γίνεται αντιληπτή, σύμφωνα με το Άρθρο 33 (Albrecht, 2016). Επιπλέον, όταν οι παραβιάσεις ενέχουν υψηλό κίνδυνο, τα επηρεαζόμενα άτομα πρέπει επίσης να ενημερώνονται χωρίς αδικαιολόγητη καθυστέρηση (Άρθρο 34).

Ο ΓΚΠΔ ενισχύει τα ατομικά δικαιώματα απορρήτου, δίνοντας στα υποκείμενα των δεδομένων τη δυνατότητα πρόσβασης στα προσωπικά τους δεδομένα (Άρθρο 15), αιτήματος διόρθωσης (Άρθρο 16), αιτήματος διαγραφής ή «δικαίωμα στη λήθη» (Άρθρο 17) και περιορισμού ή αντίρρησης σε ορισμένες μορφές επεξεργασίας δεδομένων (Άρθρα 18 και 21). Εισάγει επίσης το δικαίωμα στη φορητότητα των δεδομένων (Άρθρο 20), επιτρέποντας στα άτομα να μεταφέρουν τα δεδομένα τους μεταξύ παρόχων υπηρεσιών σε μορφή αναγνώσιμη από μηχανήματα. Οι οργανισμοί πρέπει επίσης να παρέχουν σαφείς, συνοπτικές και διαφανείς ειδοποιήσεις περί απορρήτου στα υποκείμενα των δεδομένων (Άρθρο 12), οι οποίες να περιγράφουν λεπτομερώς τον σκοπό της συλλογής δεδομένων, τη νομική βάση, την περίοδο αποθήκευσης και τα στοιχεία επικοινωνίας του Υπεύθυνου Προστασίας Δεδομένων (DPO), όπου εφαρμόζεται (Goddard, 2017).

Από την άποψη της επιβολής του νόμου, ο GDPR παρέχει στις εποπτικές αρχές την εξουσία να επιβάλλουν αυστηρά διοικητικά πρόστιμα. Για λιγότερο σοβαρές παραβάσεις, τα πρόστιμα

μπορούν να φτάσουν τα 10 εκατομμύρια ευρώ ή το 2% του συνολικού ετήσιου κύκλου εργασιών μιας εταιρείας, ενώ για πιο σοβαρές παραβιάσεις (όπως η παραβίαση των δικαιωμάτων των υποκειμένων των δεδομένων ή η μη τήρηση των αρχών νόμιμης επεξεργασίας), το ανώτατο όριο αυξάνεται στα 20 εκατομμύρια ευρώ ή το 4% του συνολικού ετήσιου κύκλου εργασιών - όποιο από τα δύο είναι υψηλότερο. Αξιοσημείωτες περιπτώσεις επιβολής του νόμου περιλαμβάνουν το πρόστιμο των 1,2 δισεκατομμυρίων ευρώ του 2023 κατά της Meta Platforms Ireland για παράνομες διασυνοριακές μεταφορές δεδομένων, γεγονός που υπογραμμίζει την εκτεταμένη ισχύ και την ευρεία εφαρμογή του κανονισμού (Cory & Castro, 2023).

Ο ΓΚΠΔ όχι μόνο έχει διαμορφώσει την ευρωπαϊκή νομοθεσία, αλλά έχει επίσης επηρεάσει τις παγκόσμιες τάσεις στην προστασία δεδομένων, κάτι που συχνά αναφέρεται ως «Φαινόμενο των Βρυξελλών». Χώρες όπως η Βραζιλία (LGPD), η Ινδία (Νόμος DPDP) και περιοχές στις Ηνωμένες Πολιτείες (π.χ. CCPA και CPRA της Καλιφόρνια) έχουν εμπνευστεί από τη δομή και τις αρχές του ΓΚΠΔ, ενισχύοντας τον ρόλο του ως παγκόσμιου σημείου αναφοράς (Bradford, 2020). Ωστόσο, ενώ ο κανονισμός έχει βελτιώσει σημαντικά την προστασία της ιδιωτικής ζωής, οι επικριτές υποστηρίζουν ότι η εφαρμογή του είναι ασυνεπής και συχνά καθυστερεί, ειδικά σε διεθνείς έρευνες που αφορούν τεχνολογικούς γίγαντες. Ο κατακερματισμός των κανονισμών και η έλλειψη πόρων σε ορισμένες αρχές προστασίας δεδομένων έχουν αναφερθεί ως προκλήσεις για την πλήρη εφαρμογή του (Gellert, 2021).

2.6 Επιπτώσεις μη συμμόρφωσης – πρόστιμα, καθυστερήσεις, καταστροφή φορτίων

Οι οργανισμοί που δεν συμμορφώνονται με τους κανονισμούς για τη μεταφορά ευπαθών και ψυχόμενων αγαθών αντιμετωπίζουν σοβαρές επιπτώσεις, οι οποίες κυμαίνονται από οικονομικές κυρώσεις έως διαταραχές της αλυσίδας εφοδιασμού, απώλεια ευαίσθητων φορτίων και πλήγμα στη φήμη τους.

Πρώτον, η μη συμμόρφωση με τα τελωνεία, όπως η λανθασμένη τεκμηρίωση ή η λανθασμένη ταξινόμηση αγαθών, συχνά οδηγεί σε σημαντικά πρόστιμα, καθυστερήσεις, ελέγχους, ακόμη και κατάσχεση φορτίου. Για παράδειγμα, η PwC (2025) σημειώνει ότι τα πρόστιμα μπορούν να κυμαίνονται από 5% έως 30% της αξίας του φορτίου όταν οι τελωνειακοί κανονισμοί δεν τηρούνται σωστά. Μόνο στις ΗΠΑ, η Υπηρεσία Τελωνείων και Προστασίας των Συνόρων

εισέπραξε πάνω από 4,3 δισεκατομμύρια δολάρια σε πρόστιμα, κατασχέσεις κ.λπ. σε ένα έτος, υπογραμμίζοντας τη σοβαρότητα της μη συμμόρφωσης. Επιπλέον, τέτοιες παραβάσεις μπορούν να προκαλέσουν διαταραχή της αλυσίδας εφοδιασμού, πυροδοτώντας επαναλαμβανόμενους ελέγχους, αναδρομικούς δασμούς και δεσμεύσεις αποστολών (DHL, 2023).

Οι καθυστερήσεις στα σύνορα μπορούν να επιδεινώσουν δυσανάλογα την κατάσταση των ευπαθών αγαθών, των οποίων η βιωσιμότητα είναι χρονικά ευαίσθητη. Η Παγκόσμια Τράπεζα εκτιμά ότι μόλις λίγες ημέρες καθυστέρησης στα τελωνεία μπορούν να μειώσουν την αξία των ευπαθών εξαγωγών έως και 15%, λόγω του κινδύνου αλλοίωσης και της μειωμένης διάρκειας ζωής (Zarach Logistics, 2025). Το πρόσθετο κόστος, συμπεριλαμβανομένων των τελών τελωνειακής αποθήκης, επίσης αυξάνεται γρήγορα (Visigistics, 2025).

Στην πράξη, οι παραβιάσεις της συμμόρφωσης με τις απαιτήσεις της ψυχρής αλυσίδας - όπως ο ανεπαρκής έλεγχος θερμοκρασίας ή η χρήση δυσλειτουργικών δοχείων - συχνά οδηγούν σε ολική απώλεια φορτίου. Επιπλέον, η βλάβη του εξοπλισμού, η κακή προετοιμασία, το ανθρώπινο λάθος ή οι καθυστερήσεις στη φόρτωση/εκφόρτωση συμβάλλουν σε μεγάλο βαθμό σε αυτές τις απώλειες (Wollett, 2023).

Τα εμπειρικά δεδομένα επιβεβαιώνουν αυτούς τους κινδύνους. Μια μελέτη που εξέτασε 1.816 περιπτώσεις ψυχρής αλυσίδας μεταξύ 2015-2018 διαπίστωσε ότι οι παραβιάσεις των προδιαγραφών της ψυχρής αλυσίδας αντιπροσώπευαν το 35% όλων των περιστατικών (Klorott, 2019).

Πέρα από τα αλλοιωμένα προϊόντα και τις χαμένες πωλήσεις, η κακή διαχείριση της ψυχρής μεταφοράς συνεπάγεται κρυφό κόστος, όπως κανονιστικά πρόστιμα, απώλειες αποθεμάτων και ζημία στη φήμη. Ιδιαίτερα σε ρυθμιζόμενες αγορές όπως η Αυστραλία, τέτοιες αποτυχίες μπορούν ακόμη και να οδηγήσουν σε κλείσιμο επιχειρήσεων σε ακραίες περιπτώσεις (Cannon Logistics, 2025).

Κεφάλαιο 3: Τεχνολογίες Blockchain και Διασφάλιση Διαφάνειας στην Εφοδιαστική Αλυσίδα

3.1 Εισαγωγή στην τεχνολογία Blockchain και βασικές αρχές

Η τεχνολογία Blockchain έχει αναδειχθεί ως μια πρωτοποριακή καινοτομία που στηρίζει την εμπιστοσύνη στα αποκεντρωμένα συστήματα χωρίς να βασίζεται σε αξιόπιστους μεσάζοντες. Ουσιαστικά, ένα blockchain είναι ένα καταναμημένο ψηφιακό βιβλίο καταγραφής στο οποίο κάθε μπλοκ περιέχει δεδομένα συναλλαγών με χρονική σήμανση και είναι κρυπτογραφικά συνδεδεμένο με το προηγούμενο μπλοκ. Αυτό καθιστά τα δεδομένα αμετάβλητα, διαφανή και ανθεκτικά στην παραβίαση (Dong, 2023; Yaga et al., 2018). Στην πραγματικότητα, μόλις μια συναλλαγή καταγραφεί, δεν μπορεί να τροποποιηθεί αναδρομικά χωρίς να τροποποιηθούν όλα τα επόμενα μπλοκ και να επιτευχθεί συναίνεση δικτύου - μια σκόπιμα δύσκολη και απαιτητική σε πόρους διαδικασία (Yaga et al., 2018).

Στον πυρήνα του, το blockchain λειτουργεί σε ένα αποκεντρωμένο, peer-to-peer δίκτυο κόμβων. Κάθε κόμβος διατηρεί ένα αντίγραφο του βιβλίου καταγραφής, το οποίο ενισχύει την ανθεκτικότητα και την ασφάλεια - δεν υπάρχει μοναδικό σημείο αποτυχίας και καμία κεντρική αρχή που να διέπει το σύστημα (Blockapps, 2024; Yaga et al., 2018). Οι συναλλαγές διαδίδονται σε όλο το δίκτυο και δεσμεύονται σε ένα νέο μπλοκ μόνο αφού επικυρωθούν βάσει ενός μηχανισμού συναίνεσης. Κοινοί μηχανισμοί περιλαμβάνουν την Απόδειξη Εργασίας (PoW) και την Απόδειξη Συμμετοχής (PoS), οι οποίες διασφαλίζουν συμφωνία σχετικά με την κατάσταση του blockchain μεταξύ των καταναμημένων συμμετεχόντων, αποτρέποντας παράλληλα την απάτη και το πρόβλημα της διπλής δαπάνης (Blockapps, 2024).

Η αρχή της αμετάβλητης φύσης της τεχνολογίας Blockchain ενισχύεται μέσω της χρήσης κρυπτογραφικών συναρτήσεων κατακερματισμού. Κάθε μπλοκ περιέχει ένα μοναδικό αποτύπωμα κατακερματισμού που περιλαμβάνει το κατακερματισμό του προηγούμενου μπλοκ, συνδέοντας την αλυσίδα με ασφάλεια. Οποιαδήποτε προσπάθεια παραβίασης ενός μπλοκ θα ακυρώσει αυτόματα ολόκληρη την αλυσίδα, καθιστώντας την αναδρομική τροποποίηση σχεδόν αδύνατη (Yaga et al., 2018; Blockapps, 2024).

Μια άλλη θεμελιώδης έννοια είναι τα έξυπνα συμβόλαια, ένας αυτοεκτελούμενος κώδικας ενσωματωμένος στο blockchain που επιβάλλει αυτόματα κάποιους συμβατικούς όρους μόλις

πληρούνται οι συγκεκριμένες συνθήκες. Αυτά τα προγραμματιζόμενα συμβόλαια μειώνουν την ανάγκη για μεσάζοντες, ενώ παράλληλα επιτρέπουν την αυτοματοποιημένη, διαφανή εκτέλεση συναλλαγών (Singh & Kumar, 2021).

Τα συστήματα Blockchain μπορούν να κατηγοριοποιηθούν ως δημόσια (ανοιχτά σε οποιονδήποτε συμμετέχοντα) ή ιδιωτικά (περιορισμένα σε εξουσιοδοτημένα μέρη). Αυτή η διάκριση επηρεάζει τη διακυβέρνηση, την ιδιωτικότητα και την επεκτασιμότητα τους: τα δημόσια blockchain δίνουν προτεραιότητα στην «ανοιχτότητα» και την αποκέντρωση, ενώ οι ιδιωτικές εκδόσεις συχνά προσφέρουν καλύτερη απόδοση, συμμόρφωση και έλεγχο πρόσβασης σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα (Singh & Kumar, 2021; Yaga et al., 2018).

Παρά το ότι είναι πολλά υποσχόμενο, το Blockchain αντιμετωπίζει προκλήσεις - οι κυριότερες από αυτές είναι οι περιορισμοί επεκτασιμότητας, η υψηλή κατανάλωση ενέργειας (ειδικά για τους μηχανισμούς PoW) και η πολύπλοκη διακυβέρνηση σε μεγάλες εφαρμογές (An et al., 2023; Singh & Kumar, 2021). Ωστόσο, η ικανότητα της αρχιτεκτονικής να παρέχει ασφαλείς, ανθεκτικές σε παραβιάσεις, διαφανείς και αυτοματοποιημένες λειτουργίες την καθιστά ελκυστική - ιδιαίτερα για εφαρμογές όπως χρηματοοικονομικές συναλλαγές, παρακολούθηση αλυσίδας εφοδιασμού, επαλήθευση ταυτότητας και άλλα (Tripathi, 2023; An et al., 2023).

3.2 Εφαρμογή Blockchain στην ιχνηλασιμότητα ψυχόμενων προϊόντων (traceability)

Η τεχνολογία Blockchain έχει αναδειχθεί ως ένα ισχυρό εργαλείο για τη διασφάλιση της ιχνηλασιμότητας των προϊόντων, δημιουργώντας αποκεντρωμένα, αμετάβλητα και διαφανή συστήματα παρακολούθησης σε διάφορους κλάδους. Μια συστηματική ανασκόπηση από τον Jia (2024) υπογραμμίζει ότι το Blockchain ενισχύει την ιχνηλασιμότητα σε τομείς όπως η ασφάλεια των τροφίμων, τα φαρμακευτικά προϊόντα και οι αλυσίδες εφοδιασμού ενέργειας, ξεπερνώντας τους παραδοσιακούς περιορισμούς όπως η παραποίηση δεδομένων, οι κίνδυνοι συγκεντρωτικότητας και η έλλειψη διαφάνειας. Η μελέτη καταδεικνύει πώς τα βασικά χαρακτηριστικά του Blockchain - αποκέντρωση, αμετάβλητος χαρακτήρας και έξυπνα συμβόλαια - υποστηρίζουν την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και την οικοδόμηση εμπιστοσύνης μεταξύ των ενδιαφερόμενων μερών, αναγνωρίζοντας παράλληλα προκλήσεις όπως το υψηλό κόστος, οι περιορισμοί κλιμάκωσης και η πολυπλοκότητα εφαρμογής.

Η συνεργασία της Walmart με την IBM αποτελεί ορόσημο στην ιχνηλασιμότητα ψυχόμενων τροφίμων που βασίζεται στο Blockchain. Χρησιμοποιώντας ένα σύστημα Hyperledger Fabric, η Walmart μείωσε τους χρόνους ιχνηλασιμότητας για τα μάνγκο από 7 ημέρες σε μόλις 2,2 δευτερόλεπτα και επέκτεινε την ορατότητα σε διάφορα προϊόντα, συμπεριλαμβανομένων των φυλλωδών λαχανικών και του χοιρινού κρέατος. Αυτή η πρωτοβουλία κατέδειξε πώς το Blockchain επιταχύνει τις διαδικασίες ανάκλησης, ενισχύει την ασφάλεια των τροφίμων και αυξάνει τη διαφάνεια σε πολύπλοκες αλυσίδες εφοδιασμού (LFDE Decentralized Trust, 2022).

Ευρύτερα στοιχεία του κλάδου υποστηρίζουν επίσης τα οφέλη της ιχνηλασιμότητας του Blockchain. Οι Bosona και Gebresenbet (2023) δείχνουν ότι τα συστήματα ιχνηλασιμότητας που βασίζονται στο Blockchain μειώνουν τα περιστατικά απώλειας και ανάκλησης τροφίμων, ενισχύουν τον ποιοτικό έλεγχο και χτίζουν την εμπιστοσύνη των καταναλωτών. Η εργασία τους δίνει έμφαση στην ευθυγράμμιση του Blockchain με τους στόχους βιώσιμης ανάπτυξης, ιδίως εκείνους που αφορούν την επισιτιστική ασφάλεια, την υγεία και την υπεύθυνη κατανάλωση. Ομοίως, ο Testi (2023) παρουσιάζει μια εμπειρική μελέτη για τις ιταλικές ΜΜΕ που χρησιμοποιούν Blockchain για την πιστοποίηση προϊόντων "Made in Italy". Αυτές οι επιχειρήσεις αξιοποιούν δημόσια hashes Blockchain εγγράφων εκτός αλυσίδας για να επαληθεύσουν την προέλευση τους, ενισχύοντας τη διαφάνεια και την εμπιστοσύνη των καταναλωτών στις ψυχόμενες αλυσίδες εφοδιασμού.

3.3 Συστήματα αποθήκευσης και διαμοιρασμού δεδομένων

Τα σύγχρονα συστήματα αποθήκευσης και κοινής χρήσης δεδομένων καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα — από κεντρικές υποδομές υπολογιστικού νέφους (cloud) έως εξελιγμένα αποκεντρωμένα δίκτυα — καθένα από τα οποία έχει σχεδιαστεί για να ανταποκρίνεται στις αυξανόμενες απαιτήσεις για επεκτασιμότητα, ασφάλεια, έλεγχος δεδομένων και συνεργασία. Στα οικοσυστήματα που επικεντρώνονται στο υπολογιστικό νέφος, η διασφάλιση της ακεραιότητας, της εμπιστευτικότητας και της διαθεσιμότητας των δεδομένων παραμένει θεμελιώδης. Οι Huang et al. (2014) παρέχουν μια εκτενή επισκόπηση της ασφάλειας αποθήκευσης στο υπολογιστικό νέφος, επισημαίνοντας αναδυόμενες μεθόδους όπως τα συστήματα Proofs of Retrievability (PoR), Provable Data Possession (PDP) και Third Party Auditing (TPA), που ενισχύουν την αξιοπιστία σε αποθετήρια δεδομένων εκτός του φυσικού χώρου μιας επιχείρησης.

