



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ
ΠΟΛΥΤΕΧΝΙΚΗ ΣΧΟΛΗ

ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ
ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΚΩΝ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΑΚΩΝ ΣΥΣΤΗΜΑΤΩΝ

ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΧΡΗΣΗΣ ΤΗΣ BLOCKCHAIN
ΣΤΗΝ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΤΗΣ ΕΦΟΔΙΑΣΤΙΚΗΣ ΑΛΥΣΙΔΑΣ

«SURVEY ON THE USE OF BLOCKCHAIN IN SUPPLY CHAIN MANAGEMENT»

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

ΚΙΟΡΝΤΙΑ ΔΙΟΝΥΣΙΟΥ

Ιούλιος 2025

Η Μεταπτυχιακή Διατριβή κατατέθηκε στο Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων της Πολυτεχνικής Σχολής του Πανεπιστημίου Αιγαίου σε μερική εκπλήρωση των απαιτήσεων για το Μεταπτυχιακό Δίπλωμα ειδίκευσης στην Ασφάλεια Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

Η ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΔΙΔΑΣΚΟΝΤΩΝ
ΕΠΙΚΥΡΩΝΕΙ ΤΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

του

Κιόρντια Διονύσιου

Επιβλέπων:

Αναπληρωτής Καθηγητής Κυριάκος Κρητικός

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών

και Επικοινωνιακών Συστημάτων

Μέλος Επιτροπής Εξέτασης:

Καθηγητής Σπύρος Κοκολάκης

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών

και Επικοινωνιακών Συστημάτων

Μέλος Επιτροπής Εξέτασης:

Καθηγήτρια Μαρία Καρύδα

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών

και Επικοινωνιακών Συστημάτων

© 2025

του

ΚΙΟΡΝΤΙΑ ΔΙΟΝΥΣΙΟΥ

Τμήμα Μηχανικών Πληροφοριακών και Επικοινωνιακών Συστημάτων

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΙΓΑΙΟΥ

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Στο πλαίσιο της ολοκλήρωσης της μεταπτυχιακής μου εργασίας, θα ήθελα να εκφράσω την ευγνωμοσύνη μου και να ευχαριστήσω θερμά όσους συνέβαλαν σε αυτή ώστε να ευοδωθούν οι προσπάθειές μου. Κατά τη διάρκεια των σπουδών μου, συστράφηκα με αξιόλογους και έμπειρους καθηγητές, που με την αγάπη και το ενδιαφέρον τους για την επιστήμη αποτέλεσαν παράδειγμα προς μίμηση, όχι μόνο σε επιστημονικό αλλά και σε προσωπικό επίπεδο. Με βοήθησαν να αποκτήσω εφόδια, χρήσιμα για την μετέπειτα πορεία της καριέρας μου.

Ιδιαίτερα, θα ήθελα να εκφράσω τις ευχαριστίες μου στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Κυριάκο Κρητικό, για την πολύτιμη καθοδήγηση, τη στήριξη και τις εύστοχες παρατηρήσεις του καθ' όλη την διάρκεια της εκπόνησης της εργασίας. Ακολουθώντας τις συμβολές του, δεν κατάφερα μόνο να ολοκληρώσω με επιτυχία την εργασία, αλλά και να αποκομίσω χρήσιμες γνώσεις ειδικού ενδιαφέροντος από τη μελέτη αυτή.

Τέλος, ευχαριστώ θερμά τους ανθρώπους που με στήριξαν από την αρχή αυτής της διαδρομής: τους συγγενείς, τους φίλους και τους συμφοιτητές μου, αλλά κυρίως την οικογένεια μου, καθώς εκείνοι μου παρείχαν την υποστήριξη, κατανόηση και υπομονή σε όλο αυτό το διάστημα της φοιτητικής μου πορείας. Δεν ξεχνώ, όμως, και τον άνθρωπο που παρά τις δυσκολίες δεν τα παράτησε, πάλεψε, επέμεινε και μου υπενθύμισε πως στη ζωή, όταν κάτι μπορούμε να το φανταστούμε και να το θελήσουμε, τότε μπορούμε και να το πετύχουμε· και αυτός δεν είναι άλλος από τον ίδιο μου τον εαυτό.

Υ.Γ. Όταν γνωρίζουμε το «γιατί», το «πώς» γίνεται εύκολο!

Αφιέρωση: «Στη μητέρα μου, για την ολόψυχη στήριξη και εμπιστοσύνη της.»

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

1ο Κεφάλαιο – Εισαγωγή	1
1.1 Blockchain στη Διαχείριση της Εφοδιαστικής Αλυσίδας.....	1
1.2 Αντικείμενο Διπλωματικής.....	3
1.3 Δομή της Διπλωματικής.....	3
2ο Κεφάλαιο – Υπόβαθρο.....	5
2.1 Εφοδιαστική Αλυσίδα & Διαχείριση	5
2.1.1 Ορισμός	5
2.1.2 Στοιχεία / Μέρη Εφοδιαστικής Αλυσίδας	5
2.1.3 Χαρακτηριστικά & Πλεονεκτήματα Εφοδιαστικής Αλυσίδας.....	8
2.1.4 Εφαρμογές / Τομείς Εφοδιαστικής Αλυσίδας	11
2.1.5 Συστήματα Εφοδιαστικής Αλυσίδας	12
2.1.6 Ζητήματα Εφοδιαστικής Αλυσίδας	18
2.2 Blockchain	20
2.2.1 Ορισμός	20
2.2.2 Τρόπος Λειτουργίας, Δομή Μπλοκ & Αρχιτεκτονική.....	21
2.2.3 Χαρακτηριστικά & Πλεονεκτήματα της Τεχνολογίας Blockchain	27
2.2.4 Είδη Blockchain	30
2.2.5 Αλγόριθμοι Συναίνεσης.....	31
2.2.6 Έξυπνα Συμβόλαια	33
2.2.7 Εφαρμογές της Blockchain	34
3ο Κεφάλαιο – Μεθοδολογία Συστηματικής Ανασκόπησης	36
3.1 Καθορισμός Ερευνητικών Ερωτημάτων	36
3.2 Αναζήτηση Άρθρων.....	37
3.3 Φιλτράρισμα Άρθρων	38
3.4 Ποσοτική Ανάλυση.....	40
4ο Κεφάλαιο – Ανάλυση.....	44
4.1 Εννοιολογική Εφαρμογή της Τεχνολογίας Blockchain στην Εφοδιαστική Αλυσίδα....	44
4.2 Κατηγοριοποίηση.....	48
4.2.1 Ταξινόμηση με Βάση τον Τύπο Blockchain.....	49
4.2.2 Ταξινόμηση ανά Τομέα Εφαρμογής	50
4.2.3 Ταξινόμηση με Βάση τον Σκοπό της Εφαρμογής.....	51
4.3 Ανάλυση.....	53

4.3.1 Τεχνολογικά Υποσυστήματα και Συσχέτιση με Εφαρμογές Blockchain στην Εφοδιαστική Αλυσίδα.....	53
4.3.2 Δυνατότητα Ενσωμάτωσης με IoT και Τεχνητή Νοημοσύνη	59
4.4 Σύγκριση	63
4.4.1 Κριτήρια και Κλίμακα Αξιολόγησης.....	63
4.4.2 Κατηγοριοποίηση Έργων	67
4.4.3 Συγκριτική Αξιολόγηση Έργων	69
4.4.4 Συγκριτική Αξιολόγηση Απόδοσης Κριτηρίων.....	71
4.4.5 Βασικά Συμπεράσματα.....	75
5ο Κεφάλαιο – Προκλήσεις.....	77
5.1 Παρουσίαση και Ανάλυση Προκλήσεων.....	77
5.1.1 Κλιμακωσιμότητα και Απόδοση	79
5.1.2 Διαλειτουργικότητα και Ενσωμάτωση με Υφιστάμενα Συστήματα.....	80
5.1.3 Ιδιωτικότητα και Διαφάνεια Δεδομένων	82
5.1.4 Έλλειψη Εξειδικευμένου Ανθρώπινου Δυναμικού.....	84
5.1.5 Οικονομικό Κόστος και Επένδυση.....	85
5.1.6 Εμπόδια Συμμόρφωσης.....	86
5.1.7 Δυσκολίες Ψηφιακής Ισότητας	88
5.1.8 Ζητήματα Ποιότητας και Αξιοπιστίας Δεδομένων.....	90
5.1.9 Προβλήματα Βιωσιμότητας.....	92
6ο Κεφάλαιο – Συμπεράσματα	95
6.1 Σύνοψη.....	95
6.2 Προσωπική Εκτίμηση	98
7ο Κεφάλαιο – Βιβλιογραφία.....	100

ΛΙΣΤΑ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Στοιχεία Εφοδιαστικής Αλυσίδας - (Al-Farsi et al., 2021).	8
Εικόνα 2: Διαδικασία επικύρωσης και εγγραφής συναλλαγής στη blockchain.	22
Εικόνα 3: Δομή και διασύνδεση μπλοκ στη blockchain.....	23
Εικόνα 4: Η αρχιτεκτονική της blockchain – (Salman et al., 2018).	24
Εικόνα 5: Διάγραμμα (1) – Κατανομή των άρθρων ανά τύπο.	41
Εικόνα 6: Διάγραμμα (2) – Κατανομή των άρθρων ανά εκδότη.	42
Εικόνα 7: Διάγραμμα (3) – Κατανομή των άρθρων ανά χρονολογία.....	42
Εικόνα 8: Κύρια χαρακτηριστικά της blockchain και τομείς εφαρμογής της στη διαχείριση εφοδιαστικής αλυσίδας (Dujak & Sajter, 2018).	45
Εικόνα 9: Η ενσωμάτωση της blockchain στη ροή δεδομένων και αγαθών της εφοδιαστικής αλυσίδας (Cole et al., 2019).	47
Εικόνα 10: Κατηγοριοποίηση εφαρμογής της τεχνολογίας blockchain στην εφοδιαστική αλυσίδα.	49
Εικόνα 11: Η σημαντικότητα της Τεχνητής Νοημοσύνης στο πεδίο της εφοδιαστικής αλυσίδας.....	62

ΛΙΣΤΑ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Εννοιολογική κατηγοριοποίηση πλατφορμών.	68
Πίνακας 2: Αξιολόγηση των έργων blockchain βάση των κριτηρίων.	69
Πίνακας 3: Αποτελέσματα κατάταξης των κριτηρίων.	70
Πίνακας 4: Επισκόπηση προκλήσεων στην υιοθέτηση της blockchain στην εφοδιαστική αλυσίδα.	78

ΑΚΡΩΝΥΜΙΑ

API	Application Programming Interface
APO	Advanced Planning & Optimization
APS	Advanced Planning & Scheduling
ASCP	Oracle Advanced Supply Chain Planning
B2A	Business-to-Administration
B2B	Business-to-Business
B2C	Business-to-Consumer
BI	Business Intelligence
CBDC	Central Bank Digital Currencies
CPS	Cyber-Physical Systems
CRM	Customer Relationship Management
CRS	Continuous Replenishment System
DAE	Deep AutoEncoder
DApps	Decentralized Applications
DeFi	Decentralized Funding
DPoS	Delegated Proof of Stake
DSCSA	Drug Supply Chain Security Act
EOQ	Economic Order Quantity
ERP	Enterprise Resource Planning
ESG	Environmental, Social, Governance
FIFO	First-in, First-out
FMCG	Fast-Moving Consumer Goods
FSMA	Food Safety Modernization Act
GSBN	Global Shipping Business Network
HP3D	Hybrid Peer-to-Peer Physical Distribution
IBM	International Business Machines Corporation
IoT	Internet of Things
JIT	Just-in-Time
KPI	Key Performance Indicators
ML	Machine Learning
MLP	Multilayer Perceptron
MRP	Material Requirements Planning
NFC	Near Field Communication
OSCM	Operations and Supply Chain Management
P2P	Peer-to-Peer
PBFT	Practical Byzantine Fault Tolerance
PKI	Public Key Infrastructure
PLM	Product Lifecycle Management
PoS	Proof of Stake
PoW	Proof of Work
QR	Quick Response
RFID	Radio Frequency Identification
ROI	Return on Investment
SCM	Supply Chain Management
SCMS	Supply Chain Management Systems
SLR	Systematic Literature Review

SME	Small and Medium-sized Enterprises
SRM	Supplier Relationship Management
SWRL	Semantic Web Rule Language
TMS	Transportation Management Systems
VMI	Vendor-Managed Inventory
WMS	Warehouse Management Systems
ZKP	Zero-Knowledge Proof
A.Π.Ε.	Ανανεώσιμες Πηγές Ενέργειας
ΓΚΠΔ	Γενικός Κανονισμός Προστασίας Δεδομένων
TN	Τεχνητή Νοημοσύνη

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Αυτή η εργασία διερευνά την ενσωμάτωση της τεχνολογίας blockchain στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας (SCM), με στόχο την αξιολόγηση των δυνατοτήτων της να ενισχύσει τη διαφάνεια, την ιχνηλασιμότητα, την ακεραιότητα των δεδομένων και την αποτελεσματικότητα. Οι παραδοσιακές αλυσίδες εφοδιασμού αντιμετωπίζουν συχνά προβλήματα, όπως ο κατακερματισμός των δεδομένων, η έλλειψη εμπιστοσύνης και η κακή ορατότητα. Η blockchain, ως ένα αποκεντρωμένο και απαραβίαστο καθολικό, προσφέρει καινοτόμες λύσεις σε αυτά τα προβλήματα, επιτρέποντας την ασφαλή και διαφανή ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των ενδιαφερόμενων μερών.