Καθώς η πολυπλοκότητα των πλαισίων κοινής χρήσης αυξάνεται, ο Zhu (2025) περιγράφει λεπτομερώς ένα μοντέλο ασφαλούς κοινής χρήσης δεδομένων επτά φάσεων. Καλύπτει τη δημιουργία, την κρυπτογράφηση, τη μετάδοση, την αποθήκευση, την κοινή χρήση, την αποκρυπτογράφηση και την τελική καταστροφή δεδομένων. Το πλαίσιο δίνει έμφαση στους μηχανισμούς κρυπτογράφησης — συμπεριλαμβανομένης της κρυπτογράφησης με δυνατότητα αναζήτησης, της επανακρυπτογράφησης μέσω proxy και της κρυπτογράφησης βάσει χαρακτηριστικών — και υπογραμμίζει απειλές όπως η παραβίαση κλειδιών, η διαρροή δεδομένων, και η παραβίαση σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής των δεδομένων.

Τα αποκεντρωμένα δίκτυα αποθήκευσης με χρήση Blockchain έχουν αναδειχθεί ως συναρπαστικές εναλλακτικές λύσεις. Ο Merlec (2024) διεξήγαγε μια συγκριτική ανάλυση αποκεντρωμένων πλατφορμών όπως το InterPlanetary File System (IPFS), Filecoin, Arweave, Sia, Storj και άλλες. Αυτές οι πλατφόρμες ενισχύουν τον έλεγχο των δεδομένων (data sovereignty), την αμετάβλητη φύση και τον έλεγχο των χρηστών. Αντιμετωπίζουν τις παγίδες της συγκέντρωσης δεδομένων και προσφέρουν αναπαραγωγή, αποτελεσματική πρόσβαση και ενσωματωμένη λογοδοσία ως βασικά πλεονεκτήματα. Συμπληρώνοντας, οι Nguyen et al. (2023) εξετάζουν αρχιτεκτονικές και εφαρμογές κοινής χρήσης δεδομένων που βασίζονται σε Blockchain. Προτείνουν μια αρχιτεκτονική αναφοράς και εξετάζουν εφαρμογές σε διάφορους τομείς (συμπεριλαμβανομένων των μεταφορών) εντοπίζοντας οφέλη όπως η διαφάνεια και η εμπιστοσύνη, μαζί με προκλήσεις στην επεκτασιμότητα, την ιδιωτικότητα και τη διαχείριση του όγκου δεδομένων.

Τα ασφαλή συστήματα κοινής χρήσης αρχείων που βασίζονται σε τεχνολογίες κατακευματισμένης αποθήκευσης κερδίζουν επίσης έδαφος. Οι Huang et al. (2022) παρουσιάζουν μια υβριδική προσέγγιση που συνδυάζει το Blockchain με το IPFS, εφαρμόζοντας έλεγχο πρόσβασης μέσω proxy, έτσι ώστε μόνο εξουσιοδοτημένα μέλη ομάδας να μπορούν να έχουν πρόσβαση σε κοινόχρηστο περιεχόμενο. Αυτός ο σχεδιασμός αντιμετωπίζει τους περιορισμούς στα εγγενή στοιχεία ελέγχου πρόσβασης του IPFS και υποστηρίζει μηχανισμούς ελέγχου πρόσβασης βασισμένους σε ομάδες χρηστών.

3.4 Πλεονεκτήματα έναντι συμβατικών βάσεων δεδομένων

Η τεχνολογία Blockchain προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα σε σύγκριση με τις συμβατικές κεντρικές βάσεις δεδομένων, ιδιαίτερα σε τομείς όπου η εμπιστοσύνη, η ακεραιότητα των δεδομένων και η διαφάνεια είναι κρίσιμες. Ένα από τα θεμελιώδη πλεονεκτήματά της είναι η αποκέντρωση: σε αντίθεση με τις παραδοσιακές βάσεις δεδομένων που διατηρούνται από μία μόνο αρχή, το Blockchain επιτυγχάνει κατανομημένη αποθήκευση σε καθολικό σε πολλαπλούς συμμετέχοντες κόμβους. Αυτή η δομή εξαλείφει τα μεμονωμένα σημεία αποτυχίας και μειώνει τα συστημικά τρωτά σημεία, ενισχύοντας την ανθεκτικότητα και μειώνοντας τους κινδύνους απώλειας ή χειραγώγησης δεδομένων (Islam & Aru, 2024; IBM, 2019).

Ένα ακόμα πλεονέκτημα είναι η εγγενής αμετάβλητη φύση του Blockchain. Μόλις προστεθούν δεδομένα σε ένα μπλοκ και επιβεβαιωθούν, η τροποποίηση ή η διαγραφή τους καθίσταται υπολογιστικά απαγορευτική. Αυτή η αμετάβλητη φύση εξασφαλίζει ένα ιστορικό αρχείο ανθεκτικό σε παραβιάσεις - ένα επίπεδο ελεγκτικής ικανότητας που οι παραδοσιακές βάσεις δεδομένων με λειτουργίες CRUD (Δημιουργία, Ανάγνωση, Ενημέρωση, Διαγραφή) δεν μπορούν να φτάσουν (PixelPlex, 2024; 101Blockchains, 2021).

Η διαφάνεια και η ιχνηλασιμότητα είναι πρόσθετα βασικά πλεονεκτήματα. Σε ένα δίκτυο Blockchain, οι συναλλαγές είναι ορατές (τουλάχιστον στους συμμετέχοντες που έχουν λάβει άδεια), επιτρέποντας την επαλήθευση σε πραγματικό χρόνο, ενισχύοντας την εμπιστοσύνη χωρίς μεσάζοντες. Τα παραδοσιακά συστήματα, αντίθετα, συνήθως δεν έχουν τέτοια ορατότητα, εκτός εάν είχαν σχεδιαστεί διαφορετικά (IBM, 2019; Islam & Aru, 2024).

Από άποψη ασφάλειας, το Blockchain χρησιμοποιεί κρυπτογραφικούς μηχανισμούς επικύρωσης και συναίνεσης για την προστασία της ακεραιότητας των δεδομένων, καθιστώντας το εξαιρετικά ανθεκτικό στην παραβίαση από κακόβουλους παράγοντες. Οι κεντρικές βάσεις δεδομένων, αντίθετα, μπορούν να παραβιαστούν μέσω επιθέσεων στην κεντρική τους αρχή ή τον διαχειριστή τους (PixelPlex, 2024; 101Blockchains, 2021).

Οι δυνατότητες αυτοματοποίησης του Blockchain, ειδικά μέσω έξυπνων συμβολαίων, επιτρέπουν την αυτοεκτέλεση συμφωνιών που ενεργοποιούνται από προγραμματισμένες συνθήκες, διευκολύνοντας διαδικασίες όπως οι ροές εργασίας συναλλαγών ή η λειτουργία της αλυσίδας

εφοδιασμού χωρίς μεσάζοντες. Οι παραδοσιακές βάσεις δεδομένων συνήθως εξαρτώνται από χειροκίνητα ή τρίτα συστήματα ενεργοποίησης για την αυτοματοποιημένη υλοποίηση της επιχειρησιακής λογικής (PixelPlex, 2024).

3.5 Έξυπνα συμβόλαια

Τα έξυπνα συμβόλαια -αυτοεκτελούμενα κομμάτια κώδικα που λειτουργούν σε πλατφόρμες Blockchain- έχουν γίνει ένα ισχυρό εργαλείο για την αυτοματοποίηση διαδικασιών και την ειδοποίηση σε πραγματικό χρόνο, προσφέροντας αξιοπιστία, διαφάνεια και αποτελεσματικότητα στις επιχειρηματικές δραστηριότητες. Αυτά τα συμβόλαια εκτιμούν αυτόματα προκαθορισμένες ενέργειες όταν πληρούνται ορισμένες συνθήκες, εξαλείφοντας την χειροκίνητη παρέμβαση και μειώνοντας την πιθανότητα ανθρώπινου λάθους.

Στον αυτοματισμό επιχειρηματικών διαδικασιών, τα έξυπνα συμβόλαια ενσωματώνονται με τις υπάρχουσες ροές εργασίας για την ενίσχυση της αποδοτικότητας. Μια ολοκληρωμένη τεχνική μελέτη στο επιχειρηματικό περιβάλλον της Ουκρανίας διαπίστωσε ότι ο αυτοματισμός έξυπνων συμβάσεων βελτίωσε την αξιοπιστία των διαδικασιών, μείωσε το κόστος και υποστήριξε την καινοτομία εντός των επιχειρήσεων. Η έρευνα συνέκρινε πλατφόρμες κωδικοποίησης, αξιολόγησε γλώσσες για την ανάπτυξη έξυπνων συμβάσεων και διεξήγαγε μια ανάλυση SWOT, καταδεικνύοντας τον πιθανό αντίκτυπό τους στην αυτοματοποίηση εσωτερικών λειτουργιών (Chikov et al., 2023).

Όταν συνδυάζονται με τεχνητή νοημοσύνη (AI), τα έξυπνα συμβόλαια γίνονται ακόμη πιο προσαρμοστικά. Πρόσφατη μελέτη διερευνά πώς τα έξυπνα συμβόλαια μπορούν να αξιοποιήσουν την Τεχνητή Νοημοσύνη για να χειριστούν σύνθετες διαδικασίες λήψης αποφάσεων, προγνωστικές εργασίες και λειτουργίες ευαίσθητες στο περιβάλλον σε χρηματοοικονομικές υπηρεσίες, στην υγειονομική περίθαλψη και στη διαχείριση αποθεμάτων. Σε τέτοια συστήματα, τα μοντέλα Τεχνητής Νοημοσύνης ενισχύουν την ανταπόκριση των έξυπνων συμβολαίων, μετατρέποντάς τα σε συμβόλαια που όχι μόνο επιβάλλουν κανόνες αλλά προσαρμόζονται και βελτιστοποιούνται με βάση τα εισερχόμενα δεδομένα (IRJMETS, 2025).

Στην εφοδιαστική αλυσίδα, τα έξυπνα συμβόλαια προσφέρουν άμεση λειτουργική αποτελεσματικότητα και αυτοματοποιημένες ειδοποιήσεις. Για παράδειγμα, εάν οι

περιβαλλοντικοί αισθητήρες (όπως οι συσκευές παρακολούθησης θερμοκρασίας) ανιχνεύσουν αποκλίσεις, τα έξυπνα συμβόλαια μπορούν να επισημάνουν αυτόματα ένα πρόβλημα, να αποδεσμεύσουν κεφάλαια ή να ξεκινήσουν διορθωτικές διαδικασίες - χωρίς να απαιτείται ανθρώπινη εποπτεία. Αυτό διασφαλίζει την ταχεία απόκριση σε συμβάντα που θα μπορούσαν να επηρεάσουν την ακεραιότητα ή τη συμμόρφωση του προϊόντος (NatLawReview, 2021).

Επιπλέον, τα έξυπνα συμβόλαια μπορούν να συντονίσουν ροές εργασίας πολλαπλών μερών. Τα «έξυπνα έξυπνα συμβόλαια», όπως περιγράφονται σε καινοτόμα μοντέλα εφοδιαστικής αλυσίδας, όχι μόνο αυτοματοποιούν την εκτέλεση των συμβάσεων, αλλά και εξισορροπούν την αποζημίωση και το κόστος μεταξύ διαφορετικών ενδιαφερόμενων μερών της εφοδιαστικής αλυσίδας. Η ανάπτυξη ή ρύθμιση τέτοιων συμβάσεων ενισχύει την εμπιστοσύνη, μειώνει την εξάρτηση από κεντρικούς διαμεσολαβητές και βελτιστοποιεί τις συνεργατικές λειτουργίες (Bottoni et al., 2020).

Σε ρυθμιζόμενα περιβάλλοντα όπως οι χρηματοπιστωτικές υπηρεσίες, τα έξυπνα συμβόλαια μειώνουν σημαντικά το κόστος συναλλαγών και τον χρόνο επεξεργασίας αυτοματοποιώντας τις πληρωμές και τον έλεγχο πρόσβασης, ενώ παράλληλα παράγουν αμετάβλητα αρχεία. Η χρήση τους στα αποκεντρωμένα χρηματοοικονομικά (DeFi) υπογραμμίζει την αξία τους στην απλοποίηση πολύπλοκων διαδικασιών χωρίς μεσάζοντες (Affleck, 2022).

Τα έξυπνα συμβόλαια αποτελούν μια ενδιαφέρουσα προσέγγιση για την ενσωμάτωση συστημάτων αυτοματισμού και έγκαιρων ειδοποιήσεων απευθείας σε ψηφιακά συστήματα. Από την αυτοματοποίηση των ροών εργασίας και την ενσωμάτωση της Τεχνητής Νοημοσύνης για βελτιωμένη λήψη αποφάσεων έως τη δημιουργία έγκαιρων ειδοποιήσεων με βάση δεδομένα αισθητήρων και τον εντοπισμό της συνεργασίας πολλών μερών στις αλυσίδες εφοδιασμού, τα έξυπνα συμβόλαια μειώνουν τις τριβές και ενισχύουν την ανταπόκριση σε πραγματικό χρόνο σε όλους τους κλάδους.

3.6 Το Blockchain ως μέσο αποτροπής απάτης και παραποίησης δεδομένων

Το Blockchain προσφέρει μια μετασχηματιστική λύση για την πρόληψη της απάτης και της παραποίησης δεδομένων, ενσωματώνοντας την αμετάβλητη φύση του, τη διαφάνεια και την αποκέντρωση στον πυρήνα της καταγραφής δεδομένων. Η κατανομημένη αρχιτεκτονική του

διασφαλίζει ότι μόλις καταγραφούν οι πληροφορίες, δεν μπορούν να τροποποιηθούν ή να διαγραφούν χωρίς ανίχνευση, μειώνοντας σημαντικά τον κίνδυνο παραποίησης και μη εξουσιοδοτημένων τροποποιήσεων - μια ουσιαστική άμυνα κατά της απάτης (Duan, 2024; Damco Group, 2025).

Σε ευαίσθητα περιβάλλοντα εφοδιαστικής αλυσίδας, όπως η εφοδιαστική τροφίμων και τα φαρμακευτικά προϊόντα, το blockchain ενισχύει την ιχνηλασιμότητα και την ακεραιότητα των δεδομένων. Διασφαλίζοντας επαληθεύσιμα, αμετάβλητα αρχεία σε όλο τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος, ενισχύει την ανθεκτικότητα έναντι δόλιων δραστηριοτήτων (Karaduman et al., 2025). Οι αποκεντρωμένοι μηχανισμοί χρονικής σήμανσης, όπου τα hashes δεδομένων καταγράφονται στην αλυσίδα, καθιστούν την αναδρομική παραποίηση σχεδόν ανέφικτη (Yiu, 2021; Yaga et al., 2018).

Το Blockchain παίζει επίσης καθοριστικό ρόλο στις τεχνολογίες ανίχνευσης απάτης. Θέτει τις βάσεις για ασφαλή, απαραβίαστα αρχεία καταγραφής δεδομένων που χρησιμεύουν ως αξιόπιστο θεμέλιο για προηγμένες αναλύσεις, χρήση τεχνητής νοημοσύνης και μοντέλων μηχανικής μάθησης που στοχεύουν στον εντοπισμό απάτης χωρίς να βασίζονται σε κεντρικά, δυνητικά παραβιασμένα δεδομένα (Chris, 2025).

Κεφάλαιο 4: Ανάλυση Απαιτήσεων και Σχεδίαση Πρωτοτύπου Εφαρμογής IoT

4.1 Προσδιορισμός χρηστών της εφαρμογής: αποστολείς, παραλήπτες, τελωνεία

Σε περιβάλλοντα εφοδιαστικής αλυσίδας και τελωνείων που χρησιμοποιείται η τεχνολογία Blockchain, η ταυτοποίηση είναι ζωτικής σημασίας για τη διασφάλιση της εμπιστοσύνης, της λογοδοσίας και της ιδιωτικότητας μεταξύ διαφόρων ενδιαφερόμενων μερών - όπως οι αποστολείς (εξαγωγείς), οι παραλήπτες (εισαγωγείς ή καταναλωτές) και οι τελωνειακές αρχές. Το Blockchain διευκολύνει μέσω αποκεντρωμένων πλαισίων ταυτοποίησης, αξιοποιώντας τεχνολογίες όπως τα Decentralized Identifiers (DID), τα Verifiable Credentials (VC) και την αμετάβλητη καταγραφή καθολικού μητρώου.

Στο πλαίσιο λειτουργίας του Διαδικτύου των Πραγμάτων - ανάλογα με την παρακολούθηση αγαθών ή και τις συσκευές επικύρωσης - η ταυτοποίηση που βασίζεται στο Blockchain διασφαλίζει ότι οι οντότητες (π.χ. αισθητήρες, αποστολείς) μπορούν να επαληθεύουν τις συναλλαγές χωρίς να βασίζονται σε κεντρικές αρχές, εξασφαλίζοντας έτσι τόσο την ασφάλεια όσο και το απόρρητο. Για παράδειγμα, οι Sousa et al. (2025) διαπιστώνουν ότι συστήματα που υποστηρίζονται από Blockchain, όπως το Sovrin και το UniqueID, εξισορροπούν αποτελεσματικά την ιδιωτικότητα, τη χρηστικότητα και τις απαιτήσεις που αφορούν συγκεκριμένα το IoT, καθιστώντας τα πολλά υποσχόμενες θεμελιώδεις πλατφόρμες για αποκεντρωμένη ταυτοποίηση. Ομοίως, οι Ramírez-Gordillo et al. (2025) προτείνουν ένα πλαίσιο ταυτοποίησης χρησιμοποιώντας DID και VC για να διασφαλίσουν την ιδιωτικότητα για κόμβους IoT - ουσιαστικά, παράγοντες σε αλυσίδες εφοδιασμού ή συστήματα διασυνοριακού ελέγχου.

Εστιάζοντας στις τελωνειακές λειτουργίες, ένα παράδειγμα του πώς το Blockchain μπορεί να διασφαλίσει τις δηλώσεις αποστολέα διατηρώντας παράλληλα την ιδιωτικότητα είναι το σύστημα DEFenD. Σε αυτόν τον σχεδιασμό, οι οικονομικοί φορείς υποβάλλουν κρυπτογραφημένες δηλώσεις σχετικά με το περιεχόμενο των εμπορευματοκιβωτίων, προσβάσιμες μόνο από την τελωνειακή υπηρεσία προορισμού. Εν τω μεταξύ, τα μεταδεδομένα σχετικά με τα ίδια τα εμπορευματοκιβώτια είναι δημόσια επαληθεύσιμα - επιτρέποντας στις τελωνειακές αρχές να διεξάγουν αξιολογήσεις κινδύνου χωρίς να αποκαλύπτουν ιδιόκτητα δεδομένα (Vos et al., 2018).