Η μελέτη εφαρμόζει μια συστηματική ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, αναλύοντας διάφορες εφαρμογές blockchain σε κλάδους, όπως τα τρόφιμα, τα φαρμακευτικά προϊόντα, η εφοδιαστική και το λιανικό εμπόριο. Βασικά κριτήρια — όπως η ιχνηλασιμότητα, η διαφάνεια, η οικονομική αποδοτικότητα και η διαλειτουργικότητα — αξιολογούνται χρησιμοποιώντας δομημένες μετρήσεις και συγκριτικά πλαίσια.

Τα ευρήματα υπογραμμίζουν τα δυνατά σημεία της blockchain στη βελτίωση της λογοδοσίας και του αυτοματισμού της εφοδιαστικής αλυσίδας μέσω έξυπνων συμβολαίων. Ωστόσο, προκλήσεις, όπως η κλιμακωσιμότητα, η νομική αβεβαιότητα, το υψηλό κόστος εφαρμογής και η ενσωμάτωση με παλαιότερα συστήματα, παραμένουν σημαντικά εμπόδια για την ευρεία υιοθέτησή της.

Συνολικά, η διατριβή καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η blockchain έχει ισχυρό μετασχηματιστικό δυναμικό στην SCM, αλλά η επιτυχία του εγχειρήματος αυτού εξαρτάται από την υπέρβαση τεχνικών, οργανωτικών και κανονιστικών εμποδίων μέσω στοχευμένης καινοτομίας και συνεργασίας.

Λέξεις Κλειδιά: *Τεχνολογία blockchain (Αλυσίδα Μπλοκ), Διαχείριση Εφοδιαστικής Αλυσίδας, Συστήματα βασισμένα σε Blockchain, Ιχνηλασιμότητα προϊόντος, Προέλευση προϊόντος, Υιοθέτηση της τεχνολογίας Blockchain, Έξυπνα συμβόλαια, Κυβερνοασφάλεια, Διαλειτουργικότητα, Ενσωμάτωση Τεχνητής Νοημοσύνης και Διαδικτύου των Πραγμάτων, Τεχνολογία Ψηφιακού Καθολικού, Διαφάνεια στην επιμελητεία, Επιμελητεία, Αυτοματοποίηση εφοδιαστικής αλυσίδας, Ακεραιότητα δεδομένων.*

ABSTRACT

This thesis explores the integration of blockchain technology into supply chain management (SCM), aiming to assess its potential to enhance transparency, traceability, data integrity, and efficiency. Traditional supply chains often face issues, such as data fragmentation, lack of trust, and poor visibility. Blockchain, as a decentralized and tamper-proof ledger, offers innovative solutions to these problems by enabling secure and transparent data sharing among stakeholders.

The study employs a systematic literature review, analyzing various blockchain applications across industries, such as food, pharmaceuticals, logistics, and retail. Key criteria — like traceability, transparency, cost-efficiency, and interoperability — are evaluated using structured metrics and comparative frameworks.

The findings highlight blockchain's strengths in improving supply chain accountability and automation through smart contracts. However, challenges, such as scalability, legal uncertainty, high implementation costs, and integration with legacy systems, remain significant obstacles to its widespread adoption.

Overall, the thesis concludes that blockchain holds a strong transformative potential in SCM, but its success depends on overcoming technical, organizational, and regulatory barriers through targeted innovation and collaboration.

Key Words: *Blockchain, Supply Chain Management (SCM), Blockchain-based systems, Product traceability, Product provenance, Blockchain adoption, Smart contracts, Cybersecurity, Interoperability, AI & IoT integration, Digital Ledger Technology (DLT), Logistics transparency, Logistics, Supply chain automation, Data integrity.*

1ο Κεφάλαιο – Εισαγωγή

1.1 Blockchain στη Διαχείριση της Εφοδιαστικής Αλυσίδας

Η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας (Supply Chain Management, SCM) αναφέρεται στον συντονισμό και τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών που εμπλέκονται στην παραγωγή και την παράδοση αγαθών και υπηρεσιών (Queiroz et al., 2020). Περιλαμβάνει τα πάντα, από την προμήθεια πρώτων υλών και την παραγωγή έως τη διανομή, την αποθήκευση και την τελική παράδοση. Η αποτελεσματική διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας διασφαλίζει ότι τα προϊόντα φτάνουν στους καταναλωτές αποτελεσματικά, οικονομικά, αποδοτικά και σύμφωνα με τα πρότυπα ποιότητας που έχουν τεθεί (Wang et al., 2020).

Στον σημερινό διασυνδεδεμένο κόσμο, οι αλυσίδες εφοδιασμού εκτείνονται σε πολλές χώρες και εμπλέκουν πολυάριθμους ενδιαφερόμενους, συμπεριλαμβανομένων των προμηθευτών, των κατασκευαστών, των παρόχων εφοδιαστικής και των λιανοπωλητών (Gurtu & Johnny, 2019). Η αποτελεσματικότητα της διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας είναι ζωτικής σημασίας για τις επιχειρήσεις προκειμένου να παραμείνουν ανταγωνιστικές, καθώς οι καθυστερήσεις, οι διακοπές ή η αναποτελεσματικότητα μπορούν να οδηγήσουν σε αυξημένο κόστος και απώλεια εσόδων (Al-Farsi et al., 2021).

Μια από τις θεμελιώδεις πτυχές της διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας είναι η ορατότητα (visibility) και η ιχνηλασιμότητα (traceability). Οι εταιρείες πρέπει να παρακολουθούν τα προϊόντα σε κάθε στάδιο για να αποτρέψουν την παραχάραξη, να διασφαλίσουν τη συμμόρφωση με τις κανονιστικές διατάξεις και να ανταποκριθούν στις προσδοκίες των καταναλωτών. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε κλάδους, όπως τα τρόφιμα, τα φαρμακευτικά προϊόντα και τα είδη πολυτελείας, όπου η ποιότητα και η αυθεντικότητα είναι υψίστης σημασίας (Azzi et al., 2019).

Μια άλλη βασική πτυχή της διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας είναι η διαχείριση κινδύνων. Οι αλυσίδες εφοδιασμού είναι ευάλωτες σε διαταραχές που προκαλούνται από γεωπολιτικά γεγονότα, φυσικές καταστροφές, απειλές στον κυβερνοχώρο και οικονομικές διακυμάνσεις. Οι αποτελεσματικές στρατηγικές διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας ενσωματώνουν σχέδια έκτακτης ανάγκης, προγνωστικές αναλύσεις και διαφοροποιημένες προμήθειες για την ελαχιστοποίηση των κινδύνων και τη διασφάλιση της συνέχειας της επιχείρησης (Azzi et al., 2019).

Η βιωσιμότητα έχει επίσης καταστεί μείζον ζήτημα στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας. Οι επιχειρήσεις δέχονται αυξανόμενη πίεση για την υιοθέτηση πρακτικών φιλικών προς το περιβάλλον, όπως η μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα, η ελαχιστοποίηση των αποβλήτων και η υπεύθυνη προμήθεια πρώτων υλών. Οι πράσινες αλυσίδες εφοδιασμού δεν συμβάλλουν μόνο στη διατήρηση του περιβάλλοντος, αλλά ενισχύουν επίσης τη φήμη της μάρκας και την εμπιστοσύνη των καταναλωτών (Wamba & Queiroz, 2020).

Η τεχνολογία διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στη σύγχρονη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας. Η ενσωμάτωση της αυτοματοποίησης, της τεχνητής νοημοσύνης και της ανάλυσης

δεδομένων έχει βελτιώσει τη λήψη αποφάσεων, τη διαχείριση αποθεμάτων και την πρόβλεψη της ζήτησης. Ο ψηφιακός μετασχηματισμός επιτρέπει στις επιχειρήσεις να λειτουργούν με μεγαλύτερη ευελιξία, μειώνοντας τη σπατάλη και βελτιστοποιώντας τους πόρους (Saberi, 2019).

Η τεχνολογία blockchain είναι ένα αποκεντρωμένο, ψηφιακό σύστημα λογιστικών βιβλίων που καταγράφει τις συναλλαγές σε πολλούς υπολογιστές με ασφάλεια και διαφάνεια. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές συγκεντρωτικές βάσεις δεδομένων, η τεχνολογία blockchain λειτουργεί σε ένα κατανεμημένο δίκτυο, διασφαλίζοντας ότι τα δεδομένα, αφού καταγραφούν, δεν μπορούν να τροποποιηθούν ή να διαγραφούν χωρίς τη συναίνεση των συμμετεχόντων στο δίκτυο. Το αμετάβλητο των δεδομένων και η διαφάνεια καθιστούν την blockchain ένα ισχυρό εργαλείο για κλάδους που απαιτούν υψηλά επίπεδα ασφάλειας, ακρίβειας και λογοδοσίας (Gurtu & Johny, 2019).

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της blockchain τεχνολογίας είναι οι έξυπνες συμβόλαια (smart contracts), οι οποίες είναι αυτοεκτελούμενες συμφωνίες με προκαθορισμένους κανόνες ενσωματωμένους σε κώδικα. Αυτά τα συμβόλαια διευκολύνουν την αυτοματοποίηση των επιχειρηματικών διαδικασιών (business processes), μειώνοντας την ανάγκη για μεσάζοντες και ελαχιστοποιώντας έτσι τα σφάλματα. Επιπλέον, η blockchain ενισχύει την ιχνηλασιμότητα και την ελεγκσιμότητα, εξασφαλίζοντας ότι κάθε συναλλαγή καταγράφεται μόνιμα και μπορεί να επαληθευτεί (Gurtu & Johny, 2019).

Σε παγκόσμια επιχειρηματικά περιβάλλοντα, η blockchain υιοθετείται όλο και περισσότερο για τη βελτίωση της εμπιστοσύνης και της αποτελεσματικότητας. Βιομηχανίες όπως η χρηματοδότηση, η υγειονομική περίθαλψη, η εφοδιαστική αλυσίδα και η μεταποίηση χρησιμοποιούν τη τεχνολογία blockchain για την καταπολέμηση της απάτης, τον εξορθολογισμό των λειτουργιών και την ενίσχυση της κανονιστικής συμμόρφωσης. Παρέχοντας ένα αδιάφθορο και διαφανές σύστημα, η blockchain προάγει την εμπιστοσύνη μεταξύ των μερών, η οποία είναι ιδιαίτερα κρίσιμη σε αλυσίδες εφοδιασμού όπου πολλαπλά ενδιαφερόμενα μέρη δραστηριοποιούνται σε διαφορετικές δικαιοδοσίες. Εκτός από την ασφάλεια, η blockchain παίζει καθοριστικό ρόλο στη μείωση του λειτουργικού κόστους. Εξαλείφοντας τους μεσάζοντες, οι επιχειρήσεις μπορούν να πραγματοποιούν συναλλαγές πιο αποτελεσματικά, μειώνοντας τα διοικητικά έξοδα. Επιπλέον, η παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και η ανταλλαγή δεδομένων επιτρέπουν στις επιχειρήσεις να αντιδρούν γρήγορα σε διαταραχές, βελτιώνοντας την ανθεκτικότητα της αλυσίδας εφοδιασμού (Cole et al., 2019).