Η διαδικασία ταυτοποίησης που βασίζεται σε blockchain ενισχύει επίσης τα πλαίσια ελέγχου στα οικοσυστήματα IoT, επιτρέποντας σε συσκευές -συμπεριλαμβανομένων εκείνων που χρησιμοποιούνται από αποστολείς ή παρόχους υπηρεσιών logistics- να καταχωρούν και να επαληθεύουν ταυτότητες με τρόπο που είναι επαληθεύσιμος. Οι Almarrí et al. (2024) υπογραμμίζουν πώς τα αποκεντρωμένα, αμετάβλητα χαρακτηριστικά του blockchain μπορούν να διασφαλίσουν αξιόπιστη επαλήθευση ταυτότητας και να αποτρέψουν την χειραγώγηση δεδομένων σε δίκτυα IoT που σχετίζονται με τις αλυσίδες εφοδιασμού.

Επιπλέον, οι Wang et al. (2025) παρουσιάζουν το EBIAS, ένα σύστημα ελέγχου ταυτότητας που βασίζεται σε blockchain και βασίζεται στην κρυπτογραφία. Σχεδιασμένο για IoT, το EBIAS υποστηρίζει ασφαλή και αποτελεσματικά πρωτόκολλα επικύρωσης ταυτότητας - σημαντικά για να διασφαλιστεί ότι μόνο οι πιστοποιημένοι αποστολείς, μεταφορείς ή τελωνειακοί πράκτορες μπορούν να συμμετέχουν σε ροές εργασίας εφοδιαστικής που υποστηρίζονται από blockchain.

4.2 Ανάλυση λειτουργικών και μη λειτουργικών απαιτήσεων

Ο προσεκτικός διαχωρισμός και η ανάλυση των λειτουργικών απαιτήσεων (FR) και των μη λειτουργικών απαιτήσεων (NFR) είναι θεμελιώδης για την παροχή αξιόπιστων, αποτελεσματικών και συντηρήσιμων λύσεων. Οι λειτουργικές απαιτήσεις ορίζουν τι πρέπει να κάνει το σύστημα - συγκεκριμένες συμπεριφορές ή εργασίες όπως η επαλήθευση χρήστη, η επεξεργασία δεδομένων, οι ροές εργασίας, η αναφορά και η ενσωμάτωση εξωτερικών συστημάτων (AltexSoft, 2023).

Αντίθετα, οι μη λειτουργικές απαιτήσεις ορίζουν τον τρόπο με τον οποίο το σύστημα θα πρέπει να εκτελεί αυτές τις λειτουργίες - περιλαμβάνοντας ιδιότητες όπως απόδοση, ασφάλεια, αξιοπιστία, επεκτασιμότητα, χρηστικότητα, συντηρησιμότητα και συμβατότητα.

Η εξισορρόπηση των FR και των NFR είναι κρίσιμης σημασίας. Ενώ ένα σύστημα μπορεί τεχνικά να λειτουργεί χωρίς να πληροί τους NFR, η ανεπαρκής απόδοση, η χαμηλή χρηστικότητα ή η ελλιπής ασφάλεια μπορούν να οδηγήσουν σε δυσαρέσκεια των χρηστών, βλάβες συστήματος ή ευπάθειες (Ironhack, 2024). Εμπειρικές μελέτες υπογραμμίζουν ότι η παράβλεψη των NFR μπορεί να οδηγήσει σε ανακατασκευή του συστήματος, δαπανηρές αλλαγές σχεδιασμού και προβλήματα στη φάση ανάπτυξης, εάν δεν ληφθούν υπόψη νωρίς (Dongmo, 2024; Shankar, 2020).

Η ανάλυση των NFR καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής ανάπτυξης λογισμικού παραμένει μια πρόκληση. Ο Dongmo (2024) αποκαλύπτει ότι οι περισσότερες πρωτοβουλίες NFR επικεντρώνονται στη φάση της καταγραφής απαιτήσεων, ενώ πολύ λίγες επεκτείνονται στο σχεδιασμό και την υλοποίηση - ένα κενό που αφήνει τα συστήματα ευάλωτα σε ζητήματα ποιότητας. Επιπλέον, οι NFR συχνά δεν είναι επαρκώς τεκμηριωμένες - οι Robiolo et al. (2019) διαπίστωσαν ότι κρίσιμα χαρακτηριστικά όπως η συντηρησιμότητα, η αξιοπιστία, η χρηστικότητα και η απόδοση συχνά παραλείπονται από τις προδιαγραφές, παρά το γεγονός ότι αναγνωρίζονται ως σημαντικά.

Μια ευρύτερη ανασκόπηση της βιβλιογραφίας από τους De Martino et al. (2025) κατηγοριοποιεί τους τύπους των NFR που μελετήθηκαν και εντοπίζει τις συνεχείς προκλήσεις στην ταξινόμηση και τον χειρισμό τους κατά την ανάπτυξη. Εν τω μεταξύ, οι Werner et al. (2021) εξετάζουν πώς οι σύγχρονες πρακτικές (π.χ., Agile, DevOps) επηρεάζουν τη διαχείριση των NFR, σημειώνοντας τη χρήση μετρήσεων και αυτοματοποιημένης παρακολούθησης για την υποστήριξη της διασφάλισης ποιότητας σε πραγματικό χρόνο. Η εμφάνιση εργαλείων Τεχνητής Νοημοσύνης προσφέρει πολλά υποσχόμενη υποστήριξη για αυτό το πολύπλοκο τοπίο. Οι Almonte et al. (2025) καταδεικνύουν πώς τα μεγάλα γλωσσικά μοντέλα μπορούν να δημιουργήσουν αυτόματα σχετικές NFR από υπάρχουσες λειτουργικές απαιτήσεις βάσει των προτύπων ISO/IEC 25010.

4.3 Ανάλυση διαθέσιμων αισθητήρων, δικτύων και πρωτοκόλλων

Το ταχέως εξελισσόμενο οικοσύστημα του Διαδικτύου των Πραγμάτων (IoT) περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα τεχνολογικών συνιστωσών που εκτείνονται από τους φυσικούς αισθητήρες έως τα δίκτυα επικοινωνίας, τα πρωτόκολλα μετάδοσης και τα ενδιάμεσα επίπεδα λογισμικού. Στον πυρήνα των συστημάτων IoT βρίσκονται οι αισθητήρες, οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για τη συλλογή και τη μετατροπή φυσικών μεγεθών όπως θερμοκρασία, υγρασία, επιτάχυνση ή φωτεινότητα, σε ψηφιακά δεδομένα αξιοποιήσιμα από υπολογιστικά συστήματα.

Οι τεχνολογικές εξελίξεις στα Μικροηλεκτρομηχανικά Συστήματα (Micro-Electro-Mechanical Systems – MEMS) έχουν επιτρέψει την ανάπτυξη αισθητήρων και ενεργοποιητών μικρού μεγέθους, χαμηλής κατανάλωσης ενέργειας και υψηλής ακρίβειας, χαρακτηριστικά απαραίτητα για τις σύγχρονες εφαρμογές IoT μεγάλης κλίμακας. Όπως επισημαίνουν οι Orfanos et al. (2023), οι αισθητήρες MEMS αποτελούν βασικό δομικό στοιχείο των ασύρματων δικτύων αισθητήρων,

καθώς συνδυάζουν αποδοτική λειτουργία με δυνατότητα μαζικής εγκατάστασης σε ετερογενή περιβάλλοντα.

Πάνω από το επίπεδο των αισθητήρων, τα δίκτυα επικοινωνίας λειτουργούν ως το νευρικό σύστημα του IoT, επιτρέποντας τη μεταφορά δεδομένων από τις συσκευές συλλογής προς τα κεντρικά ή κατακεντρωμένα συστήματα επεξεργασίας. Τα ασύρματα δίκτυα αισθητήρων (Wireless Sensor Networks – WSN) αποτελούν την αρχική μορφή αυτής της δικτυακής υποδομής, ενώ τα δίκτυα ευρείας περιοχής χαμηλής ισχύος (Low Power Wide Area Networks – LPWAN) έχουν αναδειχθεί ως κυρίαρχη λύση για εφαρμογές μεγάλης γεωγραφικής κάλυψης. Τεχνολογίες όπως το Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) υποστηρίζουν επικοινωνίες μεγάλης εμβέλειας με χαμηλό ρυθμό μετάδοσης δεδομένων και εξαιρετικά μειωμένη κατανάλωση ενέργειας, γεγονός που τις καθιστά κατάλληλες για περιβάλλοντα όπως η αγροτική παρακολούθηση και η περιβαλλοντική ανίχνευση.

Οι Sundaram et al. (2019) παρέχουν μια εκτενή ανάλυση των δικτύων LoRa, εστιάζοντας σε λειτουργικές προκλήσεις όπως ο συντονισμός συνδέσεων, η αξιοπιστία της μετάδοσης και η αποδοτική κατανομή πόρων. Συμπληρωματικά, οι Raza et al. (2016) περιγράφουν τις τεχνολογίες LPWA και τα αρχιτεκτονικά τους πλεονεκτήματα, όπως η ευρεία κάλυψη, το χαμηλό κόστος ανάπτυξης και η ενεργειακή αποδοτικότητα, ενώ παράλληλα επισημαίνουν τον ρόλο οργανισμών τυποποίησης όπως οι IEEE, IETF και βιομηχανικές συμμαχίες όπως η LoRa Alliance και η Weightless-SIG.

Σε επίπεδο πρωτοκόλλων επικοινωνίας, οι επιλογές που υιοθετούνται καθορίζουν σε μεγάλο βαθμό τη λειτουργικότητα, την αποδοτικότητα και τη διαλειτουργικότητα των συστημάτων IoT. Πρωτόκολλα βασισμένα στο IP, όπως το MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) και το CoAP (Constrained Application Protocol), έχουν σχεδιαστεί ειδικά για περιβάλλοντα περιορισμένων πόρων, επιτυγχάνοντας χαμηλό επικοινωνιακό φορτίο και αυξημένη αποδοτικότητα σε σύγκριση με παραδοσιακές προσεγγίσεις. Παράλληλα, εναλλακτικά παραδείγματα όπως το Named Data Networking (NDN) προτείνουν διαφορετικά μοντέλα δρομολόγησης και διαχείρισης δεδομένων, τα οποία, σύμφωνα με τους Gündoğan et al. (2018), μπορούν να προσφέρουν αυξημένη ανθεκτικότητα και αποδοτική χρήση πόρων σε πολυπλοκότερα περιβάλλοντα IoT.

Πέρα από τα πρωτόκολλα επικοινωνίας, τα επίπεδα middleware διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στη γεφύρωση της ετερογένειας των συσκευών και των εφαρμογών. Πλατφόρμες όπως το oneM2M παρέχουν οριζόντια αρχιτεκτονική που υποστηρίζει τη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών τεχνολογιών και παρόχων, ενσωματώνοντας μηχανισμούς ασφάλειας, διαχείρισης συσκευών και παροχής υπηρεσιών. Από την πρώτη του έκδοση έως τις νεότερες βελτιώσεις, το oneM2M έχει εξελιχθεί σε βασικό πρότυπο για την υποστήριξη ετερογενών εφαρμογών IoT (oneM2M, 2025).

Ιδιαίτερη σημασία αποδίδεται επίσης στη σημασιολογική διαλειτουργικότητα, η οποία αποτελεί κρίσιμο εμπόδιο για την αποτελεσματική αξιοποίηση των δεδομένων IoT. Το OGC SensorThings API επιχειρεί να αντιμετωπίσει το πρόβλημα αυτό, παρέχοντας ένα τυποποιημένο πλαίσιο βασισμένο στα πρότυπα ISO/OGC Observations and Measurements. Το API διευκολύνει όχι μόνο την ανταλλαγή δεδομένων αλλά και την κοινή κατανόησή τους μεταξύ διαφορετικών συστημάτων, υποστηρίζοντας παράλληλα πρωτόκολλα μεταφοράς όπως το MQTT και το CoAP (SensorThings API, 2025).

Τέλος, ζητήματα ασφάλειας, διαχείρισης δικτύου και διακυβέρνησης αποτελούν κρίσιμους παράγοντες για τη βιώσιμη ανάπτυξη συστημάτων IoT. Οι Yalli et al., (2025) και Wakili and Bakkali (2025) εξετάζουν σύγχρονες προσεγγίσεις ασφάλειας που εστιάζουν στην ταυτοποίηση συσκευών, την προστασία της ιδιωτικότητας και την ακεραιότητα των δεδομένων, αξιοποιώντας τεχνολογίες όπως η κρυπτογραφία, το blockchain και τα edge/fog υπολογιστικά μοντέλα. Από τη σκοπιά της διακυβέρνησης, ο Aboubakar (2021) αναδεικνύει την ανάγκη για ολοκληρωμένα πλαίσια διαχείρισης δικτύων IoT, ιδίως σε περιβάλλοντα χαμηλής ισχύος, όπου η επεκτασιμότητα, η αξιοπιστία και η διαμόρφωση αποτελούν κρίσιμες προκλήσεις.

Παρά τις προόδους αυτές, η πλήρης διαλειτουργικότητα μεταξύ ετερογενών δικτύων αισθητήρων παραμένει ένα ανοιχτό ζήτημα. Όπως επισημαίνουν οι Rita et al. (2025), η έλλειψη κοινής σημασιολογίας και η πολυπλοκότητα των πρωτοκόλλων εξακολουθούν να περιορίζουν την απρόσκοπτη συνεργασία μεταξύ διαφορετικών οικοσυστημάτων IoT, αν και πρότυπα όπως το IEEE 1451 δείχνουν τη δυνατότητα μελλοντικής εναρμόνισης.

4.4 Χαρακτηριστικά και απαιτήσεις διεπαφής χρήστη

Ο σχεδιασμός αποτελεσματικών διεπαφών χρήστη εξαρτάται από την εξισορρόπηση τόσο των λειτουργικών όσο και των εμπειρικών χαρακτηριστικών, καθοδηγούμενη από τις αρχές της αλληλεπίδρασης ανθρώπου-υπολογιστή (HCI), της μηχανικής χρηστικότητας και του σχεδιασμού με επίκεντρο τον χρήστη. Οι βασικές απαιτήσεις του UI ξεκινούν με τη διασφάλιση ότι το περιβάλλον εργασίας είναι κατάλληλο για κάθε εργασία, που σημαίνει ότι υποστηρίζει τους χρήστες στην αποτελεσματική και απλή ολοκλήρωση των στόχων τους - αυτό ευθυγραμμίζεται με τις αρχές του ISO 9241 σχετικά με την καταλληλότητα και τον έλεγχο των χρηστών. Παράλληλα με την ευθυγράμμιση των εργασιών, οι διεπαφές πρέπει να είναι αυτοπεριγραφικές, παρέχοντας σαφή ανατροφοδότηση και εξηγήσεις, ώστε κάθε αλληλεπίδραση να είναι άμεσα κατανοητή από τον χρήστη (ISO, 2014).

Μια άλλη βασική απαίτηση είναι η ελεγχιμότητα: οι χρήστες θα πρέπει να αισθάνονται ότι ελέγχουν την αλληλεπίδραση, διαχειριζόμενοι τον ρυθμό και τη ροή του διαλόγου μέχρι την ολοκλήρωση της εργασίας (ISO, 2014). Τα σχέδια του UI πρέπει να ελαχιστοποιούν το γνωστικό φορτίο ενοποιώντας τις πληροφορίες οπτικά, μειώνοντας την καταπόνηση της μνήμης για τους χρήστες (Schneiderman, 1998).

Η οπτική και διαδραστική συνέπεια του σχεδιασμού είναι ζωτικής σημασίας για την ευκολία χρήσης—η τήρηση κοινών διατάξεων, τυπογραφίας και χρωματικών μοτίβων που βοηθούν τους χρήστες να σχηματίζουν αξιόπιστα νοητικά μοντέλα, αξιοποιώντας ευρετικές αρχές χρηστικότητας (Schneiderman, 1998). Εξίσου σημαντική είναι η πρόληψη και η αποκατάσταση σφαλμάτων: ένα καλά σχεδιασμένο περιβάλλον χρήστη αποτρέπει τα λάθη μέσω προσεγγμένης διάταξης και ροής εργασίας και υποστηρίζει τους χρήστες στην εύκολη διόρθωση τυχόν συμβάντων. Τέλος, για την ενίσχυση της εμπιστοσύνης και της σαφήνειας, οι διεπαφές πρέπει να διαθέτουν ενημερωτική ανατροφοδότηση, διατηρώντας τους χρήστες ενήμερους για την κατάσταση του συστήματος εντός εύλογων χρόνων απόκρισης (Schneiderman, 1998).

Η χρήση ποικίλων πλατφορμών και τύπων συσκευών (π.χ. smartphones, tablet, wearables) απαιτεί προσαρμόσιμα στοιχεία περιβάλλοντος χρήστη. Ο Li (2022) διαφοροποιεί μεταξύ γενικών παραγόντων σχεδιασμού—αυτών που μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν σε όλες τις συσκευές—προσαρμοστικών παραγόντων σχεδιασμού—αυτών που χρειάζονται μικρές προσαρμογές ανά τεμαχικό—και μεμονωμένων παραγόντων σχεδιασμού προσαρμοσμένων σε συγκεκριμένες

συσκευές. Αυτή η προσαρμοστικότητα διασφαλίζει ότι οι χρήστες βιώνουν συνοχή στη χρήση πολλαπλών συσκευών.

Επιπλέον, τα σύγχρονα διαδραστικά συστήματα στοχεύουν στον εμπλουτισμό της εμπειρίας του χρήστη μέσω πολυτροπικής αλληλεπίδρασης—ενσωματώνοντας την αφή, τις χειρονομίες, την ομιλία και τα οπτικά κανάλια για να κάνουν τις διεπαφές καλαίσθητες, ελκυστικές και προσβάσιμες (Pushrakumar et al., 2023). Τέτοιες διεπαφές καλύπτουν ποικίλες προτιμήσεις και περιβάλλοντα χρηστών, ενισχύοντας την χρηστικότητα.

Για περιπτώσεις όπου οι τελικοί χρήστες σχεδιάζουν τα δικά τους UI (π.χ. εργαλεία DIY ή πίνακες ελέγχου IoT), η εμπιστοσύνη και η υποστήριξη είναι το κλειδί. Οι Sanctorum et al. (2023) διαπίστωσαν ότι οι χρήστες είναι δεκτικοί σε συστάσεις σχεδιασμού που δημιουργούνται από μηχανές—υπό την προϋπόθεση ότι μπορούν να δώσουν ανατροφοδότηση και να διατηρήσουν τον έλεγχο—υπογραμμίζοντας τη σημασία των συστάσεων στα εργαλεία UI του τελικού χρήστη.

Το δομημένο μοντέλο DIRA (Συσκευές, Τεχνικές αλληλεπίδρασης, Αναπαραστάσεις, Συναρμολογήσεις) προσφέρει ένα εννοιολογικό πλαίσιο για την καθοδήγηση των στοιχείων σχεδιασμού UI σε διάφορες μορφές και περιβάλλοντα, επιτρέποντας στους σχεδιαστές να εξετάσουν συστηματικά πώς τα στοιχεία του UI συνδέονται και δομούνται για να σχηματίσουν μια ολοκληρωμένη διεπαφή χρήστη (Bergström et al., 2024).