Οι κυβερνήσεις και οι εταιρείες διερευνούν την τεχνολογία blockchain για πρωτοβουλίες βιωσιμότητας, όπως η παρακολούθηση του αποτυπώματος άνθρακα (carbon footprint) και η ηθική προμήθεια (ethical sourcing). Η δυνατότητα επαλήθευσης της προέλευσης των προϊόντων και η διασφάλιση της συμμόρφωσης με το δίκαιο εμπόριο έχει καταστήσει την blockchain απαραίτητο εργαλείο για τις προσπάθειες εταιρικής κοινωνικής ευθύνης (EKE).

Συνοψίζοντας λοιπόν, η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας αποτελεί τη ραχοκοκαλιά του παγκόσμιου εμπορίου, εξασφαλίζοντας απρόσκοπτες λειτουργίες και την ικανοποίηση των πελατών. Η τεχνολογία blockchain συμβάλλει ουσιαστικά σε αυτή τη διαδικασία, ενισχύοντας τη διαφάνεια (transparency), μειώνοντας την απάτη,

βελτιστοποιώντας την επιμελητεία (logistics) και διασφαλίζοντας την ηθική προμήθεια, καθιστώντας την ένα πολύτιμο εργαλείο για την εξέλιξη της σύγχρονης διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας (Wamba & Queiroz, 2020).

1.2 Αντικείμενο Διπλωματικής

Η παρούσα διατριβή διερευνά την εφαρμογή της τεχνολογίας blockchain στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, αναδεικνύοντας τα πιθανά οφέλη, τις βασικές προκλήσεις του κλάδου, τις υφιστάμενες εφαρμογές της, ενώ παράλληλα εντοπίζει σχετικά κενά και μελλοντικές ερευνητικές κατευθύνσεις (Queiroz et al., 2020). Η blockchain, ως αποκεντρωμένο και αμετάβλητο ψηφιακό βιβλίο, διαθέτει τη δυνατότητα να αντιμετωπίσει κρίσιμα ζητήματα των σύγχρονων αλυσίδων εφοδιασμού, όπως είναι η αναποτελεσματικότητα, η απάτη, η έλλειψη διαφάνειας και τα τρωτά σημεία ασφαλείας. Μέσω της ενίσχυσης της ιχνηλασιμότητας, της ασφάλειας και της εμπιστοσύνης μεταξύ των ενδιαφερόμενων μερών, καθώς και της δημιουργίας απαραβίαστου αρχείου συναλλαγών, η τεχνολογία αυτή μπορεί να εκσυγχρονίσει τις λειτουργίες και να συμβάλλει στη βελτίωση της συνολικής αποδοτικότητας της αλυσίδας εφοδιασμού (Moosavi et al., 2021; Rejeb et al., 2019).

Η τρέχουσα έρευνα θα πραγματοποιήσει συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση για τον εντοπισμό και τη σύγκριση των υφιστάμενων συστημάτων διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας που βασίζονται στην blockchain, αξιολογώντας τις προτεινόμενες μεθοδολογίες, τα οφέλη και τους περιορισμούς τους. Επιπλέον, θα αναλύσει διαφορετικά μοντέλα blockchain, συμπεριλαμβανομένων δημοσίων, ιδιωτικών και βασισμένων σε κοινοπραξίες λύσεων, για να αξιολογήσει την αποτελεσματικότητά τους σε σενάρια εφοδιαστικής αλυσίδας σε πραγματικές συνθήκες (Rejeb et al., 2019).

Μια άλλη βασική πτυχή της υφιστάμενης μελέτης είναι ο εντοπισμός των εμποδίων για την υιοθέτηση της blockchain, όπως το υψηλό κόστος υλοποίησης, τα ζητήματα κλιμακωσιμότητας (scalability) και οι κανονιστικοί περιορισμοί (regulatory constraints). Παράλληλα, η διατριβή προτείνει πιθανές ερευνητικές κατευθύνσεις για την υπέρβαση αυτών των προκλήσεων, συμβάλλοντας στη γεφύρωση των υφιστάμενων κενών της βιβλιογραφίας.

Τέλος, η μελέτη αξιολογεί τις ειδικές τάσεις του κλάδου και τις προοπτικές ενοποίησης της blockchain με αναδυόμενες τεχνολογίες, όπως η Τεχνητή Νοημοσύνη (TN) και το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT). Παρέχοντας λοιπόν μια ολοκληρωμένη εικόνα του ρόλου της blockchain στην διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, η διατριβή στοχεύει να συμβάλλει στη βαθύτερη κατανόηση των πρακτικών εφαρμογών και των μελλοντικών προοπτικών της στη βελτιστοποίηση των παγκόσμιων δικτύων εφοδιασμού (Agarwal et al., 2022).

1.3 Δομή της Διπλωματικής

Η παρούσα διπλωματική διαρθρώνεται σε έξι κύρια κεφάλαια, καθένα από τα οποία ασχολείται με διαφορετικές πτυχές της μελέτης σχετικά με τη εφαρμογή της blockchain στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας. Ξεκινά με το Κεφάλαιο 1 (Εισαγωγή), όπου παρουσιάζεται το αντικείμενο της έρευνας. Το Κεφάλαιο 2 (Ιστορικό) παρέχει μια επισκόπηση της τεχνολογίας blockchain και της διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας. Το Κεφάλαιο 3

(Μεθοδολογική Ανασκόπηση) περιγράφει την μεθοδολογία συστηματικής βιβλιογραφικής επισκόπησης που ακολουθήθηκε και παρέχει ορισμένα γενικά ποσοτικά αποτελέσματα. Το Κεφάλαιο 4 (Ανάλυση) κατηγοριοποιεί, εξετάζει και συγκρίνει τα συστήματα εφοδιαστικής αλυσίδας που βασίζονται στην blockchain. Το Κεφάλαιο 5 (Προκλήσεις) προσδιορίζει τα βασικά εμπόδια ως προς την υιοθέτηση της blockchain στην εφοδιαστική αλυσίδα και τις μελλοντικές κατευθύνσεις προς αντιμετώπισή τους. Τέλος, το Κεφάλαιο 6 (Συμπεράσματα) συνοψίζει τα ευρήματα και προσδιορίζει την προσωπική εμπειρία που αποκομίσθηκε στο πλαίσιο της διπλωματικής.

2ο Κεφάλαιο – Υπόβαθρο

2.1 Εφοδιαστική Αλυσίδα & Διαχείριση

2.1.1 Ορισμός

Η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας είναι το σύνολο των διαδικασιών, ανθρώπων, τεχνολογιών και οργανισμών που εμπλέκονται στην παραγωγή και διανομή ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας, από το αρχικό στάδιο των πρώτων υλών μέχρι την τελική παράδοση στον καταναλωτή (Salam & Khan, 2018). Ενσωματώνει διάφορες παραμέτρους, συμπεριλαμβανομένων των προμηθειών, της παραγωγής, του εφοδιασμού και της διανομής, για την ενίσχυση της αποδοτικότητας, τη μείωση του κόστους και τη βελτίωση της ικανοποίησης των πελατών. Σε μια ολοένα και περισσότερο παγκοσμιοποιημένη οικονομία, η εφοδιαστική αλυσίδα διαδραματίζει ζωτικό ρόλο στη διατήρηση της ανταγωνιστικότητας, στην προώθηση της καινοτομίας και στην αντιμετώπιση προκλήσεων, όπως η εξαπάτηση, η δυσλειτουργία και η έλλειψη διαφάνειας (Agrawal & Narain, 2018).

2.1.2 Στοιχεία / Μέρη Εφοδιαστικής Αλυσίδας

Στον πυρήνα της, η εφοδιαστική αλυσίδα περιλαμβάνει το συντονισμό όλων των οντοτήτων που συμμετέχουν στην παραγωγή και παράδοση αγαθών και υπηρεσιών. Οι οντότητες αυτές περιλαμβάνουν προμηθευτές, κατασκευαστές, αποθήκες, κέντρα διανομής, λιανοπωλητές και καταναλωτές. Μια λειτουργική αλυσίδα εφοδιασμού διασφαλίζει ότι τα προϊόντα παραδίδονται στη σωστή ποσότητα, στο σωστό μέρος, στον σωστό χρόνο και με το βέλτιστο κόστος. Η αποτελεσματικότητά της μετριέται συχνά με βασικούς δείκτες απόδοσης, όπως ο χρόνος παράδοσης, η ακρίβεια των παραγγελιών, ο κύκλος εργασιών των αποθεμάτων (procurement turnover) και τα επίπεδα ικανοποίησης των πελατών (Agrawal & Narain, 2018).

Η αλυσίδα εφοδιασμού περιέχει διάφορα στοιχεία που συνεργάζονται για την κίνηση πρώτων υλών, αγαθών και πληροφοριών από τον παραγωγό μέχρι τον τελικό καταναλωτή. Αυτά τα στοιχεία δεν αναφέρονται σε αφηρημένες δομές, όπως στην αρχιτεκτονική λογισμικού, αλλά σε βασικά δομικά μέρη ή συμμετέχοντες που αποτελούν την αλυσίδα. Η πρώτη συνιστώσα είναι η προμήθεια, η οποία περιλαμβάνει την προμήθεια πρώτων υλών και εξαρτημάτων που είναι απαραίτητα για την παραγωγή. Οι στρατηγικές προμηθειών (procurement strategies) επηρεάζουν την αποδοτικότητα του κόστους, τις σχέσεις με τους προμηθευτές και τη συνολική ανθεκτικότητα της αλυσίδας εφοδιασμού (Kain & Verma, 2018).

Οι οργανισμοί συχνά χρησιμοποιούν διάφορες τεχνικές προμηθειών, συμπεριλαμβανομένων των αγορών (just-in-time, JIT), των στρατηγικών προμηθειών (strategic sourcing) και των αποθεμάτων που διαχειρίζονται οι προμηθευτές (vendor-managed inventory, VMI), για τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών προμηθειών (Sallam et al., 2023). Οι αγορές JIT επικεντρώνονται στην παραλαβή πρώτων υλών και εξαρτημάτων ακριβώς τη στιγμή που απαιτούνται για την παραγωγή, μειώνοντας τα αποθέματα και τις δαπάνες

αποθήκευσης. Οι στρατηγικές προμηθειών περιλαμβάνουν τη δημιουργία στενών σχέσεων με προμηθευτές για την εξασφάλιση της ποιότητας και της συνέπειας στις παραδόσεις, ενώ τα αποθέματα που διαχειρίζονται οι προμηθευτές τους επιτρέπουν να τα διατηρούν και να τα ελέγχουν για λογαριασμό του οργανισμού, μειώνοντας τα έξοδα και το ρίσκο για την επιχείρηση (Silvestre et al., 2018).

Η δεύτερη συνιστώσα είναι η παραγωγή, όπου οι πρώτες ύλες και τα εξαρτήματα μετατρέπονται σε τελικά προϊόντα. Το στάδιο αυτό περιλαμβάνει τις διαδικασίες παραγωγής, δηλαδή τις οργανωμένες ενέργειες και μεθόδους με τις οποίες υλοποιείται η κατασκευή των προϊόντων (όπως συναρμολόγηση, κατεργασία κ.ά.), τον έλεγχο ποιότητας και τον προγραμματισμό της παραγωγικής ικανότητας (Dietrich et al., 2021). Ο έλεγχος ποιότητας αποτελεί κρίσιμη φάση της παραγωγής, καθώς εξασφαλίζει ότι τα τελικά προϊόντα πληρούν συγκεκριμένα πρότυπα και προδιαγραφές. Περιλαμβάνει δραστηριότητες, όπως η επιθεώρηση υλικών, η παρακολούθηση της παραγωγικής διαδικασίας και η τελική αξιολόγηση των προϊόντων (Saberli et al., 2019). Ο προγραμματισμός της παραγωγικής ικανότητας αναφέρεται στον καθορισμό του βέλτιστου επιπέδου παραγωγής για την κάλυψη της ζήτησης, χωρίς υπερβολικές δαπάνες ή καθυστερήσεις. Περιλαμβάνει την πρόβλεψη αναγκών, την αξιολόγηση των διαθέσιμων πόρων (μηχανημάτων, εργατικού δυναμικού, πρώτων υλών) και τον σχεδιασμό των παραγωγικών ροών. Η χρήση προηγμένων εργαλείων ανάλυσης δεδομένων και blockchain μπορεί να ενισχύσει την ακρίβεια αυτών των προβλέψεων, βελτιώνοντας τη λήψη αποφάσεων και μειώνοντας τις καθυστερήσεις στην αλυσίδα εφοδιασμού (Kamble et al., 2020).

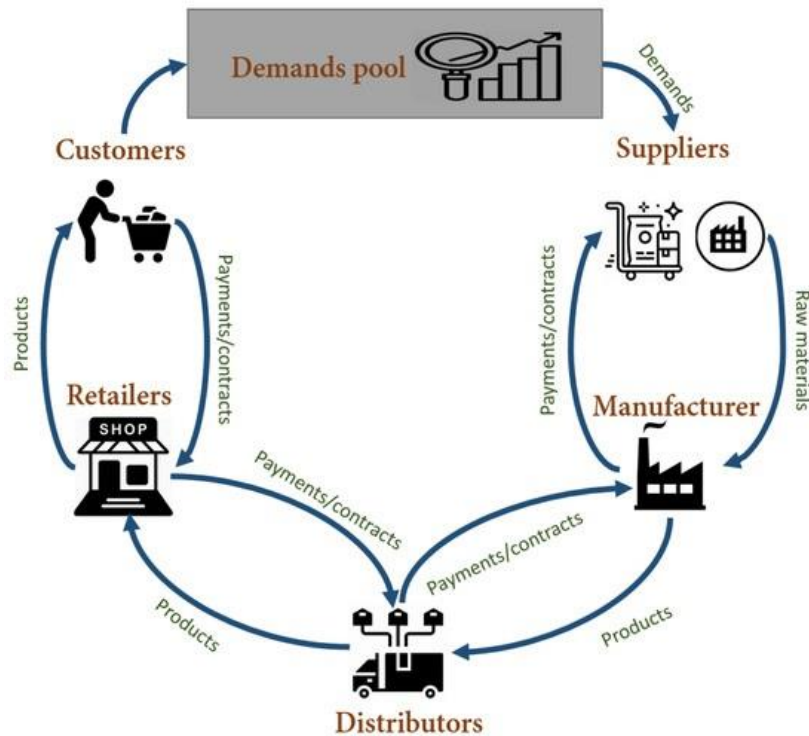
Οι εταιρείες προσπαθούν να βελτιώσουν την αποδοτικότητα της παραγωγής μέσω της λιτής παραγωγής (lean manufacturing), της αυτοματοποίησης και των τεχνικών παραγωγής με βάση τη ζήτηση (demand-driven production techniques). Η λιτή παραγωγή επικεντρώνεται στην εξάλειψη της σπατάλης και τη μεγιστοποίηση της αξίας, εστιάζοντας στη συνεχή βελτίωση και την αποτελεσματική χρήση πόρων (Esmaeilian et al., 2020). Η αυτοματοποίηση, από την άλλη, ενσωματώνει τεχνολογίες που αυτοματοποιούν επαναλαμβανόμενες διαδικασίες, μειώνοντας τα λάθη και αυξάνοντας την ταχύτητα και την ακρίβεια στην παραγωγή. Τέλος, οι τεχνικές παραγωγής με βάση τη ζήτηση προσαρμόζουν την παραγωγή στις ακριβείς ανάγκες των καταναλωτών, αποφεύγοντας τη δημιουργία υπερβολικών αποθεμάτων και μειώνοντας τις δαπάνες αποθήκευσης. Όλες αυτές οι στρατηγικές στοχεύουν στη βελτίωση της αποδοτικότητας, την ευελιξία της παραγωγικής διαδικασίας και την έγκαιρη διαθεσιμότητα των προϊόντων (Tseng et al., 2019).

Η επιμελητεία (logistics) και οι μεταφορές αποτελούν ένα άλλο κρίσιμο στοιχείο της εφοδιαστικής αλυσίδας. Η επιμελητεία περιλαμβάνει τη μετακίνηση, την αποθήκευση και το χειρισμό των αγαθών σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού. Η αποτελεσματική διαχείριση της εξασφαλίζει έγκαιρες παραδόσεις, ελαχιστοποιεί το κόστος μεταφοράς και ενισχύει την ορατότητα της αλυσίδας εφοδιασμού. Τα δίκτυα μεταφορών περιλαμβάνουν διάφορους τρόπους (μεταφοράς προϊόντων/αγαθών), όπως οδικές, σιδηροδρομικές, αεροπορικές και θαλάσσιες μεταφορές, ο καθένας με πλεονεκτήματα και συμβιβασμούς όσον αφορά το κόστος, την ταχύτητα και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η έλευση τεχνολογιών εντοπισμού σε πραγματικό χρόνο (real-time tracking), λογισμικού βελτιστοποίησης διαδρομών (route optimization software) και αυτόνομων λύσεων επιμελητείας (autonomous logistics solutions)

έχει βελτιώσει σημαντικά την αποτελεσματικότητα της επιμελητείας (Chauhan & Singh, 2019).

Η αποθήκευση και η διαχείριση των αποθεμάτων διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην εξισορρόπηση της προσφοράς και της ζήτησης. Οι αποθήκες χρησιμεύουν ως αποθηκευτικοί χώροι όπου τα προϊόντα διατηρούνται πριν από τη διανομή. Η αποτελεσματική διαχείριση αποθεμάτων στοχεύει στη διατήρηση βέλτιστων επιπέδων αποθέματος, ώστε να αποφεύγονται τα υπεραποθέματα και οι ελλείψεις. Οι εταιρείες χρησιμοποιούν τεχνικές διαχείρισης, όπως η FIFO (First-in, First-out), η οικονομική ποσότητα παραγγελίας (economic order quantity, EOQ) και οι υπολογισμοί αποθεμάτων ασφαλείας (safety stock calculations) για τη διατήρηση της σταθερότητας της αλυσίδας εφοδιασμού. Η τεχνική FIFO διασφαλίζει ότι τα παλαιότερα αποθέματα χρησιμοποιούνται πρώτα, μειώνοντας τον κίνδυνο λήξης ή απαξίωσης προϊόντων. Η οικονομική ποσότητα παραγγελίας υπολογίζει το βέλτιστο μέγεθος παραγγελίας, συνεισφέροντας τόσο στην ελαχιστοποίηση του κόστους αποθήκευσης όσο και του κόστους παραγγελίας, ενώ οι υπολογισμοί αποθεμάτων ασφαλείας προσδιορίζουν την ποσότητα αποθέματος που χρειάζεται για την κάλυψη αβεβαιοτήτων στη ζήτηση ή στην παράδοση, διασφαλίζοντας τη σταθερότητα της αλυσίδας εφοδιασμού. Οι τεχνολογικές εξελίξεις, όπως η αυτοματοποίηση της αποθήκης και η προγνωστική ανάλυση, έχουν βελτιώσει περαιτέρω την ακρίβεια και την αποδοτικότητα των αποθεμάτων (Ben-Daya et al., 2019).

Τέλος, η διανομή και η εξυπηρέτηση των πελατών ολοκληρώνουν τον κύκλο της εφοδιαστικής αλυσίδας. Η διανομή περιλαμβάνει την παράδοση των προϊόντων στους τελικούς πελάτες μέσω διαφόρων καναλιών, συμπεριλαμβανομένων των καταστημάτων λιανικής πώλησης, των πλατφορμών ηλεκτρονικού εμπορίου και των μοντέλων απευθείας στον καταναλωτή. Ένα ισχυρό δίκτυο διανομής εξασφαλίζει την εμβέλεια της αγοράς και την προσβασιμότητα των πελατών. Η εξυπηρέτηση πελατών, αναπόσπαστο μέρος της εφοδιαστικής αλυσίδας, επικεντρώνεται στην αντιμετώπιση ερωτημάτων, τη διαχείριση επιστροφών και τη διασφάλιση της ικανοποίησης των πελατών. Οι εταιρείες αξιοποιούν όλο και περισσότερο την τεχνητή νοημοσύνη και την ανάλυση δεδομένων για την εξατομίκευση της εμπειρίας των πελατών και τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των υπηρεσιών (Litke et al., 2019).



Εικόνα 1: Στοιχεία Εφοδιαστικής Αλυσίδας - (Al-Farsi et al., 2021).

Η παραπάνω Εικόνα 1 έχει τροποποιηθεί με σκοπό να εστιάσει στα δομικά στοιχεία της εφοδιαστικής αλυσίδας, χωρίς την προσθήκη τεχνολογικών παραμέτρων.

2.1.3 Χαρακτηριστικά & Πλεονεκτήματα Εφοδιαστικής Αλυσίδας

2.1.3.1 Βασικά Χαρακτηριστικά

Στη σημερινή πολύπλοκη παγκόσμια οικονομία, η εφοδιαστική αλυσίδα αποτελεί θεμελιώδες στοιχείο για την επιχειρηματική επιτυχία. Από την προμήθεια πρώτων υλών έως την παράδοση τελικών προϊόντων στους καταναλωτές, περιλαμβάνει ένα πολύπλοκο δίκτυο οργανισμών, πόρων, δραστηριοτήτων και τεχνολογιών. Μια καλά δομημένη και αποτελεσματικά διαχειριζόμενη εφοδιαστική αλυσίδα όχι μόνο προσφέρει λειτουργικά οφέλη, αλλά χρησιμεύει και ως στρατηγικός παράγοντας διαφοροποίησης (strategic differentiator). Η εις βάθος κατανόηση των χαρακτηριστικών και πλεονεκτημάτων της είναι κρίσιμη για τις επιχειρήσεις που στοχεύουν στην ευημερία σε ένα συνεχόμενα μεταβαλλόμενο και ανταγωνιστικό περιβάλλον (Wiedmer & Griffis, 2021).

Μια σύγχρονη εφοδιαστική αλυσίδα ορίζεται από πολλά αλληλένδετα χαρακτηριστικά που συμβάλλουν στην απόδοση και την αποτελεσματικότητά της. Αυτά περιλαμβάνουν:

1. Ολοκληρωμένος Σχεδιασμός και Συντονισμός

Ένα από τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά μιας αποτελεσματικής εφοδιαστικής αλυσίδας είναι ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός και ο συντονισμός. Αυτό περιλαμβάνει την απρόσκοπτη επικοινωνία και ευθυγράμμιση μεταξύ διαφορετικών οντοτήτων — προμηθευτών, κατασκευαστών, παρόχων επιμελητείας και λιανοπωλητών — σε όλη την αλυσίδα. Ο

ολοκληρωμένος σχεδιασμός διασφαλίζει ότι όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη εργάζονται για κοινούς στόχους, μειώνοντας έτσι τους πλεονασμούς, αποφεύγοντας τις συγκρούσεις και βελτιστοποιώντας την κατανομή των πόρων. Τεχνολογίες, όπως τα συστήματα Σχεδιασμού Επιχειρηματικών Πόρων (ERP) και Διαχείρισης Εφοδιαστικής Αλυσίδας (SCM), παίζουν καθοριστικό ρόλο στη διευκόλυνση αυτού του συντονισμού (Elgazzar et al., 2019).

2. Πρόβλεψη Ζήτησης

Η ακριβής πρόβλεψη της ζήτησης είναι κρίσιμη για την αποφυγή ελλείψεων, τη μείωση του κόστους αποθεμάτων και την ευθυγράμμιση της παραγωγής με τις ανάγκες της αγοράς. Αναλύοντας ιστορικά δεδομένα, τάσεις της αγοράς και τη συμπεριφορά πελατών, οι εταιρείες μπορούν να προβλέψουν τις διακυμάνσεις της ζήτησης και να προσαρμόσουν ανάλογα τις δραστηριότητες της εφοδιαστικής τους αλυσίδας. Η προηγμένη ανάλυση (advanced analytics), η μηχανική μάθηση (machine learning) και η τεχνητή νοημοσύνη (TN) έχουν βελτιώσει σημαντικά τις δυνατότητες πρόβλεψης, επιτρέποντας προσαρμογές σε πραγματικό χρόνο και καλύτερο στρατηγικό σχεδιασμό (Pires Ribeiro & Barbosa-Poiva, 2018).

3. Διαχείριση Κινδύνου

Οι αλυσίδες εφοδιασμού εκτίθενται σε μια ποικιλία κινδύνων — από γεωπολιτικές εντάσεις και φυσικές καταστροφές έως κυβερνοαπειλές και πανδημίες. Η αποτελεσματική διαχείριση κινδύνου περιλαμβάνει τον εντοπισμό πιθανών τρωτών σημείων, την αξιολόγηση των επιπτώσεών τους και την εφαρμογή σχεδίων έκτακτης ανάγκης. Αυτό το χαρακτηριστικό είναι ολοένα και πιο ζωτικής σημασίας καθώς οι αλυσίδες εφοδιασμού γίνονται πιο παγκόσμιες και αλληλεξαρτώμενες. Οι εταιρείες επενδύουν σε διαφοροποιημένη προμήθεια (diversified sourcing), ασφαλή αποθέματα (safety stock) και σχεδιασμό σεναρίων για τον μετριασμό των διαταραχών (Wiedmer & Griffis, 2021).