4.5 Ανάλυση ροής δεδομένων: από αισθητήρες σε υπολογιστικό νέφος και από εκεί σε πίνακα ελέγχου

Η ροή δεδομένων στα σύγχρονα συστήματα Διαδικτύου των Πραγμάτων ξεκινά με αισθητήρες και συσκευές αιχμής, οι οποίες παράγουν ακατέργαστα δεδομένα που αντικατοπτρίζουν περιβαλλοντικές ή λειτουργικές παραμέτρους όπως θερμοκρασία, πίεση, κίνηση ή κατανάλωση ενέργειας. Αυτά τα ακατέργαστα δεδομένα συλλέγονται συχνά σε υψηλή συχνότητα και πρέπει να μεταδίδονται με αποτελεσματικό και ασφαλή τρόπο. Πρωτόκολλα επικοινωνίας όπως το MQTT και το CoAP χρησιμοποιούνται συχνά σε αυτό το στάδιο, καθώς επιτρέπουν σε συσκευές χαμηλής ισχύος να στέλνουν δομημένα πακέτα δεδομένων σε πύλες ή απευθείας σε υπηρεσίες υπολογιστικού νέφους (Naik, 2017). Για τη βελτιστοποίηση της χρήσης εύρους ζώνης και την ενίσχυση της απόκρισης, οι πύλες που λειτουργούν στο επίπεδο αιχμής μπορούν να

προεπεξεργάζονται δεδομένα μέσω φιλτραρίσματος, ομαδοποίησης και ανίχνευσης ανωμαλιών πριν μεταδοθούν στο υπολογιστικό νέφος (Shi et al., 2016).

Μόλις βρεθούν στο περιβάλλον νέφους, τα δεδομένα IoT συνήθως εισέρχονται σε επίπεδα απορρόφησης ροής που έχουν κατασκευαστεί σε πλατφόρμες όπως το Apache Kafka, το AWS Kinesis ή το Google Pub/Sub, οι οποίες έχουν σχεδιαστεί για να χειρίζονται ροές δεδομένων υψηλής απόδοσης και ελάχιστης καθυστέρησης (Gubbi et al., 2013; Hashem et al., 2015). Αυτές οι πλατφόρμες επιτρέπουν την επεξεργασία σε αρχιτεκτονική βασισμένη σε συμβάντα σε πραγματικό χρόνο, όπου τα δεδομένα ρέουν συνεχώς σε μηχανές ανάλυσης για μετασχηματισμό, εμπλουτισμό και αποθήκευση. Οι βάσεις δεδομένων χρονοσειρών (π.χ., InfluxDB ή TimescaleDB) και τα κατανεμημένα συστήματα αποθήκευσης (π.χ., Hadoop HDFS, Amazon S3) χρησιμοποιούνται συνήθως για τη διατήρηση μεγάλων όγκων δομημένων και μη δομημένων δεδομένων IoT (Pan & Yang, 2017). Σε αυτό το στάδιο, η εφαρμογή κανόνων επικύρωσης δεδομένων και μεταδεδομένων είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της ακεραιότητας τους και την υποστήριξη των αναλύσεων (Al-Fuqaha et al., 2015).

Η επεξεργασία δεδομένων συχνά ενσωματώνεται με μοντέλα μηχανικής μάθησης και συστήματα που βασίζονται σε κανόνες για τη λήψη αποφάσεων και την ανίχνευση ανωμαλιών. Για παράδειγμα, η προγνωστική συντήρηση στο βιομηχανικό IoT βασίζεται σε αναλύσεις που βασίζονται στο υπολογιστικό νέφος για την ανίχνευση αποκλίσεων στη συμπεριφορά των αισθητήρων που μπορεί να υποδεικνύουν επικείμενες βλάβες εξοπλισμού (Lee et al., 2015). Τα πλαίσια επεξεργασίας ροής σε πραγματικό χρόνο, όπως το Apache Spark Streaming ή το Flink, υποστηρίζουν περαιτέρω τον μετασχηματισμό των δεδομένων των αισθητήρων σε πληροφορίες με ελάχιστη καθυστέρηση (Kaur & Sood, 2015).

Τέλος, τα επεξεργασμένα και δομημένα δεδομένα ρέουν σε πίνακες ελέγχου και πλατφόρμες οπτικοποίησης που υποστηρίζουν την παρακολούθηση, τον έλεγχο και τη λήψη αποφάσεων. Εργαλεία όπως τα Grafana, Kibana ή οι πίνακες ελέγχου που βασίζονται στο cloud παρουσιάζουν τάσεις δεδομένων, KPIs και ειδοποιήσεις σε πραγματικό χρόνο, επιτρέποντας στους διαχειριστές να ενεργούν άμεσα. Οι αποτελεσματικοί πίνακες ελέγχου έχουν σχεδιαστεί για να παρέχουν αξιοποιήσιμη πληροφορία αντί για ακατέργαστα δεδομένα, βασιζόμενοι στη συγκέντρωση, την οπτικοποίηση και το διαδραστικό φιλτράρισμα (Perera et al., 2014). Επιπλέον, οι πίνακες ελέγχου συχνά ενσωματώνουν αυτοματοποιημένα συστήματα ειδοποιήσεων - όπως ειδοποιήσεις μέσω

email ή SMS - που ενεργοποιούνται από παραβιάσεις ορίων ή ανιχνευόμενες ανωμαλίες (Sethi & Sarangi, 2017).

Αυτή η αλυσίδα ροής δεδομένων από άκρο σε άκρο – από τους αισθητήρες στο νέφος και στον πίνακα ελέγχου - διασφαλίζει ορατότητα, ιχνηλασιμότητα και ανταπόκριση σε όλα τα οικοσυστήματα του IoT, επιτρέποντας εφαρμογές σε τομείς όπως η υγειονομική περίθαλψη, οι μεταφορές, η εφοδιαστική και οι έξυπνες πόλεις.

4.6 Περιγραφή σεναρίων χρήσης (use cases) και μοντελοποίηση (UML)

Η περιγραφή των περιπτώσεων χρήσης και η μοντελοποίηση με την Ενοποιημένη Γλώσσα Μοντελοποίησης (UML) αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο των σύγχρονων συστημάτων και της μηχανικής λογισμικού, λειτουργώντας ως γέφυρα μεταξύ των απαιτήσεων των ενδιαφερόμενων μερών και του τεχνικού σχεδιασμού. Οι περιπτώσεις χρήσης αποτελούν αφηγηματικές περιγραφές των αλληλεπιδράσεων μεταξύ χρηστών ή άλλων εξωτερικών οντοτήτων (actors) και ενός συστήματος, με στόχο την επίτευξη συγκεκριμένων λειτουργικών στόχων, δίνοντας έμφαση στην εξωτερικά παρατηρήσιμη συμπεριφορά του συστήματος και όχι στις εσωτερικές λεπτομέρειες υλοποίησης. Η UML συμπληρώνει αυτές τις αφηγήσεις παρέχοντας οπτικές αναπαραστάσεις που βελτιώνουν τη σαφήνεια, την ιχνηλασιμότητα και την επικοινωνία μεταξύ των ενδιαφερόμενων μερών (Dobing & Parsons, 2016). Αυτή η διπλή προσέγγιση διασφαλίζει ότι η λειτουργικότητα του συστήματος εκφράζεται τόσο σε μορφή κειμένου όσο και διαγράμματος, μειώνοντας την ασάφεια και επιτρέποντας τη συνεργατική επικύρωση.

Στην UML, τα διαγράμματα περιπτώσεων χρήσης είναι συχνά το πρώτο βήμα στη μοντελοποίηση. Επισημαίνουν τις σχέσεις μεταξύ των δρώντων (όπως χρήστες, συστήματα ή εξωτερικές οντότητες) και του υπό εξέταση συστήματος, καταγράφοντας τόσο τις υποχρεωτικές όσο και τις προαιρετικές αλληλεπιδράσεις. Η οπτική αφαιρετική αναπαράσταση βοηθά στην ευθυγράμμιση των ενδιαφερόμενων μερών σχετικά με το πεδίο εφαρμογής και τα όρια, καθώς οριοθετεί ποιος κάνει τι στο σύστημα (Booch et al. 2017). Ενσωματώνοντας περιγραφές περιπτώσεων χρήσης σε μορφή κειμένου με διαγράμματα UML, οι αναλυτές δημιουργούν μια ολιστική προδιαγραφή που περιλαμβάνει προϋποθέσεις, σημεία ενεργοποίησης, ροές συμβάντων και τελικές συνθήκες (Hussain et al., 2017).

Πέρα από τα διαγράμματα περιπτώσεων χρήσης, η UML παρέχει ένα σύνολο μοντέλων συμπεριφοράς που εμπλουτίζουν την προδιαγραφή του συστήματος. Τα διαγράμματα αλληλουχίας απεικονίζουν τη χρονολογική ανταλλαγή μηνυμάτων μεταξύ αντικειμένων ή στοιχείων, ενώ τα διαγράμματα δραστηριότητας καταγράφουν τις ροές εργασίας και τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων. Αυτά τα μοντέλα βοηθούν στην επικύρωση δυναμικών πτυχών του συστήματος και συμπληρώνουν τα στατικά δομικά μοντέλα όπως τα διαγράμματα κλάσεων (Object Management Group [OMG], 2017).

Το βασικό πλεονέκτημα της μοντελοποίησης UML που βασίζεται σε περιπτώσεις χρήσης είναι ότι υποστηρίζει τη μηχανική απαιτήσεων και την επικύρωση των απαιτήσεων, έτσι οι αναλυτές μπορούν να ελέγχουν τη συνέπεια και την πληρότητα σε διαφορετικά μοντέλα (Dobing & Parsons, 2016). Αυτή η διαδικασία διευκολύνει επίσης την ιχνηλασιμότητα - από απαιτήσεις υψηλού επιπέδου έως αντικείμενα σχεδιασμού, ακόμη και δοκιμαστικές περιπτώσεις - καθιστώντας την UML ιδιαίτερα πολύτιμη σε κρίσιμους για την ασφάλεια και με αυστηρό κανονιστικό πλαίσιο κλάδους όπως η αεροπορία, η υγειονομική περίθαλψη και η εφοδιαστική (Ali et al., 2019).

Πρόσφατες μελέτες έχουν επίσης τονίσει την ενσωμάτωση της UML με τη μηχανική που βασίζεται σε μοντέλα (MDE) και τις ευέλικτες μεθοδολογίες, υπογραμμίζοντας τον εξελισσόμενο ρόλο της. Οι Hussain et al. (2017) τονίζουν ότι η UML εξακολουθεί να είναι σχετική, καθώς επιτρέπει τη δημιουργία μοντέλων που ενσωματώνονται σε επαναληπτικές διαδικασίες ανάπτυξης λογισμικού, χωρίς να χάνεται η δυνατότητα τυπικής μοντελοποίησης όταν απαιτείται. Επιπλέον, τα διαγράμματα UML μπορούν να αξιοποιηθούν ως βάση για την αυτοματοποιημένη παραγωγή και προσομοίωση κώδικα σε ροές MDE, μειώνοντας τη χειροκίνητη κωδικοποίηση και υποστηρίζοντας την ταχεία ανάπτυξη και επικύρωση πρωτοτύπων (Ali et al., 2019).

Στην πράξη, η μοντελοποίηση περιπτώσεων χρήσης UML επεκτείνεται πέρα από το παραδοσιακό λογισμικό σε τομείς όπως τα συστήματα IoT, οι έξυπνες πόλεις και οι υπηρεσίες υπολογιστικού νέφους, όπου πρέπει να συντονιστούν πολλαπλοί ενδιαφερόμενοι και σύνθετες αλληλεπιδράσεις. Για παράδειγμα, τα διαγράμματα δραστηριότητας και ακολουθίας UML έχουν εφαρμοστεί με επιτυχία για τη μοντελοποίηση ροών συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων IoT, διασφαλίζοντας την ευθυγράμμιση μεταξύ της συμπεριφοράς των αισθητήρων, της ενορχήστρωσης ενδιάμεσου λογισμικού (middleware) και της παρουσίασης σε έναν πίνακα ελέγχου (Shah & Patel, 2018).

Ο συνδυασμός περιγραφών περιπτώσεων χρήσης και μοντελοποίησης UML παρέχει ένα ισχυρό πλαίσιο για την καταγραφή των απαιτήσεων του συστήματος, την οπτικοποίηση των αλληλεπιδράσεων και την υποστήριξη του ιχνηλάσιμου σχεδιασμού. Ενισχύει την επικοινωνία μεταξύ τεχνικών και μη τεχνικών ενδιαφερόμενων μερών, μειώνει την ασάφεια και προσφέρει μια δομημένη πορεία από τις απαιτήσεις έως την υλοποίηση του συστήματος.

4.7 Αρχιτεκτονική συστήματος σε επίπεδο λογισμικού και υλικού

Η αρχιτεκτονική συστήματος των σύγχρονων υπολογιστικών περιβαλλόντων ενσωματώνει τόσο τα στοιχεία υλικού όσο και τα στοιχεία λογισμικού σε ένα συνεκτικό πλαίσιο που υποστηρίζει τη λειτουργικότητα, την επεκτασιμότητα, την ασφάλεια και τη διαλειτουργικότητα. Σε επίπεδο υλικού, η αρχιτεκτονική περιλαμβάνει τη φυσική υποδομή: επεξεργαστές, μνήμη, αποθήκευση, διεπαφές δικτύωσης και ολόένα και πιο εξειδικευμένους επιταχυντές όπως GPU και TPU. Αυτά τα στοιχεία παρέχουν την υπολογιστική ραχοκοκαλιά που είναι απαραίτητη για την αποτελεσματική εκτέλεση διαδικασιών λογισμικού. Με την διάδοση του IoT και του υπολογιστικού νέφους, ο σχεδιασμός υλικού έχει μετατοπιστεί προς ετερογενείς αρχιτεκτονικές, όπου οι συσκευές αιχμής, οι ενσωματωμένοι αισθητήρες και οι διακομιστές νέφους συνεργάζονται σε κατανεμημένα οικοσυστήματα (Shi et al., 2016). Το υλικό αιχμής χειρίζεται την απόκτηση δεδομένων και την προκαταρκτική επεξεργασία, ενώ το υλικό νέφους και κέντρου δεδομένων διαχειρίζεται υπολογισμούς μεγάλης κλίμακας και μόνιμη αποθήκευση. Αυτή η πολυεπίπεδη αρχιτεκτονική επιτρέπει ταχείες αποκρίσεις για εφαρμογές απαιτούν άμεση απόκριση, ενώ παράλληλα προσφέρει υψηλή επεκτασιμότητα για εφαρμογές που απαιτούν δεδομένα (Satyanarayanan, 2017).

Σε επίπεδο λογισμικού, η αρχιτεκτονική συστήματος ορίζει τη λογική οργάνωση προγραμμάτων, υπηρεσιών και ενδιάμεσου λογισμικού που αξιοποιούν πόρους υλικού για την παροχή λειτουργικότητας εφαρμογών. Η αρχιτεκτονική λογισμικού συνήθως ακολουθεί πολυεπίπεδα ή αρθρωτά πρότυπα, διαχωρίζοντας τα επίπεδα παρουσίασης, επιχειρησιακής λογικής και δεδομένων, ώστε να ενισχύεται η ευκολία συντήρησης και η επεκτασιμότητα του συστήματος (Bass et al., 2021). Οι σύγχρονες προσεγγίσεις υιοθετούν όλο και περισσότερο αρχιτεκτονικές μικροϋπηρεσιών, στις οποίες το σύστημα δομείται ως σύνολο μικρών, χαλαρά συζευγμένων και ανεξάρτητα αναπτύξιμων υπηρεσιών, οργανωμένων γύρω από επιχειρησιακές δυνατότητες και

επικοινωνούντων μέσω ευέλικτων μηχανισμών, όπως ο RESTful API. Η προσέγγιση αυτή ενισχύει την ευελιξία, την επεκτασιμότητα και την απομόνωση αστοχιών (Dragoni et al., 2017). Το Middleware παίζει κρίσιμο ρόλο διευκολύνοντας την επικοινωνία, τη διαχείριση πόρων και τη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών στοιχείων, ειδικά σε κατανεμημένα συστήματα και συστήματα IoT (Da Silva et al., 2019).

Η ενσωμάτωση της αρχιτεκτονικής υλικού και λογισμικού είναι ιδιαίτερα εμφανής στα κυβερνοφυσικά συστήματα και στις πλατφόρμες IoT. Οι αισθητήρες και οι ενεργοποιητές υλικού διασυνδέονται με ενσωματωμένο λογισμικό για τη συλλογή και επεξεργασία δεδομένων, ενώ οι υπηρεσίες λογισμικού που βασίζονται στο υπολογιστικό νέφος εκτελούν προηγμένες αναλύσεις και οπτικοποίηση. Η υπολογιστική αιχμή ενισχύει την αρχιτεκτονική αυτή μεταφέροντας μέρος της επεξεργασίας δεδομένων πιο κοντά στις πηγές παραγωγής τους και στους τελικούς χρήστες, μειώνοντας την καθυστέρηση και περιορίζοντας τις απαιτήσεις σε εύρος ζώνης (Shi et al., 2016).

Η ασφάλεια και η αξιοπιστία αποτελούν οριζόντια ζητήματα. Από την πλευρά του υλικού, οι αρχιτεκτονικές ενσωματώνουν Μονάδες Αξιόπιστης Πλατφόρμας (TPM) και ασφαλείς θύλακες για την προστασία των αποθηκευμένων δεδομένων κατά την μεταφορά και κατά την επεξεργασία (Sabt et al. 2015). Από την πλευρά του λογισμικού, οι αρχιτεκτονικές ενσωματώνουν ολοένα και περισσότερο αρχές ασφάλειας βάσει σχεδιασμού, όπως υπηρεσίες ελέγχου ταυτότητας, πρωτόκολλα κρυπτογράφησης και συνεχή παρακολούθηση για τον μετριασμό των τρωτών σημείων στα κατανεμημένα συστήματα (Da Silva et al., 2019).

Μια κρίσιμη πτυχή ενός αρχιτεκτονικής του συστήματος είναι η επεκτασιμότητα και η ευελιξία. Η επεκτασιμότητα του υλικού επιτυγχάνεται μέσω υποδομών νέφους που κατανέμουν δυναμικά υπολογιστικούς πόρους, ενώ η επεκτασιμότητα του λογισμικού υποστηρίζεται μέσω αρχιτεκτονικών προσανατολισμένων στις υπηρεσίες και μηχανισμών middleware που υποστηρίζουν δυναμική κατανομή υπολογιστικών πόρων (Bass et al., 2021). Αυτή η διπλή επεκτασιμότητα διασφαλίζει ότι οι αρχιτεκτονικές μπορούν να προσαρμοστούν σε κυμαινόμενο φόρτο εργασίας και εξελισσόμενες επιχειρηματικές ανάγκες. Επιπλέον, η διαλειτουργικότητα σε όλα τα επίπεδα υλικού και λογισμικού είναι απαραίτητη σε περιβάλλοντα πολλαπλών προμηθευτών. Τα τυποποιημένα API, τα πρωτόκολλα επικοινωνίας και οι διεπαφές υλικού επιτρέπουν την απρόσκοπτη ενσωμάτωση ποικίλων τεχνολογιών, η οποία αποτελεί βασική

απαίτηση σε κλάδους όπως η υγειονομική περίθαλψη, ο κατασκευαστικός τομέας και η εφοδιαστική (Dragoni et al., 2017).