4. Βιωσιμότητα και Συμμόρφωση

Οι σύγχρονες αλυσίδες εφοδιασμού πρέπει επίσης να αντιμετωπίζουν περιβαλλοντικά, κοινωνικά και κανονιστικά ζητήματα. Η βιωσιμότητα και η συμμόρφωση δεν είναι πια προαιρετικά αλλά βασικά χαρακτηριστικά μιας υπεύθυνης εφοδιαστικής αλυσίδας. Αυτό περιλαμβάνει τη μείωση των εκπομπών άνθρακα, τη διασφάλιση ηθικών εργασιακών πρακτικών και τη συμμόρφωση με τους διεθνείς εμπορικούς νόμους και κανονισμούς. Πλέον, η προτεραιότητα των επιχειρήσεων βασίζεται στην πράσινη εφοδιαστική (green logistics), στις αρχές της κυκλικής οικονομίας και στη διαφανή αναφορά, για να ανταποκριθούν στις προσδοκίες των ενδιαφερομένων μερών και στις κανονιστικές απαιτήσεις (Gligor et al., 2019).

5. Ενσωμάτωση Τεχνολογίας

Η τεχνολογία είναι ενσωματωμένη σε όλη τη σύγχρονη αλυσίδα εφοδιασμού. Από τις συσκευές των IoT που παρακολουθούν τις αποστολές σε πραγματικό χρόνο, έως και την blockchain που μπορεί να διασφαλίσει τη διαφάνεια, την ιχνηλασιμότητα και την ακεραιότητα των δεδομένων — όπως θα επιδειχθεί από την τρέχουσα εργασία. Ο αυτοματισμός στην αποθήκευση, η προγνωστική ανάλυση στη διαχείριση αποθεμάτων και οι πλατφόρμες που βασίζονται στο υπολογιστικό νέφος (cloud) για συνεργασία σε πραγματικό χρόνο είναι

παραδείγματα του πώς ο ψηφιακός μετασχηματισμός ενισχύει τις δυνατότητες της αλυσίδας εφοδιασμού (Gligor et al., 2019).

6. Προσανατολισμός στον Πελάτη

Ένα ολοένα και πιο βασικό χαρακτηριστικό της σύγχρονης εφοδιαστικής αλυσίδας είναι ο προσανατολισμός προς τον πελάτη. Αυτό συνεπάγεται το σχεδιασμό λειτουργιών που ανταποκρίνονται στις προσδοκίες των πελατών όσον αφορά την ταχύτητα, την εξατομίκευση και την ποιότητα των υπηρεσιών. Μέσα σε αυτό το πλαίσιο, η ευελιξία και η ικανότητα άμεσης ανταπόκρισης είναι το κλειδί καθώς επιτρέπεται η δυνατότητα εκπλήρωσης προσαρμοσμένων παραγγελιών, η παροχή πολλαπλών επιλογών παράδοσης (delivery options) και η αποτελεσματική διαχείριση των επιστροφών (returns management) (Duarte & Cruz-Machado, 2017).

2.1.3.2 Πλεονεκτήματα

Όταν τα άνωθεν χαρακτηριστικά εφαρμόζονται με επιτυχία, η εφοδιαστική αλυσίδα γίνεται πηγή σημαντικού ανταγωνιστικού πλεονεκτήματος. Ένα από τα πιο άμεσα οφέλη βελτιστοποίησης είναι η μείωση του κόστους. Ο αποτελεσματικός σχεδιασμός, η διαχείριση αποθεμάτων και η αναβάθμιση των μεταφορών βοηθούν στην ελαχιστοποίηση των αποβλήτων, στη μείωση του κόστους εργασίας και στη βελτίωση της αξιοποίησης των περιουσιακών στοιχείων. Με τον εξορθολογισμό των λειτουργιών, οι εταιρείες μπορούν να μειώσουν σημαντικά τη βάση κόστους, διατηρώντας παράλληλα την ποιότητα και τη διαθεσιμότητα των προϊόντων (Gunasekaran et al., 2017).

Μια ολοκληρωμένη και καλά διαχειριζόμενη εφοδιαστική αλυσίδα ενισχύει την επιχειρησιακή αποτελεσματικότητα σε όλες τις διαδικασίες. Ο χρόνος διάθεσης στην αγορά μειώνεται, οι ροές εργασίας συγχρονίζονται και οι πόροι κατανέμονται καλύτερα. Αυτό επιτρέπει στους οργανισμούς να ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις των πελατών πιο γρήγορα και αξιόπιστα, αυξάνοντας τη συνολική παραγωγικότητα.

Επίσης, η ικανοποίηση των πελατών διασφαλίζει τη διαθεσιμότητα των προϊόντων, την ακριβή εκπλήρωση των παραγγελιών και την έγκαιρη παράδοση. Η παρακολούθηση και η επικοινωνία σε πραγματικό χρόνο παρέχουν επίσης διαφάνεια και χτίσιμο εμπιστοσύνης. Με τις προσδοκίες των καταναλωτών να αυξάνονται συνεχώς, η άριστη εξυπηρέτηση γίνεται ένας κρίσιμος παράγοντας διαφοροποίησης (Datta, 2016).

Η δεξιότητα προσαρμογής στις αλλαγές της αγοράς και στις εξωτερικές διαταραχές αποτελεί ένα ακόμα πλεονέκτημα. Η ευελιξία επιτρέπει στις εταιρείες να αλλάζουν προμηθευτές, να αναδρομολογούν την εφοδιαστική αλυσίδα ή να κλιμακώνουν την παραγωγή ανάλογα με τις ανάγκες τους. Αυτή η ευελιξία μειώνει την ευαλωτότητα σε κραδασμούς και βοηθά στη διατήρηση της συνέχειας σε αβέβαιες συνθήκες (Kwak et al., 2018).

Επιπρόσθετα, οι αποτελεσματικές αλυσίδες εφοδιασμού ενισχύουν τη συνεργασία μεταξύ των εσωτερικών τμημάτων και των εξωτερικών συνεργατών. Τα κοινά δεδομένα, ο κοινός σχεδιασμός και η συντονισμένη λήψη αποφάσεων οδηγούν σε ισχυρότερες σχέσεις και βελτιωμένη απόδοση σε όλους τους τομείς. Οι συνεργατικές πρακτικές ενισχύουν την καινοτομία, διευκολύνουν την επίλυση των προβλημάτων και συμβάλλουν στη βελτίωση της λειτουργικής αποδοτικότητας (Kwak et al., 2018).

Τελικά, όλα αυτά τα πλεονεκτήματα συμβάλλουν στην αυξημένη κερδοφορία. Μέσω της βελτίωσης των υπηρεσιών (service improvement) και της μείωσης του κόστους (cost reduction), η αλυσίδες εφοδιασμού υποστηρίζουν την στρατηγική ανάπτυξη και επηρεάζουν άμεσα τα οικονομικά αποτελέσματα. Οι επιχειρήσεις που επενδύουν στην αριστεία τείνουν να αυξάνουν την κερδοφορία τους στην αγορά, να ενισχύουν τα περιθώρια κέρδους και να προσθέτουν αξία για τους μετόχους (Wu et al., 2017).

Η σύγχρονη αλυσίδα εφοδιασμού δεν είναι πλέον απλώς μια δευτερεύουσα λειτουργία — είναι ένας στρατηγικός παράγοντας για την επιχειρηματική επιτυχία. Τα βασικά της χαρακτηριστικά — όπως ο ολοκληρωμένος σχεδιασμός, η πρόβλεψη ζήτησης, η διαχείριση κινδύνου και η βιωσιμότητα — αποτελούν τη ραχοκοκαλιά των αποτελεσματικών λειτουργιών. Όταν διαχειρίζονται σωστά, αυτά τα χαρακτηριστικά μεταφράζονται σε απτά πλεονεκτήματα: χαμηλότερο κόστος, μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα, καλύτερη εξυπηρέτηση και υψηλότερη κερδοφορία (Chen, 2019).

2.1.4 Εφαρμογές / Τομείς Εφοδιαστικής Αλυσίδας

Η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο σε διάφορους τομείς, διότι διευκολύνει τη ροή αγαθών και υπηρεσιών από τους προμηθευτές στους καταναλωτές. Η εφαρμογή πρακτικών ωφελεί ποικίλους κλάδους, όπως η μεταποίηση, το λιανικό εμπόριο, η υγειονομική περίθαλψη, η αυτοκινητοβιομηχανία και η παραγωγή τροφίμων.

Στον τομέα της μεταποίησης, η αποτελεσματική εφοδιαστική αλυσίδα διασφαλίζει ότι οι πρώτες ύλες, τα εξαρτήματα και τα τελικά προϊόντα κινούνται ομαλά μεταξύ των προμηθευτών, των εγκαταστάσεων παραγωγής και των πελατών. Για παράδειγμα, η Toyota είναι γνωστή για το σύστημα παραγωγής JIT, το οποίο ελαχιστοποιεί τη διατήρηση αποθεμάτων και διασφαλίζει ότι τα υλικά φτάνουν ακριβώς όταν χρειάζονται στην παραγωγική διαδικασία. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει στην Toyota να μειώσει τα απόβλητα και το κόστος καθώς και να βελτιώσει την αποδοτικότητα της παραγωγής (Balaji et al., 2021).

Στον κλάδο του λιανικού εμπορίου, η εφοδιαστική αλυσίδα είναι απαραίτητη για τη διαχείριση των αποθεμάτων, τη βελτίωση των προμηθειών και την ενίσχυση ικανοποίησης των πελατών. Η Walmart, για παράδειγμα, χρησιμοποιεί εξελιγμένη τεχνολογία εφοδιαστικής αλυσίδας που επιτρέπει την παρακολούθηση των επιπέδων αποθεμάτων σε πραγματικό χρόνο σε όλα τα καταστήματά της. Ειδικότερα, το σύστημα Retail Link της Walmart συνδέει τους προμηθευτές και τα καταστήματα, παρέχοντας δεδομένα σχετικά με τη ζήτηση και τις τάσεις των πωλήσεων, τα οποία βοηθούν στη βελτιστοποίηση των επιπέδων των αποθεμάτων και στην αποφυγή τόσο της υπερεπάρκειας όσο και των εξαντλήσεων (Vipin, 2021).

Ομοίως, στον τομέα της υγειονομικής περίθαλψης, η εφοδιαστική αλυσίδα επικεντρώνεται στη διασφάλιση ότι τα ιατρικά εφόδια, τα φάρμακα και ο εξοπλισμός είναι διαθέσιμα όπου και όταν χρειάζεται. Οι οργανισμοί υγειονομικής περίθαλψης αναγνωρίζονται για την αποτελεσματικότητά τους στη διαχείριση των αλυσίδων εφοδιασμού, όπως φαίνεται στην αναφορά Gartner Healthcare Supply Chain Top 25 (Gartner, 2025).

Ο τομέας της αυτοκινητοβιομηχανίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από ένα πολύπλοκο δίκτυο προμηθευτών και κατασκευαστών. Η Ford Motor Company, για παράδειγμα, χρησιμοποιεί μια παγκόσμια αλυσίδα εφοδιασμού για την προμήθεια εξαρτημάτων από

πολλούς προμηθευτές παγκοσμίως, εξασφαλίζοντας την έγκαιρη συναρμολόγηση των οχημάτων. Τα συστήματα εφοδιαστικής αλυσίδας στη Ford περιλαμβάνουν προηγμένες προβλέψεις, διαχείριση αποθεμάτων και συνεργασία με τους προμηθευτές για τη μείωση του κόστους και την ικανοποίηση της ζήτησης των πελατών (Sodhi et al., 2021).

Στη βιομηχανία τροφίμων, η εφοδιαστική αλυσίδα διασφαλίζει ότι τα φρέσκα προϊόντα φτάνουν στους καταναλωτές γρήγορα και με ασφάλεια. Η McDonald's, για παράδειγμα, βασίζεται σε μια εξαιρετικά αποτελεσματική αλυσίδα εφοδιασμού για την παράδοση των συστατικών στο παγκόσμιο δίκτυο εστιατορίων της. Η Nestlé ενσωματώνει επίσης τη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας για να επιβλέπει τη διακίνηση των πρώτων υλών και των τελικών προϊόντων, διασφαλίζοντας τον έλεγχο της ποιότητας και ελαχιστοποιώντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Beske et al., 2014).

2.1.5 Συστήματα Εφοδιαστικής Αλυσίδας

Τα συστήματα εφοδιαστικής αλυσίδας είναι ένας συνδυασμός υλικού, λογισμικού και διαδικασιών που έχουν σχεδιαστεί για να διευκολύνουν την διαχείριση και το συντονισμό της, από την απόκτηση πρώτων υλών έως την παράδοση προϊόντων (Daneshvar & Gargeya, 2019). Υπάρχουν διάφοροι τύποι συστημάτων αλυσίδας εφοδιασμού, καθένας από τους οποίους έχει τη δική του ειδική εστίαση. Οι τύποι αυτοί αναλύονται στη συνέχεια.

2.1.5.1 Λειτουργική Κατηγοριοποίηση

2.1.5.1.1 Συστήματα Προγραμματισμού Επιχειρησιακών Πόρων

Τα συστήματα προγραμματισμού επιχειρησιακών πόρων (Enterprise Resource Planning Systems, ERP) ενσωματώνουν βασικές εσωτερικές επιχειρησιακές λειτουργίες, όπως η διαχείριση προμηθειών, η διαχείριση/καταγραφή αποθεμάτων, η παραγωγή, η επεξεργασία παραγγελιών, η λογιστική και τα οικονομικά. Αν και συμβάλλουν στην επιμέρους διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, δεν καλύπτουν συνολικά τις δραστηριότητες της, όπως για παράδειγμα την διανομή ή την συνεργασία με εξωτερικούς εταίρους. Παραδείγματα αποτελούν το SAP ERP¹ και το Oracle ERP², τα οποία βοηθούν τις επιχειρήσεις να συντονίζουν τις διαδικασίες προμηθειών, παραγωγής, διανομής και πωλήσεων. Τα συστήματα αυτά προσφέρουν μια ολιστική εικόνα της αλυσίδας και είναι ζωτικής σημασίας για τις επιχειρήσεις που διαχειρίζονται μεγάλα και πολύπλοκα δίκτυα (Elbahri et al., 2019).

2.1.5.1.2 Συστήματα Λογισμικού Διαχείρισης Εφοδιαστικής Αλυσίδας

Τα συστήματα λογισμικού διαχείρισης εφοδιαστικής αλυσίδας (Supply Chain Management Systems, SCMS) έχουν σχεδιαστεί ώστε να καλύπτουν ένα ευρύ φάσμα λειτουργιών βελτιστοποιώντας την πρόβλεψη της ζήτησης, την διαχείριση αποθεμάτων, την προμήθεια, την παραγωγή και τη διανομή. Πιο συγκεκριμένα, τα SCMS πραγματοποιούν μια σύνδεση διαφορετικών φορέων (οργανισμοί, εταιρείες ή τμήματα) σε μια κοινή πλατφόρμα

¹ SAP. Enterprise Resource Planning (ERP)

² Oracle. Enterprise Resource Planning (ERP)

ανταλλαγής πληροφοριών, προκειμένου να βελτιωθεί η διαφάνεια, ο συγχρονισμός των ενεργειών και η συνεργασία. Επίσης, γίνεται αξιοποίηση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο για την αύξηση της ευελιξίας και της απόκρισης στις απρόβλεπτες μεταβολές της αγοράς, μειώνοντας παράλληλα τους χρόνους παράδοσης και τα λειτουργικά κόστη. Ένα παράδειγμα είναι η χρήση cloud-based SCSM από εταιρείες λιανικού εμπορίου, όπως η K&E³, η οποία μέσω ενός τέτοιου συστήματος, κατάφερε να επιτύχει πλήρη ορατότητα σε όλη την εφοδιαστική αλυσίδα, από την παραγωγή στην Κίνα έως τη διανομή στις τοποθεσίες πωλήσεων στο Ηνωμένο Βασίλειο. Αυτό της έδωσε το προβάδισμα να εντοπίζει έγκαιρα κινδύνους και να λαμβάνει γρήγορες αποφάσεις (Giannakis et al., 2019).

2.1.5.1.3 Συστήματα Διαχείρισης Αποθήκης

Τα συστήματα διαχείρισης αποθήκης (Warehouse Management Systems, WMS) βοηθούν τις επιχειρήσεις να διαχειρίζονται τις λειτουργίες της αποθήκης, από την παρακολούθηση των αποθεμάτων έως την εκτέλεση των παραγγελιών. Ένα παράδειγμα είναι το Manhattan WMS, το οποίο επιτρέπει στις επιχειρήσεις να βελτιστοποιούν τη διάταξη της αποθήκης, να παρακολουθούν τα αποθέματα και να βελτιώνουν τις διαδικασίες συλλογής και συσκευασίας παραγγελιών (Torabizadeh et al., 2020).

2.1.5.1.4 Συστήματα Διαχείρισης Μεταφορών

Τα συστήματα διαχείρισης μεταφορών (Transportation Management Systems, TMS), όπως η Oracle Transportation Management⁴ και η SAP Transportation Management⁵, βοηθούν τις επιχειρήσεις στη μετακίνηση των εμπορευμάτων από τη μία τοποθεσία στην άλλη. Τα συστήματα αυτά βελτιστοποιούν τις διαδρομές μεταφοράς, μειώνουν το κόστος αποστολής και βελτιώνουν τις επιδόσεις παράδοσης (Valashani & Abukari, 2020).

2.1.5.1.5 Συστήματα Διαχείρισης Πελατειακών Σχέσεων

Τα συστήματα διαχείρισης πελατειακών σχέσεων (Customer Relationship Management Systems, CRM), αν και επικεντρώνονται κυρίως στη διαχείριση των αλληλεπιδράσεων με τους πελάτες, μπορούν να υποστηρίξουν τα συστήματα εφοδιαστικής αλυσίδας βελτιώνοντας την πρόβλεψη της ζήτησης μέσω καλύτερης κατανόησης της συμπεριφοράς των πελατών και των τάσεων της αγοράς (Saad et al., 2022). Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα CRM συστήματος είναι το Salesforce⁶ το οποίο χρησιμοποιείται διεθνώς από επιχειρήσεις κάθε μεγέθους. Μέσω εργαλείων όπως το Sales Cloud και το Analytics Cloud, η εταιρείες είναι σε θέση να προβλέπουν τη ζήτηση, να παρακολουθούν τις πωλήσεις και να οργανώνουν τις πελατειακές ανάγκες σε ένα ενιαίο περιβάλλον (Sunkari, 2022).

³ Η αναφορά στην K&E προέρχεται από μελέτη περίπτωσης του άρθρου των Giannakis et al. (2020)

⁴ Oracle. Transportation Management

⁵ SAP. Transportation Management

⁶ Salesforce. Customer Relationship Management (CRM)

2.1.5.1.6 Συστήματα Διαχείρισης Σχέσεων με Προμηθευτές

Ομοίως, τα συστήματα διαχείρισης σχέσεων με τους προμηθευτές (Supplier Relationship Management systems, SRM), όπως το SAP SRM⁷, βοηθούν τις επιχειρήσεις να διαχειρίζονται τις αλληλεπιδράσεις και τις επιδόσεις των προμηθευτών, εξασφαλίζοντας την έγκαιρη παράδοση των αγαθών και τη διατήρηση ισχυρών σχέσεων με τους προμηθευτές (Daneshvar & Gargeya, 2019).

Επιπρόσθετα, πέρα από τα βασικά συστήματα που χρησιμοποιούνται συνήθως στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, όπως τα προαναφερόμενα ERP, WMS, TMS και SCMS, υπάρχουν πολλά επιπλέον συστήματα που προσφέρουν εξειδικευμένες δυνατότητες, οι οποίες είναι ζωτικής σημασίας για τη βελτίωση του συντονισμού, της ορατότητας και της στρατηγικής λήψης αποφάσεων. Αυτά περιλαμβάνουν συστήματα προηγμένου προγραμματισμού και χρονοπρογραμματισμού (Advanced Planning & Scheduling, APS), συστήματα διαχείρισης κύκλου ζωής προϊόντων (Product Lifecycle Management, PLM), πλατφόρμες ηλεκτρονικών προμηθειών (e-Procurement Platforms) και εργαλεία επιχειρηματικής ευφυΐας (Business Intelligence, BI).

Τα συστήματα APS έχουν σχεδιαστεί για να χειρίζονται πολύπλοκες εργασίες προγραμματισμού και χρονοπρογραμματισμού σε όλη την εφοδιαστική αλυσίδα (Vieira et al., 2021). Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά εργαλεία προγραμματισμού υλικών απαιτήσεων (Material Requirements Planning, MRP), τα συστήματα APS χρησιμοποιούν προηγμένους αλγόριθμους και δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για να βελτιστοποιήσουν τον προγραμματισμό της προσφοράς, τα χρονοδιαγράμματα παραγωγής και την αξιοποίηση της παραγωγικής ικανότητας. Λαμβάνουν υπόψη περιορισμούς, όπως οι χρόνοι παράδοσης, η διαθεσιμότητα των μηχανημάτων και η παραγωγική ικανότητα του εργατικού δυναμικού, προκειμένου να καταρτίσουν ρεαλιστικά και αποδοτικά χρονοδιαγράμματα (Wang et al., 2021). Τα συστήματα APS είναι ιδιαίτερα πολύτιμα σε κλάδους με υψηλή μεταβλητότητα της ζήτησης. Εργαλεία όπως το SAP Advanced Planning & Optimization (APO)⁸ και το Oracle Advanced Supply Chain Planning (ASCP)⁹ βοηθούν τις επιχειρήσεις να ευθυγραμμίσουν την παραγωγή με την πραγματική ζήτηση, μειώνοντας παράλληλα τις απώλειες και τις καθυστερήσεις (Stadtler, 2005).

Τα συστήματα PLM υποστηρίζουν τη διαχείριση ολόκληρου του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, από την αρχική ιδέα και το σχεδιασμό έως την παραγωγή, τη διανομή, την εξυπηρέτηση και την απόρριψη (Stark, 2022). Αυτά τα συστήματα διευκολύνουν τη συνεργασία μεταξύ των ομάδων έρευνας και ανάπτυξης, μηχανικής, προμηθειών και εφοδιαστικής αλυσίδας. Με την ενσωμάτωση των δεδομένων των προϊόντων και των ροών εργασίας, τα εργαλεία PLM συμβάλλουν στη συμμόρφωση με τους κανονισμούς του κλάδου, στη βελτίωση του χρόνου διάθεσης στην αγορά και στην υποστήριξη του σχεδιασμού για την κατασκευασιμότητα και τη βιωσιμότητα του προϊόντος. Συστήματα PLM, όπως το PTC

⁷ SAP. Supplier Relationship Management (SRM) - SAP Spend Management & Business Network

⁸ SAP. Advanced Planning & Optimization (APO)

⁹ Oracle. Advanced Supply Chain Planning (ASCP) - Επίσημο εγχειρίδιο χρήσης (User Guide) από την Oracle.

Windchill¹⁰, το Siemens Teamcenter¹¹ ή το SAP PLM¹², χρησιμοποιούνται ευρέως για τη σύνδεση των διαδικασιών ανάπτυξης προϊόντων με τις λειτουργίες της εφοδιαστικής αλυσίδας (Grieves, 2006). Σε παγκοσμιοποιημένες αγορές με γρήγορους κύκλους καινοτομίας, ένα σύστημα PLM συμβάλλει στην ευθυγράμμιση της εφοδιαστικής αλυσίδας με τις εξελισσόμενες προδιαγραφές των προϊόντων (Wang, Liu, et al., 2021).

Τα συστήματα ηλεκτρονικών προμηθειών (e-Procurement Systems) ψηφιοποιούν και αυτοματοποιούν τις διαδικασίες προμήθειας και αγοράς. Υποστηρίζουν δραστηριότητες, όπως η αναζήτηση προμηθευτών, η ηλεκτρονική υποβολή προσφορών, η διαχείριση συμβάσεων, η έκδοση παραγγελιών αγοράς και η τιμολόγηση (Melon & Spruk, 2020). Αυτά τα συστήματα, όπως το SAP Ariba¹³, το Coupa¹⁴ ή το Jaggaer¹⁵, ενισχύουν τη διαφάνεια, τη συμμόρφωση και τον έλεγχο του κόστους στις προμήθειες. Μέσω της άμεσης ενσωμάτωσης με τους προμηθευτές, οι πλατφόρμες βελτιώνουν επίσης τις σχέσεις με τους προμηθευτές και μειώνουν τους χρόνους παράδοσης. Για τις εφοδιαστικές αλυσίδες, αυτό μεταφράζεται σε πιο αποτελεσματικές αποφάσεις προμήθειας, ταχύτερους κύκλους προμηθειών και βελτιωμένη συνεργασία με στρατηγικούς προμηθευτές (Mavidis & Folinas, 2022).