Η αρχιτεκτονική του συστήματος τόσο σε επίπεδο υλικού όσο και σε επίπεδο λογισμικού είναι εγγενώς πολυεπίπεδη και αλληλεξαρτώμενη. Το υλικό παρέχει την υπολογιστική βάση, την βάση αποθήκευσης και επικοινωνίας, ενώ το λογισμικό οργανώνει τη λειτουργικότητα σε αρθρωτές, επεκτάσιμες και διαλειτουργικές δομές. Μαζί, δημιουργούν μια αρχιτεκτονική ικανή να υποστηρίξει τις απαιτήσεις των σύγχρονων εφαρμογών, από πλατφόρμες IoT σε πραγματικό χρόνο έως υπηρεσίες μεγάλης κλίμακας που βασίζονται στο υπολογιστικό νέφος, εξασφαλίζοντας παράλληλα απόδοση, επεκτασιμότητα και ασφάλεια.

Κεφάλαιο 5: Σχεδιασμός και Υλοποίηση ενός Συστήματος Παρακολούθησης

5.1 Επιλογή και ενσωμάτωση αισθητήρων θερμοκρασίας

Η επιλογή και η ενσωμάτωση αισθητήρων θερμοκρασίας είναι ένα κρίσιμο βήμα στο σχεδιασμό συστημάτων παρακολούθησης για εφαρμογές που κυμαίνονται από την εφοδιαστική τροφίμων έως τον βιομηχανικό αυτοματισμό και την υγειονομική περίθαλψη. Η επιλογή του τύπου αισθητήρα εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την απαιτούμενη ακρίβεια, το εύρος λειτουργίας, το κόστος, τις περιβαλλοντικές συνθήκες και τη συμβατότητα των διεπαφών. Οι συνήθως χρησιμοποιούμενοι αισθητήρες θερμοκρασίας περιλαμβάνουν θερμοστοιχεία, ανιχνευτές θερμοκρασίας αντίστασης (RTD), θερμίστορ και ψηφιακούς αισθητήρες που βασίζονται σε ημιαγωγούς, καθένas με ξεχωριστά πλεονεκτήματα και περιορισμούς. Τα θερμοστοιχεία είναι φθηνά και καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα θερμοκρασιών, αλλά παρουσιάζουν σχετικά χαμηλή ακρίβεια και απαιτούν αντιστάθμιση ψυχρής σύνδεσης. Οι RTD, αντίθετα, προσφέρουν υψηλή ακρίβεια και σταθερότητα, καθιστώντας τα ιδανικά για βιομηχανικές και επιστημονικές εφαρμογές, αν και είναι πιο ακριβοί και εύθραυστοι. Τα θερμίστορ παρέχουν ευαισθησία σε στενά εύρη θερμοκρασιών και είναι κατάλληλα για βιοϊατρική παρακολούθηση, ενώ οι ενσωματωμένοι ψηφιακοί αισθητήρες προσφέρουν εύκολη διασύνδεση με μικροελεγκτές και συσκευές IoT (Doebelin & Manik, 2017).

Η ενσωμάτωση αισθητήρων θερμοκρασίας σε σύγχρονα συστήματα περιλαμβάνει ζητήματα τόσο υλικού όσο και λογισμικού. Από την πλευρά του υλικού, οι σχεδιαστές πρέπει να διασφαλίζουν τη συμβατότητα με αναλογικούς-ψηφιακούς μετατροπείς (ADC), να αντιμετωπίσουν τους περιορισμούς στην τροφοδοσία ρεύματος και να παρέχουν την κατάλληλη ηχομόνωση για την ελαχιστοποίηση του θορύβου. Για παράδειγμα, οι RTD απαιτούν κυκλώματα επεξεργασίας σήματος όπως γέφυρες και ενισχυτές Wheatstone, ενώ τα θερμίστορ μπορεί να χρειάζονται μόνο απλές διαμορφώσεις διαιρέτη τάσης. Οι ψηφιακοί αισθητήρες με διεπαφές I²C, SPI ή One-Wire μειώνουν την πολυπλοκότητα του κυκλώματος παρέχοντας απευθείας βαθμονομημένες ψηφιακές εξόδους (Kang & Park, 2015). Από την πλευρά του λογισμικού, η ενσωμάτωση συχνά περιλαμβάνει ρουτίνες βαθμονόμησης, αλγόριθμους φιλτραρίσματος και μηχανισμούς αντιστάθμισης για τη διόρθωση της απόκλισης, της μη γραμμικότητας ή των περιβαλλοντικών

παρεμβολών. Η σωστή τοποθέτηση των αισθητήρων είναι εξίσου κρίσιμη, καθώς η ροή του αέρα, η επιφάνεια επαφής ή η μόνωση μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την ακρίβεια των μετρήσεων (Bhattacharyya et al, 2015).

Στις εφαρμογές IoT και κυβερνοφυσικής, η ενσωμάτωση αισθητήρων απαιτεί επίσης απρόσκοπτη συνδεσιμότητα με πύλες και πλατφόρμες cloud. Πολλοί σύγχρονοι αισθητήρες είναι ενσωματωμένοι με δυνατότητες επικοινωνίας ή συνδέονται μέσω ασύρματων τεχνολογιών χαμηλής ισχύος όπως Zigbee, LoRaWAN ή Bluetooth Low Energy (BLE). Η ενσωμάτωση σε οικοσυστήματα IoT επιτρέπει την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και την προγνωστική ανάλυση, οι οποίες είναι ιδιαίτερα σημαντικές στην εφοδιαστική αλυσίδα ψυχόμενων προϊόντων, όπου μικρές αποκλίσεις στη θερμοκρασία μπορούν να οδηγήσουν σε αλλοίωση και οικονομική απώλεια (Abad et al., 2020). Οι τεχνικές σύντηξης δεδομένων εφαρμόζονται συχνά όταν αναπτύσσονται πολλαπλοί αισθητήρες, εξασφαλίζοντας αξιοπιστία και πλεονασμό σε κατακευματωμένα δίκτυα (Al-Fuqaha et al., 2015).

Πέρα από τις τεχνικές παραμέτρους, η αξιοπιστία, η βαθμονόμηση και η κανονιστική συμμόρφωση είναι σημαντικοί παράγοντες στην επιλογή αισθητήρων. Για παράδειγμα, η παρακολούθηση της φαρμακευτικής ψυχρής αλυσίδας απαιτεί την τήρηση των κατευθυντήριων γραμμών Ορθής Πρακτικής Διανομής (GDP), καθιστώντας απαραίτητη τη χρήση αισθητήρων με πιστοποιημένη ακρίβεια και ιχνηλάσιμη βαθμονόμηση. Ομοίως, οι κανονισμοί της βιομηχανίας τροφίμων απαιτούν αισθητήρες που μπορούν να λειτουργούν εντός συστημάτων παρακολούθησης που συμμορφώνονται με το HACCP για να εγγυώνται την ασφάλεια και την ποιότητα (Jedermann & Lang, 2017). Η μακροπρόθεσμη σταθερότητα, η ελάχιστη μετατόπιση και η αντοχή σε αντίξοα περιβάλλοντα (π.χ. υγρασία, κραδασμούς ή διαβρωτικές ατμόσφαιρες) είναι εξίσου σημαντικές σε βιομηχανικές εφαρμογές και εφαρμογές εφοδιαστικής.

Η ενσωμάτωση αισθητήρων θερμοκρασίας στις αρχιτεκτονικές παρακολούθησης πρέπει να είναι ολιστική, λαμβάνοντας υπόψη όχι μόνο το στοιχείο του αισθητήρα αλλά και τα ηλεκτρονικά συστήματα διασύνδεσης, τις μονάδες επικοινωνίας και τους πίνακες ελέγχου που βασίζονται στο υπολογιστικό νέφος για οπτικοποίηση και ειδοποιήσεις. Η επιτυχής εφαρμογή εξαρτάται από την εξισορρόπηση κόστους και απόδοσης, διασφαλίζοντας παράλληλα τη συμμόρφωση, την αξιοπιστία και την επεκτασιμότητα εντός της ευρύτερης αρχιτεκτονικής του συστήματος.

5.2 Δικτυακή σύνδεση αισθητήρων με χρήση πρωτοκόλλων IoT

Η δικτύωση αισθητήρων μέσω πρωτοκόλλων IoT αποτελεί κεντρικό παράγοντα για επεκτάσιμη, αξιόπιστη και ενεργειακά αποδοτική επικοινωνία σε καταναμημένα περιβάλλοντα αισθητήρων, όπως οι έξυπνες πόλεις, η υγειονομική περίθαλψη, η εφοδιαστική και ο βιομηχανικός αυτοματισμός. Στις αρχιτεκτονικές IoT, οι αισθητήρες συχνά λειτουργούν ως περιορισμένες συσκευές με περιορισμένους πόρους επεξεργασίας, αποθήκευσης και ενέργειας. Επομένως, τα ελαφριά και τυποποιημένα πρωτόκολλα δικτύωσης είναι απαραίτητα. Ο πρωταρχικός στόχος αυτών των πρωτοκόλλων είναι να διασφαλίσουν τη διαλειτουργικότητα, την επεκτασιμότητα, τη χαμηλή καθυστέρηση και την ασφαλή μεταφορά δεδομένων μεταξύ συσκευών αιχμής, πυλών και πλατφορμών νέφους (Al-Fuqaha et al., 2015).

Μεταξύ των πιο ευρέως χρησιμοποιούμενων πρωτοκόλλων IoT για δικτύωση αισθητήρων είναι το MQTT, το CoAP, το AMQP (Advanced Message Queuing Protocol) και τα API που βασίζονται σε HTTP/REST. Το MQTT έχει γίνει ένα de facto πρότυπο λόγω της ελαφριάς αρχιτεκτονικής δημοσίευσης-συνδρομής, η οποία ελαχιστοποιεί την κατανάλωση εύρους ζώνης και υποστηρίζει ασύγχρονη επικοινωνία μεταξύ χιλιάδων κόμβων αισθητήρων και διαμεσολαβητών (message brokers). Είναι ιδιαίτερα κατάλληλο για περιβάλλοντα όπου απαιτείται αξιόπιστη επικοινωνία χαμηλού πρωτοκολλικού φόρτου, όπως η παρακολούθηση της εφοδιαστικής (Naik, 2017). Αντίθετα, το CoAP είναι βελτιστοποιημένο για συσκευές με περιορισμούς και λειτουργεί μέσω UDP, επιτρέποντας αποτελεσματικές αλληλεπιδράσεις αιτήματος/απόκρισης σε δίκτυα χαμηλής ισχύος και με απώλειες. Η υιοθέτησή του HTTP επιτρέπει την ενσωμάτωση του με υπηρεσίες ιστού, ενώ παραμένει ελαφρύ πρωτόκολλο για επικοινωνία σε επίπεδο αισθητήρων (Bormann et al., 2014; Shelby et al., 2015).

Για εφαρμογές που απαιτούν υψηλότερη αξιοπιστία και ανταλλαγή μηνυμάτων, προτιμάται συχνά το AMQP. Ενώ είναι βαρύτερο από το MQTT ή το CoAP, το AMQP προσφέρει ισχυρούς μηχανισμούς ουρών μηνυμάτων, δρομολόγησης και ασφάλειας, καθιστώντας το κατάλληλο για χρηματοοικονομικές υπηρεσίες ή βιομηχανικό αυτοματισμό όπου η εγγυημένη παράδοση και η διατήρηση της σειράς των μηνυμάτων είναι κρίσιμες (Bankov et al., 2016). Επιπλέον, τα παραδοσιακά API HTTP/REST εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται σε δίκτυα IoT λόγω της διαδεδομένης παρουσίας τους και της συμβατότητάς τους με τις υπάρχουσες υπηρεσίες ιστού, αν

και το πάγιο κόστος τους τα καθιστά λιγότερο επιθυμητά για κόμβους αισθητήρων με περιορισμένους πόρους (Sethi & Sarangi, 2017).

Πέρα από τα πρωτόκολλα επιπέδου εφαρμογής, οι τεχνολογίες δικτύων ευρείας περιοχής (LPWAN) χαμηλής ισχύος, όπως τα LoRaWAN, NB-IoT και Sigfox, παρέχουν συνδεσιμότητα μεγάλης εμβέλειας και ενεργειακά αποδοτική για δίκτυα αισθητήρων που τροφοδοτούνται από μπαταρίες και αναπτύσσονται σε μεγάλες γεωγραφικές περιοχές. Το LoRaWAN, για παράδειγμα, επιτρέπει την επικοινωνία πολλών χιλιομέτρων με χαμηλούς ρυθμούς δεδομένων, καθιστώντας το ιδανικό για την παρακολούθηση του περιβάλλοντος και την έξυπνη γεωργία (Raza et al., 2017). Το NB-IoT αξιοποιεί την υπάρχουσα κυψελοειδή υποδομή για να υποστηρίξει μαζικές αναπτύξεις αισθητήρων με ισχυρή κάλυψη σε αστικά περιβάλλοντα, κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό για εφαρμογές έξυπνων πόλεων (Mekki et al., 2019).

Η ενσωμάτωση των πρωτοκόλλων IoT συχνά γίνεται σε πολυεπίπεδες αρχιτεκτονικές, όπου οι συσκευές αιχμής χρησιμοποιούν ελαφριά πρωτόκολλα επικοινωνίας όπως το CoAP ή το MQTT, ενώ οι πύλες τα μεταφράζουν σε πιο ισχυρά πρωτόκολλα (π.χ., AMQP, HTTP ή ιδιόκτητα API cloud) για ενσωμάτωση στην υποδομή εξυπηρετητών (backend). Αυτή η πολυεπίπεδη προσέγγιση επιτρέπει τη διαλειτουργικότητα μεταξύ ετερογενών δικτύων και διασφαλίζει ότι τα δεδομένα που συλλέγονται από αισθητήρες μπορούν να υποστούν επεξεργασία, να αποθηκευτούν και να οπτικοποιηθούν σε πραγματικό χρόνο. Οι πλατφόρμες ενδιάμεσου λογισμικού (middleware frameworks) περιγράφουν περαιτέρω τις πολυπλοκότητες των πρωτοκόλλων, επιτρέποντας στους προγραμματιστές να σχεδιάζουν εφαρμογές IoT χωρίς να ασχολούνται άμεσα με λεπτομέρειες επικοινωνίας χαμηλού επιπέδου (Da Silva et al., 2019).

Η ασφάλεια είναι ένας άλλος κρίσιμος παράγοντας στη δικτύωση αισθητήρων μέσω πρωτοκόλλων IoT. Δεδομένου ότι οι αισθητήρες λειτουργούν συχνά σε μη αξιόπιστα περιβάλλοντα, τα πρωτόκολλα συνδυάζονται όλο και περισσότερο με κρυπτογράφηση TLS/DTLS, μηχανισμούς ελέγχου ταυτότητας και πολιτικές ελέγχου πρόσβασης. Το CoAP, για παράδειγμα, συνήθως ασφαλίζεται με Datagram Transport Layer Security (DTLS), ενώ το MQTT βασίζεται στο TLS για να διασφαλίσει την εμπιστευτικότητα και την ακεραιότητα των μεταδιδόμενων δεδομένων αισθητήρων (Sethi & Sarangi, 2017).

Η δικτύωση αισθητήρων που χρησιμοποιούν πρωτόκολλα IoT περιλαμβάνει την εξισορρόπηση μεταξύ αποδοτικής επικοινωνίας χαμηλού φόρτου, επεκτασιμότητας, αξιοπιστίας και

ασφάλειας. Τα MQTT και CoAP κυριαρχούν σε σενάρια με περιορισμένες συσκευές, το AMQP παρέχει ισχυρές εγγυήσεις σε εταιρικά περιβάλλοντα, το HTTP παραμένει σχετικό με τη διαλειτουργικότητα μέσω ιστού και τα πρότυπα LPWAN επεκτείνουν τη συνδεσιμότητα σε ευρείες περιοχές. Μαζί, αυτά τα πρωτόκολλα αποτελούν τη ραχοκοκαλιά των οικοσυστημάτων IoT, επιτρέποντας σε ετερογενή δίκτυα αισθητήρων να λειτουργούν ως ενοποιημένα, έξυπνα συστήματα.

5.3 Ασφάλεια Δεδομένων μέσω τεχνολογίας Blockchain

Η τεχνολογία Blockchain έχει αναδειχθεί ως ένα μετασχηματιστικό εργαλείο για την ασφάλεια των δεδομένων λόγω της αποκεντρωμένης δομής της, των κρυπτογραφικών βάσεων και του αμετάβλητου καθολικού μητρώου. Σε αντίθεση με τις κεντρικές βάσεις δεδομένων, όπου μια ενιαία αρχή ελέγχει την πρόσβαση και την ακεραιότητα, το Blockchain διανέμει δεδομένα σε πολλαπλούς κόμβους σε ένα δίκτυο peer-to-peer. Αυτή η αποκέντρωση μειώνει τον κίνδυνο μεμονωμένων σημείων αποτυχίας και καθιστά εξαιρετικά δύσκολο για κακόβουλους παράγοντες να τροποποιήσουν ή να διαγράψουν αρχεία, διασφαλίζοντας έτσι την ακεραιότητα και τη διαθεσιμότητα των δεδομένων (Yli-Huumo et al., 2016). Κάθε συναλλαγή που καταγράφεται στο Blockchain επικυρώνεται μέσω ενός μηχανισμού συναίνεσης, όπως η Απόδειξη Εργασίας (PoW), η Απόδειξη Συμμετοχής (PoS) ή νεότερες παραλλαγές όπως η Βυζαντινή Ανοχή Σφάλματος (BFT), η οποία διασφαλίζει ότι όλοι οι κόμβοι στο δίκτυο συμφωνούν για την κατάσταση του καθολικού μητρώου (Zheng et al., 2017).