Επιπλέον, τα BI εργαλεία επιτρέπουν στους επαγγελματίες της εφοδιαστικής αλυσίδας να αναλύουν μεγάλα σύνολα δεδομένων μέσω εξειδικευμένων πλατφορμών, όπως το Tableau¹⁶, το Power BI¹⁷ και το Qlik¹⁸. Τα εργαλεία αυτά επιτρέπουν την οπτικοποίηση βασικών δεικτών απόδοσης (Key Performance Indicators, KPIs), την παρακολούθηση της απόδοσης σε πραγματικό χρόνο και την εκτέλεση αναλύσεων σεναρίων (Campante et al., 2024). Με την ενοποίηση δεδομένων από ERP, SCM, CRM και άλλα συστήματα, τα εργαλεία BI βελτιώνουν τη λήψη αποφάσεων σε διάφορες λειτουργίες, όπως ο προγραμματισμός της ζήτησης, η βελτιστοποίηση της εφοδιαστικής και η διαχείριση κινδύνων. Υποστηρίζουν επίσης την προγνωστική ανάλυση μέσω μηχανικής μάθησης/τεχνητής νοημοσύνης, επιτρέποντας στις εταιρείες να προβλέπουν διαταραχές και να ανταποκρίνονται προληπτικά (Papachristodoulou et al., 2017).

Αυτά τα πρόσθετα συστήματα — APS, PLM, E-Procurement και BI — επεκτείνουν τις δυνατότητες της ψηφιακής εφοδιαστικής αλυσίδας. Συμβάλλουν στην καλύτερη ακρίβεια του σχεδιασμού, στην ταχύτερη καινοτομία, στη διαφάνεια των προμηθειών και στη λήψη αποφάσεων βάσει δεδομένων. Σε συνδυασμό, βοηθούν τις οργανώσεις να δημιουργήσουν εφοδιαστικές αλυσίδες που δεν είναι μόνο αποδοτικές, αλλά και ευέλικτες, ανθεκτικές και ευθυγραμμισμένες με τους στρατηγικούς στόχους.

¹⁰ [PTC Windchill](#). Product Lifecycle Management (PLM)

¹¹ [Siemens Teamcenter](#). Product Lifecycle Management (PLM)

¹² [SAP](#). Product Lifecycle Management (PLM)

¹³ [SAP Ariba](#). e-Procurement

¹⁴ [Coupa](#). e-Procurement

¹⁵ [Jaggaer](#). e-Procurement

¹⁶ [Tableau](#). Business Intelligence (BI)

¹⁷ [Power BI](#). Business Intelligence (BI)

¹⁸ [Qlik](#). Business Intelligence (BI)

2.1.5.2 Κατηγοριοποίηση με Βάση τον Τρόπο Διαχείρισης της Ροής

Εκτός από την ταξινόμηση των συστημάτων εφοδιαστικής αλυσίδας με βάση την λειτουργική τους εξειδίκευση (όπως ERP, APS ή WMS), μια άλλη ουσιαστική προσέγγιση είναι η κατηγοριοποίησή τους με βάση τον τρόπο με τον οποίο διαχειρίζονται τη ροή αγαθών, πληροφοριών και συντονισμού σε όλη την εφοδιαστική αλυσίδα. Αυτή η προοπτική δίνει έμφαση στην ανταπόκριση του συστήματος στη ζήτηση, τη βελτιστοποίηση των πόρων και τους περιβαλλοντικούς ή λειτουργικούς στόχους. Οι βασικές ταξινομήσεις περιλαμβάνουν συστήματα (εφοδιαστικής αλυσίδας) push, pull, υβριδικά, συνεχής αναπλήρωσης, ευέλικτα, λιτά και πράσινα.

2.1.5.2.1 Σύστημα Push

Το σύστημα Push (Make-to-Stock System) βασίζεται σε προγραμματισμό με βάση τις προβλέψεις, όπου οι αποφάσεις παραγωγής και αποθεμάτων λαμβάνονται εκ των προτέρων, προβλέποντας τη μελλοντική ζήτηση. Αυτό το σύστημα είναι επίσης γνωστό ως make-to-stock. Τα προϊόντα κατασκευάζονται και προωθούνται μέσω της εφοδιαστικής αλυσίδας προς τους λιανοπωλητές ή τους πελάτες. Τα συστήματα push επωφελούνται από οικονομίες κλίμακας και είναι αποτελεσματικά σε σταθερά, προβλέψιμα περιβάλλοντα, όπως στην αγορά των Fast-Moving Consumer Goods (FMCG)¹⁹. Ωστόσο, φέρουν τον κίνδυνο υπερπαραγωγής και πλεονάζοντος αποθέματος εάν οι προβλέψεις είναι ανακριβείς (Bortolini et al., 2021).

2.1.5.2.2 Σύστημα Pull

Αντίθετα, το σύστημα Pull (Make-to-Order System) λειτουργεί με βάση τα πραγματικά σήματα ζήτησης. Τα προϊόντα κατασκευάζονται ή αναπληρώνονται μόνο κατόπιν συγκεκριμένων παραγγελιών πελατών — αυτό είναι γνωστό ως make-to-order. Τα συστήματα έλξης μειώνουν το κόστος αποθεμάτων και τον κίνδυνο απαξίωσης, αλλά μπορεί να οδηγήσουν σε μεγαλύτερους χρόνους παράδοσης. Αυτή η προσέγγιση ταιριάζει σε βιομηχανίες με υψηλή προσαρμογή προϊόντων, όπως η αεροδιαστημική ή τα είδη πολυτελείας. Δίνει έμφαση στην ευελιξία και την ανταπόκριση έναντι της αποτελεσματικότητας (Gómez Paredes et al., 2020).

2.1.5.2.3 Υβριδικό Σύστημα (Push – Pull)

Ένα υβριδικό σύστημα (Push-Pull System) συνδυάζει στρατηγικές ώθησης και έλξης. Συνήθως, οι διαδικασίες upstream (όπως η προμήθεια πρώτων υλών και η υποσυναρμολόγηση) ακολουθούν ένα μοντέλο ώθησης, ενώ οι διαδικασίες downstream (όπως η τελική συναρμολόγηση ή η διανομή) ακολουθούν μια προσέγγιση έλξης. Το υβριδικό αυτό μοντέλο εξισορροπεί τη διαχείριση αποθεμάτων με την ανταπόκριση στη ζήτηση, καθιστώντας το κατάλληλο για προϊόντα με απρόβλεπτη ζήτηση αλλά προβλέψιμα εξαρτήματα — όπως τα ηλεκτρονικά είδη ευρείας κατανάλωσης (Miguel et al., 2021).

¹⁹ Προϊόντα που πωλούνται γρήγορα σε σχετικά χαμηλές τιμές.

2.1.5.2.4 Σύστημα Συνεχούς Αναπλήρωσης

Το σύστημα Συνεχούς Αναπλήρωσης (Continuous Replenishment System, CRS) είναι μια συνεργατική προσέγγιση διαχείρισης αποθεμάτων, που χρησιμοποιείται συχνά στο λιανικό εμπόριο. Αυτό το σύστημα μειώνει τις ελλείψεις αποθεμάτων και ελαχιστοποιεί την χειροκίνητη παρέμβαση. Ένα πολύ γνωστό παράδειγμα είναι το μοντέλο διαχείρισης αποθεμάτων από προμηθευτές Vendor-Managed Inventory (VMI)²⁰ της Walmart. Το CRS βελτιώνει την αποτελεσματικότητα της αλυσίδας εφοδιασμού μέσω αυτοματισμού και στενής ενσωμάτωσης (Guo et al., 2023).

2.1.5.2.5 Σύστημα Ευέλικτων Αλυσίδων

Οι ευέλικτες αλυσίδες εφοδιασμού (Agile Supply Chain System) δίνουν προτεραιότητα στην ταχύτητα, την προσαρμοστικότητα και την ανταπόκριση σε ξαφνικές αλλαγές στη ζήτηση ή σε διαταραχές. Βασίζονται στην ευέλικτη παραγωγή, τη στενή συνεργασία προμηθευτών και την κοινή χρήση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Αυτό το σύστημα είναι ιδανικό για ασταθείς ή ταχέως μεταβαλλόμενες αγορές, όπως η μόδα ή η τεχνολογία, όπου ο χρόνος διάθεσης στην αγορά είναι κρίσιμος (Singh & Modgil, 2024).

2.1.5.2.6 Σύστημα Λιτής Αλυσίδας

Η λιτή αλυσίδα εφοδιασμού (Lean Supply Chain System) εστιάζει στη μείωση των αποβλήτων, τη συνεχή βελτίωση (Kaizen)²¹ και τη μεγιστοποίηση της αξίας. Επιδιώκει να βελτιστοποιήσει τις διαδικασίες, να μειώσει το πλεονάζον απόθεμα και να εξαλείψει τις δραστηριότητες που δεν προσθέτουν αξία. Προερχόμενες από το Σύστημα Παραγωγής της Toyota, οι αρχές της λιτής αλυσίδας βελτιώνουν την αποδοτικότητα και την αξιοποίηση των πόρων (Helmold, 2020).

2.1.5.2.7 Σύστημα Πράσινης Αλυσίδας

Τέλος, οι πράσινες αλυσίδες εφοδιασμού (Green Supply Chain System) ενσωματώνουν την περιβαλλοντική βιωσιμότητα στις λειτουργίες της αλυσίδας εφοδιασμού. Αυτό περιλαμβάνει τη χρήση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας, τη μείωση των (ρυπογόνων) εκπομπών, τη βιώσιμη προμήθεια, την ανακύκλωση και την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε όλο τον κύκλο ζωής του προϊόντος. Τα πράσινα συστήματα ευθυγραμμίζονται με τους στόχους εταιρικής κοινωνικής ευθύνης και τις κανονιστικές απαιτήσεις (Koberg & Longoni, 2019).

²⁰ Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., & Simchi-Levi, E. (2000). Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies, and Case Studies. McGraw-Hill, Example 6.4.6, σελ. 139–140.

Figure 2: Walmart Inventory Management Strategy using the vendor management inventory.

²¹ **Σημασιολογία:** Είναι μια ιαπωνική λέξη που στην πράξη παρουσιάζεται ως μια φιλοσοφία διοίκησης και εργαλείο βελτίωσης. Στην λογική της Lean Supply Chain, το Kaizen σημαίνει πως η εφοδιαστική αλυσίδα βελτιώνεται συνεχώς με μικρές παρεμβάσεις ώστε να μειώνονται οι χρόνοι, τα κόστη και τα απόβλητα.

2.1.6 Ζητήματα Εφοδιαστικής Αλυσίδας

Διαταραχές στην Εφοδιαστική Αλυσίδα

Παρά τις προόδους στα συστήματα εφοδιαστικής αλυσίδας, υπάρχουν ακόμη αρκετά ζητήματα που αντιμετωπίζουν οι επιχειρήσεις (Magableh, 2021). Οι διαταραχές μπορούν να προκληθούν από παράγοντες όπως οι φυσικές καταστροφές, η πολιτική αστάθεια ή οι πανδημίες και να επηρεάσουν σοβαρά την απόδοση της εφοδιαστικής αλυσίδας. Για παράδειγμα, η πανδημία COVID-19 οδήγησε σε εκτεταμένες διαταραχές της αλυσίδας εφοδιασμού, προκαλώντας καθυστερήσεις στην παραγωγή, ελλείψεις πρώτων υλών και δυσκολίες στις μεταφορές. Η έλλειψη ημιαγωγών, επηρέασε κλάδους από την αυτοκινητοβιομηχανία έως την ηλεκτρονική βιομηχανία, καταδεικνύοντας περαιτέρω τις εκτεταμένες συνέπειες των διαταραχών της αλυσίδας εφοδιασμού (Xu et al., 2020).