Μία από τις θεμελιώδεις συνεισφορές του Blockchain στην ασφάλεια είναι η χρήση κρυπτογραφικών τεχνικών όπως ο κατακερματισμός και οι ψηφιακές υπογραφές. Ο κατακερματισμός διασφαλίζει ότι οποιαδήποτε τροποποίηση στα αποθηκευμένα δεδομένα μπορεί να ανιχνευθεί αμέσως, καθώς ακόμη και μια μικρή αλλαγή στην είσοδο έχει ως αποτέλεσμα μια εντελώς διαφορετική έξοδο κατακερματισμού. Οι ψηφιακές υπογραφές παρέχουν έλεγχο ταυτότητας και μη αποποίηση ευθύνης, διασφαλίζοντας ότι τα δεδομένα δημιουργούνται και επικυρώνονται μόνο από νόμιμες οντότητες. Αυτός ο συνδυασμός χαρακτηριστικών διασφαλίζει την εμπιστευτικότητα, την ακεραιότητα και την αυθεντικότητα των δεδομένων που ανταλλάσσονται μεταξύ κατανεμημένων συστημάτων (Crosby et al., 2016). Τέτοιοι μηχανισμοί είναι ιδιαίτερα κρίσιμοι στα οικοσυστήματα του IoT, όπου δισεκατομμύρια συσκευές παράγουν

ευαίσθητα δεδομένα και όπου οι κεντρικές προσεγγίσεις συχνά δυσκολεύονται να παρέχουν επαρκή προστασία (Dorri et al., 2017).

Το Blockchain ενισχύει επίσης τη διαφάνεια και την ιχνηλασιμότητα των δεδομένων, δύο βασικά στοιχεία της ασφαλούς διαχείρισης πληροφοριών. Δεδομένου ότι όλοι οι συμμετέχοντες μοιράζονται το ίδιο καθολικό μητρώο, οι συναλλαγές είναι διαφανείς και ελέγξιμες, μειώνοντας τις ευκαιρίες για απάτη και παραποίηση δεδομένων. Για παράδειγμα, στα συστήματα της εφοδιαστικής αλυσίδας, οι πλατφόρμες που βασίζονται σε Blockchain επιτρέπουν στα ενδιαφερόμενα μέρη να εντοπίζουν με ασφάλεια την κίνηση των αγαθών από την προέλευση στον προορισμό, προστατεύοντας από την παραχάραξη και διασφαλίζοντας την εμπιστοσύνη στην προέλευση των δεδομένων (Kshetri, 2018). Επιπλέον, η αμετάβλητη φύση των αρχείων Blockchain εγγυάται ότι μόλις δεσμευτούν τα δεδομένα, δεν μπορούν να τροποποιηθούν αναδρομικά χωρίς τη συμφωνία της πλειοψηφίας των κόμβων, καθιστώντας τα ανθεκτικά σε εσωτερικές απειλές και εξωτερικές παραβιάσεις (Zhang & Jacobsen, 2018).

Πέρα από την ακεραιότητα και τη διαφάνεια, το Blockchain συμβάλλει στον έλεγχο πρόσβασης και την ιδιωτικότητα. Μέσω έξυπνων συμβολαίων, οι οργανισμοί μπορούν να επιβάλουν λεπτομερείς πολιτικές πρόσβασης, επιτρέποντας ή αρνούμενοι αυτόματα την πρόσβαση σε δεδομένα βάσει προκαθορισμένων κανόνων. Επιπλέον, το Blockchain μπορεί να συνδυαστεί με τεχνικές κρυπτογράφησης και ανωνυμοποίησης για την ενίσχυση της προστασίας της ιδιωτικότητας, επιτρέποντας παράλληλα την κοινή χρήση δεδομένων πέρα από τα οργανωτικά ή εθνικά όρια.

Παρά τα πλεονεκτήματά του, το Blockchain αντιμετωπίζει προκλήσεις όπως η επεκτασιμότητα, η κατανάλωση ενέργειας (ιδιαίτερα σε συστήματα PoW) και η καθυστέρηση, οι οποίες περιορίζουν την άμεση υιοθέτησή του σε περιβάλλοντα υψηλής ταχύτητας. Ωστόσο, η έρευνα σε ενεργειακά αποδοτικούς μηχανισμούς συναίνεσης και υβριδικές αρχιτεκτονικές που συνδυάζουν το Blockchain με υπολογιστικές νέφους και αιχμής, αντιμετωπίζει αυτούς τους περιορισμούς (Zheng et al., 2018). Ως αποτέλεσμα, το blockchain θεωρείται ολοένα και περισσότερο ως μια αξιόπιστη ραχοκοκαλιά για την ασφαλή διαχείριση δεδομένων σε τομείς όπως τα χρηματοοικονομικά, η υγειονομική περίθαλψη, η εφοδιαστική και το IoT.

Η τεχνολογία Blockchain παρέχει ένα ισχυρό πλαίσιο για την ασφάλεια των δεδομένων μέσω αποκέντρωσης, κρυπτογραφικής προστασίας και ιχνηλασιμότητας. Η ικανότητά της να αποτρέπει

την παραβίαση, να επιτρέπει διαφανή έλεγχο και να επιβάλλει τον έλεγχο πρόσβασης μέσω έξυπνων συμβολαίων την καθιστά μια πολλά υποσχόμενη λύση για την αντιμετώπιση μακροχρόνιων προκλήσεων στην ασφάλεια δεδομένων σε καταναμημένα περιβάλλοντα.

5.4 Σχεδιασμός διεπαφής χρήστη και μηχανισμοί ειδοποίησης

Ο σχεδιασμός των διεπαφών χρήστη (UI) και η ενσωμάτωση μηχανισμών ειδοποιήσεων αποτελούν θεμελιώδη στοιχεία για τη δημιουργία διαδραστικών συστημάτων που είναι αποτελεσματικά, προσβάσιμα και επικεντρωμένα στον χρήστη. Ο σχεδιασμός του UI υπερβαίνει την αισθητική. Εστιάζει στη χρηστικότητα, τη συνέπεια, την ανταπόκριση και τη διαχείριση του γνωστικού φορτίου. Ένα καλά σχεδιασμένο UI διασφαλίζει ότι οι χρήστες μπορούν να ολοκληρώνουν εργασίες με ελάχιστη προσπάθεια, ενώ τα συστήματα ειδοποιήσεων λειτουργούν ως γέφυρα επικοινωνίας, παρέχοντας στους χρήστες πληροφορίες με βάση τα συμφραζόμενα και έγκαιρες πληροφορίες. Μαζί, αυτά τα στοιχεία καθορίζουν την ποιότητα της αλληλεπίδρασης ανθρώπου-υπολογιστή και επηρεάζουν σημαντικά την ικανοποίηση και την παραγωγικότητα των χρηστών (Norman & Nielsen, 2015).

Οι σύγχρονες αρχές σχεδιασμού UI διαμορφώνονται από την προσέγγιση του σχεδιασμού με επίκεντρο τον χρήστη (UCD), η οποία δίνει έμφαση στην κατανόηση των αναγκών, των συμπεριφορών και των περιορισμών των χρηστών κατά την ανάπτυξη του συστήματος. Αυτό περιλαμβάνει τη διατήρηση της σαφήνειας, τη μείωση της πολυπλοκότητας και τη διασφάλιση της προσβασιμότητας σε όλες τις πλατφόρμες και τις συσκευές. Για παράδειγμα, οι προσαρμοστικές και οι ανταποκρινόμενες διεπαφές είναι πλέον απαραίτητες λόγω της διάδοσης των κινητών συσκευών και των πλατφορμών IoT. Επιπλέον, η προσοχή στα πρότυπα προσβασιμότητας, όπως οι Οδηγίες Προσβασιμότητας Περιεχομένου Ιστού (WCAG), διασφαλίζει την ένταξη των χρηστών με αναπηρίες, τονίζοντας την ηθική διάσταση του σχεδιασμού UI (Lazar et al. 2015).

Παράλληλα, οι μηχανισμοί ειδοποιήσεων εξελίσσονται από απλές ειδοποιήσεις σε συστήματα με επίγνωση του περιβάλλοντος, πολυτροπικά και προσαρμοστικά. Οι ειδοποιήσεις αποσκοπούν στην ενημέρωση των χρηστών χωρίς να διαταράσσουν άσκοπα τη ροή εργασίας τους, καθιστώντας την ισορροπία κεντρική μέριμνα σχεδιασμού. Η έρευνα δείχνει ότι οι υπερβολικές ή κακώς χρονισμένες ειδοποιήσεις μπορούν να αυξήσουν το γνωστικό φορτίο και να μειώσουν την απόδοση των εργασιών, ένα φαινόμενο που συνήθως αναφέρεται ως «κόπωση ειδοποιήσεων»

(Mehrotra et al., 2016). Για να μετριαστεί αυτό, οι σχεδιαστές εφαρμόζουν φιλτράρισμα βάσει προτεραιοτήτων, προσαρμογή προτιμήσεων χρήστη και έξυπνο προγραμματισμό. Για παράδειγμα, τα προσαρμοστικά συστήματα μπορούν να αναλύσουν το περιβάλλον χρήστη (π.χ. επίπεδο δραστηριότητας, ώρα της ημέρας ή συσκευή που χρησιμοποιείται) και να παρέχουν ειδοποιήσεις ανάλογα (Fischer et al., 2020).

Οι τεχνολογικές εξελίξεις στην πανταχού παρούσα και κινητή υπολογιστική έχουν επεκτείνει τον ρόλο των ειδοποιήσεων, επιτρέποντάς τους να παρέχονται μέσω πολλαπλών τρόπων, όπως οπτικά (banner στην οθόνη), ακουστικά (ήχοι, φωνητικοί βοηθοί) και μέσω αφής (δονήσεις σε φορητές συσκευές). Οι πολυτροπικές ειδοποιήσεις είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικές σε κρίσιμα περιβάλλοντα όπως η υγειονομική περίθαλψη ή η βιομηχανική παρακολούθηση, όπου οι έγκαιρες ειδοποιήσεις μπορούν να αποτρέψουν ατυχήματα ή να διασφαλίσουν την ασφάλεια των ασθενών (Starke et al., 2019). Σε τέτοιες περιπτώσεις, το περιβάλλον χρήστη και οι μηχανισμοί ειδοποιήσεων πρέπει να ενσωματώνονται άψογα για να διασφαλιστεί ότι οι ειδοποιήσεις είναι εφαρμόσιμες και κατανοητές χωρίς να κατακλύζουν τον χρήστη.

Ο σχεδιασμός των πινάκων ελέγχου καταδεικνύει περαιτέρω την ενσωμάτωση του περιβάλλοντος χρήστη και των ειδοποιήσεων. Οι πίνακες ελέγχου πρέπει να εξισορροπούν τον πλούτο δεδομένων με τη σαφήνεια, επιτρέποντας στους χρήστες να ερμηνεύουν γρήγορα την κατάσταση του συστήματος και να ανταποκρίνονται σε ανωμαλίες. Η επισήμανση μη φυσιολογικών συνθηκών μέσω χρωματικής κωδικοποίησης ή αυτοματοποιημένων ειδοποιήσεων διασφαλίζει ότι τα κρίσιμα συμβάντα δεν παραβλέπονται. Μελέτες στην παρακολούθηση του IoT στη βιομηχανία επιβεβαιώνουν ότι οι διεπαφές που εμπλουτίζονται με ειδοποιήσεις ευαίσθητες στο περιβάλλον αυξάνουν την ακρίβεια λήψης αποφάσεων και μειώνουν τον χρόνο απόκρισης (Ghiani et al., 2017).

Η εξατομίκευση και ο έλεγχος χρήστη αναδύονται ως βέλτιστες πρακτικές στον σχεδιασμό ειδοποιήσεων. Η δυνατότητα στους χρήστες να διαμορφώνουν τύπους ειδοποιήσεων, κανάλια και συχνότητα βελτιώνει την εμπιστοσύνη και την αλληλεπίδραση, ενώ τα προσαρμοστικά συστήματα που βασίζονται στην Τεχνητή Νοημοσύνη προβλέπουν τις προτιμήσεις των χρηστών και προσαρμόζουν δυναμικά τις ειδοποιήσεις (Pielot et al., 2015). Τέτοιες τάσεις καταδεικνύουν πώς ο σχεδιασμός του UI και οι μηχανισμοί ειδοποιήσεων συγκλίνουν προς έξυπνα,

προσαρμοσμένα στον χρήστη οικοσυστήματα που βελτιώνουν τη χρηστικότητα, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις γνωστικές διαταραχές.

5.5 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί του Blockchain στην ψυχρή αλυσίδα

Η εφαρμογή της τεχνολογίας Blockchain στην ψυχρή αλυσίδα έχει αναγνωριστεί ως μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση για τη βελτίωση της ιχνηλασιμότητας, της διαφάνειας και της εμπιστοσύνης σε όλη την εφοδιαστική αλυσίδα ευπαθών αγαθών. Ένα από τα κύρια πλεονεκτήματα του Blockchain έγκειται στην ικανότητά του να δημιουργεί ένα αμετάβλητο και κατανεμημένο καθολικό όπου κάθε συναλλαγή, από την παραγωγή έως τη μεταφορά και την παράδοση, καταγράφεται και επαληθεύεται από πολλά μέρη. Αυτό διασφαλίζει ότι τα αρχεία θερμοκρασίας, τα δεδομένα χειρισμού και τα ιστορικά αποστολών δεν μπορούν να τροποποιηθούν αναδρομικά, μειώνοντας έτσι σημαντικά τους κινδύνους απάτης και παραποίησης. Σε βιομηχανίες όπως η φαρμακευτική βιομηχανία και η προμήθεια τροφίμων, αυτή η αμετάβλητη φύση είναι κρίσιμη για τη διασφάλιση της ασφάλειας των καταναλωτών και της κανονιστικής συμμόρφωσης (Kshetri, 2018). Επιτρέποντας σε όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη -συμπεριλαμβανομένων των παραγωγών, των διανομέων, των ρυθμιστικών αρχών και των λιανοπωλητών- να έχουν πρόσβαση σε μια ενιαία αξιόπιστη έκδοση της αλήθειας, το Blockchain ενισχύει την λογοδοσία (Tian, 2017).

Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα του Blockchain στην ψυχρή αλυσίδα είναι η ιχνηλασιμότητα σε πραγματικό χρόνο. Μέσω της ενσωμάτωσης αισθητήρων IoT και έξυπνων συμβολαίων, τα δεδομένα θερμοκρασίας και οι περιβαλλοντικές συνθήκες μπορούν να καταγράφονται συνεχώς και να μεταφορτώνονται αυτόματα στο Blockchain. Εάν μια αποστολή εμβολίων, για παράδειγμα, υπερβεί τα αποδεκτά όρια θερμοκρασίας, τα έξυπνα συμβόλαια μπορούν να ενεργοποιήσουν αυτόματα ειδοποιήσεις ή ακόμα και να μπλοκάρουν την περαιτέρω διανομή μέχρι να ληφθούν διορθωτικά μέτρα (Casino et al., 2019). Αυτή η δυνατότητα ενισχύει τη διασφάλιση της ποιότητας και ελαχιστοποιεί τις οικονομικές απώλειες από αλλοιωμένα προϊόντα. Επιπλέον, το Blockchain υποστηρίζει τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς παρέχοντας μια διαφανή διαδρομή ελέγχου που απλοποιεί τις διαδικασίες επιθεωρήσεων και πιστοποίησης, ιδιαίτερα σημαντική για τις διασυνοριακές αποστολές όπου τα κανονιστικά πλαίσια ποικίλλουν (Rejeb et al, 2020).

Παρά τα πλεονεκτήματα αυτά, η χρήση του Blockchain στην ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα αντιμετωπίζει επίσης σημαντικούς περιορισμούς. Μία από τις πιο πιεστικές προκλήσεις είναι η

επεκτασιμότητα και η απόδοση. Καθώς ο αριθμός των συναλλαγών αυξάνεται - ιδιαίτερα στις παγκόσμιες αλυσίδες εφοδιασμού με χιλιάδες αποστολές - η ταχύτητα επεξεργασίας και οι απαιτήσεις αποθήκευσης του Blockchain μπορούν να γίνουν σημεία συμφόρησης. Τα δημόσια Blockchain όπως το Ethereum ενδέχεται να υποφέρουν από υψηλή καθυστέρηση και κόστος συναλλαγών, καθιστώντας τα λιγότερο κατάλληλα για δεδομένα υψηλής συχνότητας που παράγονται από αισθητήρες IoT (Murray et al., 2021). Τα ιδιωτικά ή κοινοπραξιακά Blockchain μετριάζουν ορισμένα από αυτά τα προβλήματα, αλλά ενδέχεται να θέσουν σε κίνδυνο τον βαθμό αποκέντρωσης και εμπιστοσύνης, που αποτελούν βασικά πλεονεκτήματα του Blockchain.

Ένας άλλος περιορισμός αφορά την ενσωμάτωση στην υπάρχουσα υποδομή. Οι φορείς εκμετάλλευσης ψυχρής αλυσίδας χρησιμοποιούν ήδη μια ποικιλία συστημάτων διαχείρισης εφοδιαστικής και η ενσωμάτωση του Blockchain απαιτεί τεχνική εμπειρογνομosύνη, επενδύσεις και τυποποίηση σε πολλά ενδιαφερόμενα μέρη. Χωρίς πρότυπα διαλειτουργικότητας, η υιοθέτηση του Blockchain κινδυνεύει να δημιουργήσει κατακερματισμένα συστήματα που περιορίζουν το πλήρες δυναμικό του (Francisco & Swanson, 2018). Επιπλέον, η κατανάλωση ενέργειας που σχετίζεται με ορισμένους μηχανισμούς συναίνεσης, όπως η Απόδειξη Εργασίας, εγείρει ανησυχίες για τη βιωσιμότητα, ειδικά καθώς ο τομέας της εφοδιαστικής αντιμετωπίζει αυξανόμενη πίεση για να μειώσει το αποτύπωμα άνθρακα (Zheng et al., 2018).

Τέλος, η αξιοπιστία των δεδομένων παραμένει ένα ζήτημα. Ενώ το blockchain διασφαλίζει ότι μόλις καταγραφούν τα δεδομένα δεν μπορούν να παραποιηθούν, δεν εγγυάται ότι τα δεδομένα που εισάγονται είναι ακριβή εξ αρχής. Αυτό το πρόβλημα «σκουπίδια μπαίνουν, σκουπίδια βγαίνουν» είναι ιδιαίτερα σημαντικό στην ψυχρή αλυσίδα, όπου οι δυσλειτουργίες των αισθητήρων ή τα ανθρώπινα σφάλματα κατά την εισαγωγή δεδομένων θα μπορούσαν να θέσουν σε κίνδυνο την εμπιστοσύνη στο σύστημα. Συνεπώς, το blockchain πρέπει να συνδυαστεί με ισχυρή βαθμονόμηση αισθητήρων, ασφάλεια IoT και μηχανισμούς διακυβέρνησης για να διασφαλιστεί η αξιόπιστη λειτουργία (Saber et al., 2019).

Το Blockchain προσφέρει ισχυρά πλεονεκτήματα στην ιχνηλασιμότητα, τη διαφάνεια και τη συμμόρφωση για την ψυχρή εφοδιαστική αλυσίδα, καθιστώντας το μια πολύτιμη καινοτομία για τις βιομηχανίες που βασίζονται σε αυστηρούς περιβαλλοντικούς ελέγχους. Ωστόσο, οι περιορισμοί που σχετίζονται με την επεκτασιμότητα, τη διαλειτουργικότητα, την κατανάλωση ενέργειας και την ακρίβεια των δεδομένων πρέπει να αντιμετωπιστούν για να επιτευχθεί ευρεία

υιοθέτηση της τεχνολογίας. Μια ισορροπημένη προσέγγιση που συνδυάζει το Blockchain με το IoT, την υπολογιστική αιχμή και τα τυποποιημένα πλαίσια φαίνεται να είναι η πιο αποτελεσματική οδός προς τα εμπρός.

Κεφάλαιο 6: Συμπεράσματα

Η ανάλυση του IoT, του Blockchain και των ευφυών συστημάτων παρακολούθησης στο πλαίσιο της ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας καταδεικνύει πώς ο ψηφιακός μετασχηματισμός αναδιαμορφώνει τη διαχείριση των ευπαθών αγαθών. Η τεχνολογική καινοτομία δεν αποτελεί πλέον συμπληρωματικό εργαλείο, αλλά βασική αναγκαιότητα για τη διασφάλιση της αποτελεσματικότητας, της ιχνηλασιμότητας και της συμμόρφωσης σε αυστηρά ρυθμιζόμενες αλυσίδες εφοδιασμού. Ο συνδυασμός υποδομών IoT που βασίζονται σε αισθητήρες με διαχείριση δεδομένων που βασίζεται σε Blockchain παρέχει ένα ισχυρό πλαίσιο για την αντιμετώπιση μακροχρόνιων προκλήσεων που σχετίζονται με την ακεραιότητα των δεδομένων, την πρόληψη της απάτης και τη διαφάνεια. Αυτές οι τεχνολογίες, όταν ενσωματώνονται σωστά, προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα σε σχέση με τα συμβατικά συστήματα παρακολούθησης και βάσεων δεδομένων, ιδίως μέσω της ορατότητας σε πραγματικό χρόνο, της αμετάβλητης φύσης των αρχείων και της αυτοματοποίησης των μηχανισμών συμμόρφωσης.

Ταυτόχρονα, η υιοθέτηση αυτή δεν είναι χωρίς περιορισμούς. Οι αναπτύξεις IoT απαιτούν προσεκτική εξέταση της επιλογής αισθητήρων, των πρωτοκόλλων δικτύου και της διαλειτουργικότητας του συστήματος, ενώ το Blockchain αντιμετωπίζει προκλήσεις που συνδέονται με την επεκτασιμότητα, την καθυστέρηση, την κατανάλωση ενέργειας και την ενσωμάτωση με τις υπάρχουσες πλατφόρμες εφοδιαστικής. Επιπλέον, οι τεχνολογικές εξελίξεις πρέπει να ευθυγραμμίζονται με το αυστηρό κανονιστικό τοπίο που διέπει τα ευπαθή αγαθά, συμπεριλαμβανομένης της ευρωπαϊκής και διεθνούς νομοθεσίας για τις μεταφορές, των απαιτήσεων GDPR για την ασφάλεια και το απόρρητο των δεδομένων και των διαδικασιών τελωνειακού ελέγχου. Οι συνέπειες της μη συμμόρφωσης —από οικονομικές κυρώσεις έως καταστροφή φορτίου— υπογραμμίζουν τη σημασία της ισχυρής παρακολούθησης, της ακριβούς τεκμηρίωσης και της διαφανούς ανταλλαγής πληροφοριών μεταξύ των ενδιαφερόμενων μερών.

Μια περαιτέρω διάσταση αναδύεται στη διεπαφή ανθρώπου-τεχνολογίας. Ο σχεδιασμός της διεπαφής χρήστη, η οπτικοποίηση του πίνακα ελέγχου και οι προσαρμοστικοί μηχανισμοί ειδοποίησης διασφαλίζουν ότι οι τεράστιες ποσότητες δεδομένων που παράγονται από αισθητήρες και ασφαρίζονται σε Blockchain μπορούν να ερμηνευθούν και να αξιοποιηθούν με ουσιαστικό τρόπο. Χωρίς προσβάσιμη και ευαίσθητη στο περιβάλλον αλληλεπίδραση των χρηστών, ακόμη και τα πιο προηγμένα συστήματα κινδυνεύουν να κατακλύσουν τους χειριστές και τους

υπεύθυνους λήψης αποφάσεων. Έτσι, οι λειτουργικές και μη λειτουργικές απαιτήσεις, η μοντελοποίηση που βασίζεται σε UML και η αρχιτεκτονική σε επίπεδο συστήματος πρέπει να δώσουν προτεραιότητα όχι μόνο στην τεχνική απόδοση αλλά και στη χρηστικότητα, την προσβασιμότητα και την ανταπόκριση.

Συνολικά, τα ευρήματα υποδηλώνουν ότι το μέλλον της ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας βρίσκεται στη συνεργατική ενσωμάτωση των τεχνολογιών IoT και Blockchain, καθοδηγούμενη από κανονιστικά πλαίσια και ενισχυμένη από αρχές σχεδιασμού με επίκεντρο τον χρήστη. Ενώ οι τρέχουσες εφαρμογές δείχνουν ήδη μετρήσιμα οφέλη στις βιομηχανίες τροφίμων, φαρμακευτικών προϊόντων και logistics, απαιτείται περαιτέρω έρευνα και ανάπτυξη για την υπέρβαση των υφιστάμενων τεχνολογικών περιορισμών. Οι υβριδικές αρχιτεκτονικές που συνδυάζουν το Blockchain με υπολογιστικές νέφους και αιχμής, τα τυποποιημένα πρωτόκολλα IoT και τους προηγμένους μηχανισμούς διακυβέρνησης δεδομένων αποτελούν υποσχόμενους δρόμους για την βιώσιμη κλιμάκωση αυτών των λύσεων.

Συμπερασματικά, η υιοθέτηση της παρακολούθησης με δυνατότητα IoT, της ασφάλειας δεδομένων που βασίζεται στο Blockchain και των έξυπνων διεπαφών χρήστη παρέχει μια ολιστική βάση για τον εκσυγχρονισμό της ψυχρής εφοδιαστικής αλυσίδας. Αυτές οι καινοτομίες όχι μόνο ενισχύουν την επιχειρησιακή αποτελεσματικότητα και τη συμμόρφωση, αλλά και χτίζουν την εμπιστοσύνη μεταξύ των ενδιαφερόμενων μερών, συμβάλλοντας τελικά σε ασφαλέστερα, πιο διαφανή και πιο βιώσιμα παγκόσμια δίκτυα εφοδιασμού. Η σύγκλιση της τεχνολογίας, της ρύθμισης και του ανθρωποκεντρικού σχεδιασμού σηματοδοτεί έτσι ένα αποφασιστικό βήμα προς το μέλλον της ασφαλούς και έξυπνης διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Βιβλιογραφία

- 101Blockchains. (2021). Blockchain vs Database: Understanding the difference. 101Blockchains.
- Abad, E., Palacio, F., Nuin, M., De Zarate, A. G., Juarros, A., Gómez, J. M., & Marco, S. (2020). RFID smart tag for temperature monitoring of perishables across the supply chain. *Sensors*, 20(19), 5510. <https://doi.org/10.3390/s20195510>
- Aboubakar, M., Kellil, M. and Roux, P. (2021). A review of IoT Network Management: Current Status and Perspectives. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 34(7). doi:<https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.03.006>.
- Affleck, S. (2022). The impact of smart contracts on financial services and supply chain management. *Johnston Clem News*.
- Ahmad, K., Islam, M. S., Jahin, M. A., & Mridha, M. F. (2024). Analysis of Internet of Things implementation barriers in the cold supply chain: An integrated ISM-MICMAC and DEMATEL approach. *ArXiv Preprint*.
- Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347–2376. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2444095>
- Albrecht, J. P. (2016). How the GDPR will change the world. *European Data Protection Law Review*, 2(3), 287–289. <https://doi.org/10.21552/EDPL/2016/3/4>
- Ali, R., Dalpiaz, F., & Giorgini, P. (2019). Requirements engineering and UML: An overview of practices and emerging directions. *Journal of Systems and Software*, 149, 101–121. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2018.12.006>
- Almarri, S., Aljughaiman, A., (2024). Blockchain technology for IoT security and trust. *Sustainability*, 16(23), Article 10177.
- Almonte, J. T., Boominathan, S. A., & Nascimento, N. (2025). Automated non-functional requirements generation in software engineering with large language models: A comparative study. *arXiv preprint*.

AltexSoft. (2023). Functional and non-functional requirements specification and types. AltexSoft Blog.

An, M., Fan, Q., Yu, H., & Zhao, H. (2023). Blockchain technology research and application: A systematic literature review and future trends. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.14802>

Anonymous. (2024). Why a Cold-Storage Company Just Delivered the Year's Hottest IPO [Historical overview of cold-storage industry]. The Wall Street Journal. Available at: <https://www.wsj.com/business/lineage-ipo-seafood-produce-cold-storage-delivery-f9c1e308> [Accessed: 15 September 2025]

ASERS Publishing. (2019). Legal regulation of perishable foodstuffs transportation. *Journal of Advanced Research in Law & Economics*, 10(2), 5012.

Bankov, D., Khorov, E., & Lyakhov, A. (2016). On the limits of LoRaWAN channel access. In 2016 International Conference on Engineering and Telecommunication (EnT) (pp. 10–14). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EnT.2016.017>

Bass, L., Clements, P., & Kazman, R. (2021). *Software architecture in practice* (4th ed.). Addison-Wesley.

Bergström, J. and Kasper Hornbæk (2024). DIRA: A model of the user interface. *International Journal of Human-Computer Studies*, pp.103381–103381. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2024.103381>.

Bhattacharyya, S., Dey, N., & Roy, A. (2015). Sensor selection and deployment in wireless sensor networks for temperature monitoring. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 11(7), 789054. <https://doi.org/10.1155/2015/789054>

Blockapps. (2024, April 16). The principles of blockchain technology: How it works. Blockapps Blog.

Booch, G., Rumbaugh, J., & Jacobson, I. (2017). *The Unified Modeling Language user guide* (2nd ed.). Addison-Wesley.

Bormann, C., Castellani, A. P., & Shelby, Z. (2014). CoAP: An application protocol for billions of tiny Internet nodes. *IEEE Internet Computing*, 18(2), 62–67. <https://doi.org/10.1109/MIC.2014.20>

Bosona, T., & Gebresenbet, G. (2023). The role of blockchain technology in promoting smart and sustainable agri-food supply chain management. *Sustainability*, 15(16), 12345.

Bottoni, P., Gessa, N., Massa, G., Pareschi, R., Selim, H., & Arcuri, E. (2020). Intelligent smart contracts for innovative supply chain management. *Frontiers in Blockchain*, 3, Article 535787.

Bradford, A. (2020). *The Brussels Effect: How the European Union rules the world*. Oxford University Press.

Cannon Logistics. (2025, March 27). The hidden costs of poor refrigerated transport. Cannon Logistics Blog.

Casino, F., Dasaklis, T. K., & Patsakis, C. (2019). A systematic literature review of blockchain-based applications: Current status, classification and open issues. *Telematics and Informatics*, 36, 55–81. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2018.11.006>

CCJ Digital. (2024). How IoT is revolutionizing the trucking industry. CCJ Digital. Available at: <https://www.ccdigital.com/technology/article/15666807/how-iot-is-revolutionizing-the-trucking-industry> [Accessed: 27 August 2025]

CEFTA Secretariat. (2021). Additional Protocol 5 to the CEFTA Agreement: Customs procedures, transit, and documentation. CEFTA Secretariat.

CEFTA Secretariat. (2025). Green Corridors/ Green Lanes initiative for essential goods transit during COVID-19. CEFTA Secretariat.

Cheikh, I., Roy, S., Sabir, E., & Aouami, R. (2025). Energy, scalability, data and security in massive IoT: Current landscape and future directions. *Environmental Systems Research*, 14(1), Article 11. <https://doi.org/10.1186/s40068-025-00403-9>

Chikov, I. A., Koliadenko, S. V., Supryhan, V. A., Tabenska, O. I., Nitsenko, V. S., & Holinko, O. V. (2023). Smart contracts and business process automation: The technical aspect. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 5.

Chris, E. (2025). Integration of blockchain for fraud prevention. ResearchGate. Available at: https://www.researchgate.net/publication/387958719_Integration_of_Blockchain_for_Fraud_Prevention [Accessed: 05 November 2025]

Cory, N., & Castro, D. (2023). GDPR one year later: Costs and uncertainties hinder innovation and growth. Information Technology and Innovation Foundation.

Crosby, M., Pattanayak, P., Verma, S., & Kalyanaraman, V. (2016). Blockchain technology: Beyond bitcoin. *Applied Innovation Review*, 2(6-10), 71–82.

CSI-SPA. (2025). ATP Regulation for perishable food transport: refrigerated transport at controlled temperatures. CSI-SPA Technical Brief.

Da Silva, V. T., Almeida, J. P., & Falbo, R. A. (2019). Software architecture for the Internet of Things: A systematic mapping study. *Journal of Systems and Software*, 149, 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2018.11.025>

Damco Group. (2025). The role of immutability in blockchain fraud prevention. Damco Group Blog.

Datta, A., Mukhopadhyay, A., Datta, A., & Ganguly, R. (2024). ALIVE: A low-cost interactive vaccine storage environment module ensuring easy portability and remote tracking of operational logistics to the last mile. ArXiv Preprint.

De Martino, V. and Palomba, F. (2025). Classification and challenges of non-functional requirements in ML-enabled systems: A systematic literature review. *Information and Software Technology*, 181, p.107678. doi:<https://doi.org/10.1016/j.infsof.2025.107678>.

DHL. (2023). Perishable food customs clearance: Why your shipments are getting stuck. Zarach Logistics Blog.

Directorate for EU Affairs. (2025). Chapter 14 – Transport Policy. Government of Turkey.

Dobing, B., & Parsons, J. (2016). How UML is used. *Communications of the ACM*, 59(5), 91–99. <https://doi.org/10.1145/2898963>

Doebelin, E. O., & Manik, D. N. (2017). *Measurement systems: Application and design* (7th ed.). McGraw-Hill Education.

Dong, S. (2023). Blockchain technology and application: An overview. *Nature Public Health Emergency Collection*.

Dongmo, C. (2024). A review of non-functional requirements analysis: Integration within the software development life cycle. *Computing*, 13(12), Article 308.

Dorri, A., Kanhere, S. S., Jurdak, R., & Gauravaram, P. (2017). Blockchain for IoT security and privacy: The case study of a smart home. In *2017 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops (PerCom Workshops)* (pp. 618–623). IEEE. <https://doi.org/10.1109/PERCOMW.2017.7917634>

Dragoni, N., Giazzi, A., Mazzara, M., Montesi, F., Mustafin, R., & Safina, L. (2017). Microservices: Yesterday, today, and tomorrow. In *Present and Ulterior Software Engineering* (pp. 195–216). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67425-4_12

Duan, K., Onyeaka, H. and Pang, G. (2024). Leveraging blockchain to tackle food fraud: Innovations and obstacles. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18, p.101429. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101429>.

European Commission. (2005). Commission Regulation (EC) No 37/2005 of 12 January 2005 on the monitoring of temperatures in the means of transport, warehousing and storage of quick-frozen foodstuffs intended for human consumption. *Official Journal of the European Union*, L10.

European Commission (2024)^a. Labelling and packaging requirements for foodstuffs in the EU. European Commission Trade Policy.

European Commission (2024)^b. TRACES—Trade Control and Expert System overview and functionality. European Commission Trade & Customs.

European Commission (2025). Customs clearance documents and procedures within the EU. European Commission.

European Parliament & Council. (2004). Regulation (EC) No 852/2004 on the hygiene of foodstuffs. *Official Journal of the European Union*.

Fischer, J. E., Greenhalgh, C., Ramchurn, S. D., Benford, S., & Rodden, T. (2020). Notification management for pervasive computing. *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, 27(2), 1–40. <https://doi.org/10.1145/3386251>

Francisco, K., & Swanson, D. (2018). The supply chain has no clothes: Technology adoption of blockchain for supply chain transparency. *Logistics*, 2(1), 2. <https://doi.org/10.3390/logistics2010002>

Garcia, A. (2025). A systematic review of IoT-based air quality monitoring and the impact of artificial intelligence. *Artificial Intelligence Review*, 58(3), 845–872. <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11277-9>

Gellert, R. (2021). Understanding the notion of risk in the General Data Protection Regulation. *Computer Law & Security Review*, 41, 105539. <https://doi.org/10.1016/j.clsr.2021.105539>

Ghiani, G., Paternò, F., Santoro, C., & Spano, L. D. (2017). Designing adaptive user interfaces for industrial IoT monitoring. *Personal and Ubiquitous Computing*, 21(5), 799–817. <https://doi.org/10.1007/s00779-017-1066-1>

Goddard, M. (2017). The EU General Data Protection Regulation (GDPR): European regulation that has a global impact. *International Journal of Market Research*, 59(6), 703–705. <https://doi.org/10.2501/IJMR-2017-050>

Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645–1660. <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>

Gündoğan, C., Kietzmann, P., Lenders, M., Petersen, H., Schmidt, T.C. and Wählisch, M. (2018). NDN, CoAP, and MQTT: A Comparative Measurement Study in the IoT. *arXiv (Cornell University)*, pp.159–171. doi:<https://doi.org/10.48550/arxiv.1806.01444>.

Hashem, I. A. T., Chang, V., Anuar, N. B., Adewole, K., Yaqoob, I., Gani, A., ... & Chiroma, H. (2015). The role of big data in smart city. *International Journal of Information Management*, 36(5), 748–758. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2016.05.002>

Huang, H.-S., Chang, T.-S., & Wu, J.-Y. (2022). A secure file sharing system based on IPFS and blockchain (preprint). *arXiv*.

Huang, C.-T., Huang, L., Qin, Z., Yuan, H., Zhou, L., Varadharajan, V. and Kuo, C.-C. . J. (2014). Survey on securing data storage in the cloud. *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, 3(1). doi:<https://doi.org/10.1017/atsip.2014.6>.

- Hussain, A., Rehman, M., & Khan, M. A. (2017). UML in practice: A survey on modeling and development. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 8(2), 220–229. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2017.080229>
- IATA. (2023). *Perishable Cargo Regulations (PCR)* (Published edition). International Air Transport Association.
- IBM. (2019, January 3). What's the difference between a blockchain and a database?. IBM THINK.
- I.C.E. Transport. (2025). Understanding customs regulations in Polan. I.C.E. Transport Blog.
- IRJMETS. (2025). Smart contracts and AI: Automating business processes. *International Research Journal of Modern Engineering & Technology Services*, April Issue.
- Ironhack. (2024). Functional vs non-functional requirements: Understanding the core differences and examples. Ironhack Blog. Available at: <https://www.ironhack.com/gb/blog/functional-vs-non-functional-requirements-understanding-the-core-differences-and> [Accessed: 05 October 2025]
- Islam, S., & Apu, K. U. (2024). Decentralized vs. centralized database solutions in blockchain: Advantages, challenges and use cases. *Journal of Innovation, Engineering & Emerging Technology*, 3(4), 58–68. <https://doi.org/10.62304/jieet.v3i04.195>
- ISO (2018). *ISO 22000 Food Safety Management*. [online] ISO. Available at: <https://www.iso.org/iso-22000-food-safety-management.html>.
- ISO (International Organization for Standardization). (2014). *ISO 9241: Ergonomics of human-system interaction (Parts including dialogue principles, etc.)*. ISO.
- Jarašūnienė, A., Cižiūnienė, K., & Cereška, A. (2023). Research on impact of IoT on warehouse management. *Sensors*, 23, 2213.
- Jedermann, R., & Lang, W. (2017). Supervising food quality during transport using sensor systems. *Food Control*, 17(4), 542–552. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2017.02.003>
- Jia, L. (2024). A review of research on information traceability based on blockchain: Application in food safety, pharmaceuticals, and energy. *Electronics*, 13(20), 4140.

JUSDA Global. (2024, September 3). Effective cold chain logistics: Tips for food and pharma success. JUSDA Global.

Kang, S., & Park, C. (2015). A microcontroller-based smart temperature sensor system for IoT applications. *IEEE Sensors Journal*, 15(9), 4990–4997. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2015.2434096>

Karaduman, Ö., & Gülhas, G. (2025). Blockchain-enabled supply chain management: A review. *Applied Sciences*, 15(9), 5168.

Kaur, K., & Sood, S. K. (2015). An energy-efficient architecture for the Internet of Things (IoT). *IEEE Systems Journal*, 11(2), 796–805. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2015.2469676>

Kim, S., Park, J., Jeong, Y., & Lee, S. E. (2023). Intelligent monitoring system with privacy preservation based on edge AI. *Micromachines*, 14(9), 1749. <https://doi.org/10.3390/mi14091749>

Klopott, M. (2019). Perishable food cargo losses and damage in cold chains: An empirical analysis. Wrocław University of Environmental and Life Sciences Working Papers.

Kshetri, N. (2018). 1 Blockchain's roles in strengthening cybersecurity and protecting privacy. *Telecommunications Policy*, 42(4), 337–349. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2017.09.003>

Kudelina, K., Vaimann, T., Asad, B., Rassölkin, A., Kallaste, A., & Demidova, G. (2021). Trends and challenges in intelligent condition monitoring of electrical machines using machine learning. *Applied Sciences*, 11(6), 2761. <https://doi.org/10.3390/app11062761>

Lamberty, A. and Kreyenschmidt, J. (2025). Technical, process-related and sustainability requirements for IoT-based temperature monitoring in fruit and vegetable supply chains. *Discover Food*, 5(1). doi:<https://doi.org/10.1007/s44187-025-00427-1>.

Lazar, J., Goldstein, D. and Taylor, A. (2015). Ensuring digital accessibility through process and policy. Amsterdam Elsevier, Mk Morgan Kaufmann.

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

LFDE Decentralized Trust. (2022). How Walmart brought unprecedented transparency to the food supply chain with Hyperledger Fabric: Case study.

Li, W. (2022). Design factors to improve consistency and adaptation in multi-terminal interfaces. *Sustainability*, 14(15), Article 9131.

Marengo, A. (2024). Navigating the nexus of AI and IoT: A comprehensive review. *Internet of Things*, 23, 100854. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100854>

Mehrotra, A., Pejovic, V., Vermeulen, J., Hendley, R., & Musolesi, M. (2016). My phone and me: Understanding people's receptivity to mobile notifications. *Proceedings of the 2016 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1021–1032. <https://doi.org/10.1145/2858036.2858566>

Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., & Meyer, F. (2019). A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment. *ICT Express*, 5(1), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.icte.2017.12.005>

Merlec, M. M. (2024). Blockchain-based decentralized storage systems for data self-sovereignty: A comparative analysis. *Sustainability*, 16(17), 7671.

Murray, A., Kuban, S., José, C., & Chowdhury, A. (2021). Blockchain-enabled supply chains: Real-world applications, challenges and opportunities. *California Management Review*, 63(2), 83–95. <https://doi.org/10.1177/0008125621992576>

Muhammad, Namasivayam, N. and Demirovic, A. (2024). Food Cold Chain Logistics and Management: A Review of Current Development and Emerging Trends. *Journal of Agriculture and Food Research*, 18(101343), pp.101343–101343. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.101343>.

Naik, N. (2017). Choice of effective messaging protocols for IoT systems: MQTT, CoAP, AMQP and HTTP. 2017 IEEE International Systems Engineering Symposium (ISSE), 1–7. <https://doi.org/10.1109/SysEng.2017.8088251>

NatLawReview. (2021). Supply chains using smart contracts. *The National Law Review*. Available at: <https://natlawreview.com/article/smart-supply-chains-using-smart-contracts> [Accessed:13 September 2025]

Nguyen, L. T., Nguyen, L. D., Hoang, T., Bandara, D., Wang, Q., Lu, Q., Xu, X., Zhu, L., Popovski, P., & Chen, S. (2023). Blockchain-empowered trustworthy data sharing: Fundamentals, applications, and challenges (preprint). arXiv.

Norman, D. A., & Nielsen, J. (2015). The definition of user experience (UX). *Interactions*, 22(1), 14–15. <https://doi.org/10.1145/2723672>

Number Analytics. (2025). Perishable goods shipping: International trade law. Number Analytics Blog.

Object Management Group (OMG). (2017). Unified Modeling Language (UML) specification version 2.5.1. OMG.

Oladele, O.K. (2024). Internet of Things (IoT) in Logistics: Transforming Supply Chains with Connected Devices and Data Analytics. [online] Research Gate. Available at: https://www.researchgate.net/publication/385137397_Internet_of_Things_IoT_in_Logistics_Transforming_Supply_Chains_with_Connected_Devices_and_Data_Analytics.

oneM2M. (2025). oneM2M standard releases and architecture overview. Available at: https://www.onem2m.org/images/about/2025/oneM2M_Brochure_Who_we_are_20250210.pdf [Accessed: 31 October 2025]

Oppenheim, G. (2024). How IoT-enabled monitoring is changing cold chain logistics. Telit Blog. Available at: <https://www.telit.com/blog/iot-enabled-monitoring-changing-cold-chain-logistics-forever/> [Accessed: 29 August 2025]

Orfanos, V.A., Kaminaris, S.D., Papageorgas, P., Piromalis, D. and Kandris, D. (2023). A Comprehensive Review of IoT Networking Technologies for Smart Home Automation Applications. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 12(2), p.30. doi:<https://doi.org/10.3390/jsan12020030>.

Pajić, V., Andrejić, M., & Chatterjee, P. (2024). Enhancing cold chain logistics: A framework for advanced temperature monitoring in transportation and storage. *Mechatronics and Intelligent Transportation Systems*, 3(1), 16–30.

- Pan, J., & Yang, Z. (2017). Cybersecurity challenges and opportunities in the new “edge computing + IoT” world. *IEEE Internet of Things Journal*, 7(8), 6378–6390. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2746759>
- Perera, C., Zaslavsky, A., Christen, P., & Georgakopoulos, D. (2014). Context-aware computing for the Internet of Things: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(1), 414–454. <https://doi.org/10.1109/SURV.2013.042313.00197>
- Pielot, M., Dingler, T., Pedro, J. S., & Oliver, N. (2015). When attention is not scarce: Detecting boredom from mobile phone usage. *Proceedings of the 2015 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*, 825–836. <https://doi.org/10.1145/2750858.2804252>
- PixelPlex. (2024, December 23). Blockchain database vs traditional database. PixelPlex Blog.
- Protopappas, L. (2025). IoT services for monitoring food supply chains. *Applied Sciences*, 15(13), 7602.
- Pushpakumar, R., Sanjaya, K., Rathika, S., Alawadi, A. H., Makhzuna, K., & Venkatesh, S. (2023). Human–Computer Interaction: Enhancing User Experience in Interactive Systems. *E3S Web of Conferences*, 399, 04037.
- PwC. (2025). The hidden costs of non-compliance in the customs duties sector. *Trade Duty Refund Blog*. Available at: <https://blog.tradedutyrefund.com/the-hidden-costs-of-non-compliance-in-the-customs-duties-sector/> [Accessed: 17 September 2025]
- Ramírez-Gordillo, T., Maciá-Lillo, A., Pujol, F. A., García-D’Urso, N., Azorín-López, J., & Mora, H. (2025). Decentralized identity management for Internet of Things (IoT) devices using IOTA blockchain technology. *Future Internet*, 17(1), Article 49.
- Raza, U., Kulkarni, P., & Sooriyabandara, M. (2017). Low power wide area networks: An overview. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2), 855–873. <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2652320>
- Rejeb, A., Keogh, J. G., & Treiblmaier, H. (2020). How blockchain technology can benefit marketing: Six pending research areas. *Frontiers in Blockchain*, 3, 3. <https://doi.org/10.3389/fbloc.2020.00003>

- Rita, J., Salvado, J., Rocha, H. da and Espírito-Santo, A. (2025). A Comprehensive Review of IoT Standards: The Role of IEEE 1451 in Smart Cities and Smart Buildings. *Smart Cities*, 8(4), p.108. doi:<https://doi.org/10.3390/smartcities8040108>.
- Robiolo, G., Scott, E., Matalonga, S., & Felderer, M. (2019). Technical debt and waste in non-functional requirements documentation: An exploratory study. arXiv preprint.
- Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., & Shen, L. (2019). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International Journal of Production Research*, 57(7), 2117–2135. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1533261>
- Sabt, M., Achemlal, M., & Bouabdallah, A. (2015). Trusted execution environment: What it is, and what it is not. In 2015 IEEE Trustcom/BigDataSE/ISPA (Vol. 1, pp. 57–64). IEEE. <https://doi.org/10.1109/Trustcom.2015.357>
- Sanctorum, A., Luka Rukonić and Signer, B. (2021). Design Requirements for Recommendations in End-User User Interface Design. *Lecture Notes in Computer Science*, pp.204–212. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-79840-6_14.
- Satyanarayanan, M. (2017). The emergence of edge computing. *Computer*, 50(1), 30–39. <https://doi.org/10.1109/MC.2017.9>
- Schneiderman, B. (1998). Eight golden rules of interface design. In *Designing the User Interface: Strategies for Effective Human-Computer Interaction* (4th ed.). Addison-Wesley.
- SensorThings API. (2025). OGC SensorThings API standard overview. [Standard documentation].
- Sethi, P., & Sarangi, S. R. (2017). Internet of Things: Architectures, protocols, and applications. *Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2017, 9324035. <https://doi.org/10.1155/2017/9324035>
- Shah, J., & Patel, D. (2018). Use of UML for modeling IoT-based healthcare applications. *Procedia Computer Science*, 132, 1867–1874.
- Shankar, P. (2020). Towards the formalization of non-functional requirements. *Requirements Engineering*, 25(4).

- Shelby, Z., Hartke, K., & Bormann, C. (2015). The Constrained Application Protocol (CoAP), RFC 7252. IETF.
- Shi, H., Zhang, Q., & Qin, J. (2024). Cold chain logistics and joint distribution: A review of fresh logistics modes. *Systems*, 12(7), 264.
- Shi, W., Cao, J., Zhang, Q., Li, Y., & Xu, L. (2016). Edge computing: Vision and challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 3(5), 637–646.
- Singh, S. K., & Kumar, S. (2021). Blockchain technology: Introduction, integration and security issues with IoT. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2101.10921>
- Sousa, P.R., Resende, J.S., Martins, R. and Antunes, L. (2020). The case for blockchain in IoT identity management. *Journal of Enterprise Information Management*, ahead-of-print(ahead-of-print). doi:<https://doi.org/10.1108/jeim-07-2018-0148>.
- Starke, J., Göbel, S., & Tarín, C. (2019). Haptic notification systems for safety-critical environments: A review. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 49(6), 516–526.
- Sundaram, S., Du, W. and Zhao, Z. (2019). A Survey on LoRa Networking: Research Problems, Current Solutions and Open Issues. [online] doi:<https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.10195>.
- Swedish Food Retailers Federation (2021). Industry guideline for correct temperature during storage and transport of refrigerated and frozen foods. Council for the Refrigerated and Frozen Supply Chain.
- Syafrudin, M., Alfian, G. and Fitriyani, N.L. (2025). Smartphone-Based Food Traceability System Using NoSQL Database. [online] arXiv.org. Available at: <https://arxiv.org/abs/2506.02033>.
- Testi, N. (2023). Blockchain technology for supply chain traceability: The case of SMEs of the Made in Italy. *Piccola Impresa / Small Business*, 2, Article 3501.
- Tian, F. (2017). A supply chain traceability system for food safety based on HACCP, blockchain & Internet of Things. In 2017 International Conference on Service Systems and Service Management (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSSSM.2017.7996119>

Tikkanen-Piri, C., Rohunen, A., & Markkula, J. (2018). EU General Data Protection Regulation: Changes and implications for personal data collecting companies. *Computer Law & Security Review*, 34(1), 134–153. <https://doi.org/10.1016/j.clsr.2017.05.015>

Todd, S. (2016). Refrigerated medicinal products, part 1: receipt and storage - some things to consider - MHRA Inspectorate. [online] mhrainspectorate.blog.gov.uk. Available at: <https://mhrainspectorate.blog.gov.uk/2016/01/26/refrigerated-medicinal-products-part-1-receipt-and-storage-some-things-to-consider/>.

Tripathi, G., Ahad, M.A. and Casalino, G. (2023). A Comprehensive Review of Blockchain technology: Underlying Principles and Historical Background with Future Challenges. *Decision Analytics Journal*, [online] 9(1), p.100344. doi:<https://doi.org/10.1016/j.dajour.2023.100344>.

U.S. Food and Drug Administration. (2016). Sanitary transportation of human and animal food; final rule. Federal Register. Available at: <https://www.federalregister.gov/documents/2016/04/06/2016-07330/sanitary-transportation-of-human-and-animal-food> [Accessed: 31 October 2025]

UK Department for Transport. (c. 2018). Understanding the impact of emerging technologies on the freight sector. [Report]. Available at: https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5c5db919e5274a3164e89496/fom_emerging_technologies_freight.pdf [Accessed: 31 October 2025]

UNECE (2024)^a. Transport of perishable foodstuffs [UNECE Working Party information sheet]. United Nations Economic Commission for Europe.

UNECE (2024)^b. Transport of perishable foodstuffs: ATP Agreement and updates. United Nations Economic Commission for Europe.

Visigistics. (2025). Impact of customs clearance delays on global shipping time. Visigistics Insights. Available at: <https://www.visigistics.com/resources/impact-of-customs-clearance-delays-on-global-shipping-time> [Accesses: 02 October 2025]

Voigt, P., & Von dem Bussche, A. (2017). The EU General Data Protection Regulation (GDPR): A practical guide. Springer International Publishing.

- Vos, D., Overweel, L., Raateland, W., Vos, J., Bijman, M., Pigmans, M., & Erkin, Z. (2018). DEFenD: A secure and privacy-preserving decentralized system for freight declaration. arXiv preprint.
- Wakili, A. and Bakkali, S. (2025). Privacy-Preserving Security of IoT Networks: A Comparative Analysis of Methods and Applications. *Cyber Security and Applications*, [online] p.100084. doi:<https://doi.org/10.1016/j.csa.2025.100084>.
- Wang, F., Pang, Y., Bai, L., Zhang, Z., & Chen, H. (2025). Predictive emissions monitoring systems: Trends, technologies, and regulatory implications. *Environmental Systems Research*, 14(1), Article 15. <https://doi.org/10.1186/s40068-025-00405-7>
- Wang, K. and Du, N. (2025). Real-time monitoring and energy consumption management strategy of cold chain logistics based on the internet of things. *Energy Informatics*, 8(1). doi:<https://doi.org/10.1186/s42162-025-00493-w>.
- Wang, L. and Hsu, H.-H. (2025). IoT technology in maritime logistics management: exploration of data analysis methods. *Discover Internet of Things*, 5(1). doi:<https://doi.org/10.1007/s43926-025-00167-9>.
- Wang, W., Yan, B., Chai, B., Shen, R., Dong, A. and Yu, J. (2024). EBIAS: ECC-enabled blockchain-based identity authentication scheme for IoT device. *High-Confidence Computing*, pp.100240–100240. doi:<https://doi.org/10.1016/j.hcc.2024.100240>.
- Werner, C., Li, Z. S., Lowlind, D., Elazhary, O., Ernst, N., & Damian, D. (2021). Continuously managing NFRs: Opportunities and challenges in practice. arXiv preprint.
- Witczak, D., & Szymoniak, S. (2024). Review of monitoring and control systems based on Internet of Things. *Applied Sciences*, 14(19), 8943. <https://doi.org/10.3390/app14198943>
- Wollett, W. G. (2023). Reefer madness: Handling refrigerated cargo claims. WGLaw News. Available at: <https://www.wglaw.com/news/reefer-madness-handling-refrigerated-cargo-claims/> [Accessed: 02 October 2025]
- World Health Organization. (2011). Model guidance for the storage and transport of time- and temperature-sensitive pharmaceutical products (Annex 9). WHO Technical Report Series No. 961.

- World Trade Organization. (2019). Trade Facilitation Agreement*, Article 7.9: Release and clearance of perishable goods. WTO Secretariat.
- Yaga, D., Mell, P., Roby, N., & Scarfone, K. (2018). Blockchain technology overview (NISTIR 8202). National Institute of Standards and Technology.
- Yalli, J.S., Hasan, M.H., Jung, L.T. and Al-Selwi, S.M. (2025). Authentication schemes for Internet of Things (IoT) networks: A systematic review and security assessment. *Internet of Things*, 30, p.101469. doi:<https://doi.org/10.1016/j.iot.2024.101469>.
- Yiu, N. C. K. (2021). Toward blockchain-enabled supply chain anti-counterfeiting and traceability. arXiv preprint.
- Yli-Huumo, J., Ko, D., Choi, S., Park, S., & Smolander, K. (2016). Where is current research on blockchain technology?—A systematic review. *PLoS ONE*, 11(10), e0163477. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0163477>
- Zarach Logistics. (2025). Perishable food customs clearance: Why your shipments are getting stuck. Zarach Logistics Blog. Available at: <https://zarachlogistics.com/perishable-food-customs-clearance-why-your-shipments-are-getting-stuck> [Accessed: 17 September 2025]
- Zhang, P., & Jacobsen, H. A. (2018). Towards dependable, scalable, and pervasive distributed ledgers with Blockchains. In *Proceedings of the VLDB Endowment*, 10(12), 1730–1741. <https://doi.org/10.14778/3137765.3137770>
- Zheng, Z., Xie, S., Dai, H. N., & Wang, H. (2018). Blockchain challenges and opportunities: A survey. *International Journal of Web and Grid Services*, 14(4), 352–375.
- Zheng, Z., Xie, S., Dai, H. N., Chen, X., & Wang, H. (2017). An overview of blockchain technology: Architecture, consensus, and future trends. In *2017 IEEE International Congress on Big Data (BigData Congress)* (pp. 557–564). IEEE. <https://doi.org/10.1109/BigDataCongress.2017.85>
- Zhu, D. (2025). A survey of data security sharing. *Symmetry*, 17(8), 1259.