Προκλήσεις στη Διαχείριση Αποθεμάτων

Η εξισορρόπηση των αποθεμάτων για την ικανοποίηση της ζήτησης των πελατών χωρίς υπεραποθεματοποίηση ή εξάντληση των αποθεμάτων παραμένει μια σημαντική πρόκληση. Η κακή διαχείριση των αποθεμάτων μπορεί να οδηγήσει σε υψηλό κόστος διακράτησης ή εξαντλήσεις αποθεμάτων, επηρεάζοντας αρνητικά την ικανοποίηση των πελατών και των εσόδων. Εταιρείες, όπως η Amazon, έχουν επενδύσει σημαντικά σε εξελιγμένα συστήματα διαχείρισης αποθεμάτων για να αντιμετωπίσουν αυτή την πρόκληση, σε αντίθεση με μικρότερες επιχειρήσεις οι οποίες εξακολουθούν να δυσκολεύονται να βρουν τη σωστή ισορροπία.

Ζητήματα Αξιοπιστίας Προμηθευτών

Η αξιοπιστία των προμηθευτών είναι ένα άλλο ζήτημα, καθώς οι επιχειρήσεις συχνά εξαρτώνται από πολλούς προμηθευτές για εξαρτήματα ή πρώτες ύλες. Οι αποτυχίες των προμηθευτών, όπως καθυστερήσεις, προβλήματα ποιότητας ή αφερεγγυότητα, μπορούν να οδηγήσουν σε διακοπή της παραγωγής ή ανάκληση προϊόντων. Ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα είναι η διαταραχή που προκλήθηκε από τον ιαπωνικό σεισμό του 2011, ο οποίος επηρέασε τις αλυσίδες εφοδιασμού πολλών παγκόσμιων εταιρειών που εξαρτώνται από τους Ιάπωνες κατασκευαστές (Singh & Wahid, 2014).

Γεωπολιτικοί Κίνδυνοι

Οι παγκόσμιες αλυσίδες εφοδιασμού είναι επίσης ευάλωτες σε γεωπολιτικούς κινδύνους, όπως οι εμπορικοί δασμοί, η πολιτική αστάθεια και οι πολιτικές προστατευτισμού. Οι συνεχιζόμενες εμπορικές εντάσεις μεταξύ των ΗΠΑ και της Κίνας, για παράδειγμα, έχουν επηρεάσει τις παγκόσμιες αλυσίδες, οδηγώντας σε αυξήσεις τιμών και καθυστερήσεις.

Προκλήσεις Βιωσιμότητας

Οι ανησυχίες για τη βιωσιμότητα αποκτούν ολοένα και μεγαλύτερη σημασία, με τις εταιρείες να αντιμετωπίζουν πιέσεις ώστε να υιοθετήσουν πρακτικές φιλικές προς το περιβάλλον. Ζητήματα όπως η διαχείριση αποβλήτων, οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα και η προμήθεια βιώσιμων υλικών απαιτούν από τις εταιρείες να επανεξετάσουν τις

διαδικασίες της αλυσίδας εφοδιασμού τους και να προβούν σε προσαρμογές για τη μείωση του περιβαλλοντικού τους αποτυπώματος (Chang et al., 2020).

Πολυπλοκότητα Ψηφιακών Τεχνολογιών

Η ενσωμάτωση ψηφιακών τεχνολογιών, όπως η TN, η blockchain και το IoT, στα συστήματα της εφοδιαστικής αλυσίδας, αν και πολλά υποσχόμενη, μπορεί να είναι πολύπλοκη και δαπανηρή. Ωστόσο, οι τεχνολογίες αυτές διαθέτουν μεγάλες δυνατότητες για τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας και της διαφάνειας. Παρά τις προκλήσεις, οι επιχειρήσεις προθυμοποιούνται ολοένα και περισσότερο να χρησιμοποιήσουν αυτές τις προηγμένες τεχνολογίες για να βελτιώσουν τις επιδόσεις της εφοδιαστικής τους αλυσίδας, να παραμείνουν ανταγωνιστικές και να ανταποκριθούν στις εξελισσόμενες προσδοκίες των καταναλωτών (Charles et al., 2023).

Απάτη και Παραχάραξη

Επίσης, η εφοδιαστική αλυσίδα αντιμετωπίζει αρκετές κοινές προκλήσεις που επηρεάζουν τη λειτουργική αποδοτικότητα και την επιχειρηματική απόδοση. Μια σημαντική πρόκληση είναι η απάτη και η παραχάραξη, ιδίως σε κλάδους, όπως τα φαρμακευτικά προϊόντα, τα ηλεκτρονικά και τα είδη πολυτελείας. Τα πλαστά προϊόντα ενέχουν κινδύνους για την ασφάλεια των καταναλωτών, τη φήμη των εμπορικών σημάτων και τη συμμόρφωση με τις κανονιστικές διατάξεις. Για την καταπολέμηση της απάτης, οι εταιρείες εφαρμόζουν μέτρα κατά της παραποίησης, όπως η εκχώρηση μοναδικών κωδικών σε κάθε προϊόν, η τεχνολογία blockchain και τα συστήματα εντοπισμού και παρακολούθησης. Αυτά τα μέτρα διασφαλίζουν την αυθεντικότητα των προϊόντων και επιτρέπουν την παρακολούθηση της πορείας τους καθ' όλη τη διάρκεια της εφοδιαστικής αλυσίδας (Litke et al., 2019).

Αναποτελεσματικότητα και Κακή Ποιότητα

Η αναποτελεσματικότητα είναι μια άλλη σημαντική πρόκληση στην εφοδιαστική αλυσίδα, η οποία συχνά προκύπτει από την κακή πρόβλεψη της ζήτησης, την ξεπερασμένη τεχνολογία και τον ανεπαρκή συντονισμό μεταξύ των εταίρων της αλυσίδας εφοδιασμού. Αυτό μπορεί να οδηγήσει σε αυξημένο κόστος, καθυστερήσεις, σπατάλη πόρων και να προκύψουν κακής ποιότητας προϊόντα προς παράδοση. Όταν υπάρχουν καθυστερήσεις ή προβλήματα στη μεταφορά, για παράδειγμα, μπορεί να προκληθούν ζημιές σε προϊόντα, που διαφορετικά θα ήταν ποιοτικά (Tseng et al., 2019).

Ανθεκτικότητα Εφοδιαστικής Αλυσίδας

Επίσης, η κακή συντήρηση ή αποθήκευση των προϊόντων λόγω αναποτελεσματικών διαδικασιών μπορεί να οδηγήσει σε φθορές ή αλλοίωση της ποιότητάς τους, επηρεάζοντας την τελική εμπειρία του καταναλωτή και την αξιοπιστία της εταιρείας. Οι οργανισμοί αντιμετωπίζουν αυτά τα ζητήματα με την υιοθέτηση προηγμένων αναλύσεων, μηχανικής μάθησης και ολοκληρωμένων συστημάτων που ενισχύουν την ορατότητα και τη λήψη αποφάσεων. Αυτές οι ενέργειες, επιτρέπουν την αυτοματοποίηση και βελτιστοποίηση των διαδικασιών, χρησιμοποιώντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για την πρόβλεψη της ζήτησης, την ανίχνευση ανωμαλιών και τον καλύτερο συντονισμό μεταξύ των συμμετεχόντων στην αλυσίδα. Η αρχιτεκτονική αυτή περιλαμβάνει συστήματα συλλογής, επεξεργασίας και

ανάλυσης δεδομένων, καθώς και ολοκλήρωσης πληροφοριών, με σκοπό την υποστήριξη αποφάσεων για μια αποτελεσματικότερη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας (Tseng et al., 2019).

Έλλειψη Διαφάνειας

Η έλλειψη διαφάνειας είναι ένα επίμονο ζήτημα στις παγκόσμιες αλυσίδες εφοδιασμού. Πολλές αλυσίδες περιλαμβάνουν πολλαπλούς μεσάζοντες, γεγονός που καθιστά δύσκολο τον εντοπισμό της προέλευσης και της διακίνησης των προϊόντων. Αυτή η αδιαφάνεια μπορεί να οδηγήσει σε ανήθικες πρακτικές, συμπεριλαμβανομένης της εργασιακής εκμετάλλευσης και των περιβαλλοντικών παραβιάσεων. Οι εταιρείες επενδύουν όλο και περισσότερο σε πρωτοβουλίες διαφάνειας, όπως η ιχνηλασιμότητα, στους ελέγχους προμηθευτών και στα προγράμματα κανονιστικής συμμόρφωσης, για να διασφαλίσουν την ηθική προμήθεια και τη βιωσιμότητα. Τα προγράμματα συμμόρφωσης περιλαμβάνουν διαδικασίες και πρωτοβουλίες που διασφαλίζουν ότι οι εταιρείες συμμορφώνονται με τους νόμους, τους κανονισμούς και τα πρότυπα του κλάδου που ισχύουν για τις δραστηριότητές τους. Αυτά μπορεί να εμπεριέχουν την παρακολούθηση και την αναφορά σε θέματα, όπως η ασφάλεια των προϊόντων, η προστασία του περιβάλλοντος, τα δικαιώματα και οι εργασιακές συνθήκες των εργαζομένων καθώς και η υπευθυνότητα απέναντι στους καταναλωτές. Επιπλέον, περιλαμβάνουν τη συνεχιζόμενη εκπαίδευση των εργαζομένων, την εφαρμογή εσωτερικών ελέγχων και την ανάπτυξη στρατηγικών για τη διαχείριση και την αποτροπή κινδύνων νομικής και ηθικής παραβίασης (Tseng et al., 2019).

Η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας είναι ένας δυναμικός και πολύπλοκος κλάδος που περιλαμβάνει τις προμήθειες, την παραγωγή, την εφοδιαστική, την αποθήκευση, τη διανομή και την εξυπηρέτηση πελατών. Ενώ προσφέρει σημαντικά οφέλη όσον αφορά τη μείωση του κόστους, τη βελτίωση της αποδοτικότητας και την ικανοποίηση των πελατών, αντιμετωπίζει επίσης προκλήσεις όπως η απάτη, η αναποτελεσματικότητα, η έλλειψη διαφάνειας και οι διαταραχές. Το εξελισσόμενο τοπίο της που καθοδηγείται από την ψηφιοποίηση, τη βιωσιμότητα και την οικοδόμηση ανθεκτικότητας, υπογραμμίζει την ανάγκη για συνεχή καινοτομία και στρατηγική προσαρμογή. Αξιοποιώντας την τεχνολογία και τις βέλτιστες πρακτικές, οι οργανισμοί μπορούν να δημιουργήσουν ισχυρές, προσαρμόσιμες και πράσινες αλυσίδες εφοδιασμού που ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις μιας ολοένα και πιο διασυνδεδεμένης και ανταγωνιστικής παγκόσμιας αγοράς (Dietrich et al., 2021).

2.2 Blockchain

2.2.1 Ορισμός

Η τεχνολογία blockchain είναι ένα αποκεντρωμένο και καταναμημένο σύστημα λογιστικών βιβλίων που έχει σχεδιαστεί για την ασφαλή και διαφανή καταγραφή των συναλλαγών σε ένα δίκτυο. Εξαλείφει την ανάγκη για μια κεντρική αρχή, επιτρέποντας την εμπιστοσύνη μέσω κρυπτογραφικών μηχανισμών επικύρωσης και αλγορίθμων συναίνεσης. Αυτό το χαρακτηριστικό καθιστά την blockchain ιδιαίτερα πολύτιμη στη διαχείριση της

αλυσίδας εφοδιασμού, όπου πολλαπλοί ενδιαφερόμενοι χρειάζονται ένα αξιόπιστο, αμετάβλητο και διαφανές σύστημα για την παρακολούθηση των εμπορευμάτων, των πληρωμών και των διαδικασιών συμμόρφωσης (Francesco Maesa et al., 2019).

Η τεχνολογία blockchain παρουσιάστηκε για πρώτη φορά το 2008 από τον Satoshi Nakamoto ως το υποκείμενο σύστημα για το Bitcoin²². Έκτοτε, έχει εξελιχθεί πέρα από τα κρυπτονομίσματα και έχει πλέον υιοθετηθεί ευρέως σε κλάδους, όπως η διαχείριση της αλυσίδας εφοδιασμού, η υγειονομική περίθαλψη, η χρηματοδότηση και η ακίνητη περιουσία. Οι θεμελιώδεις αρχές της blockchain — αποκέντρωση, διαφάνεια, ασφάλεια και αμεταβλητότητα — την καθιστούν ένα επαναστατικό εργαλείο για διάφορες εφαρμογές όπου η εμπιστοσύνη και η ακεραιότητα των δεδομένων είναι κρίσιμες (Hellani et al., 2018).

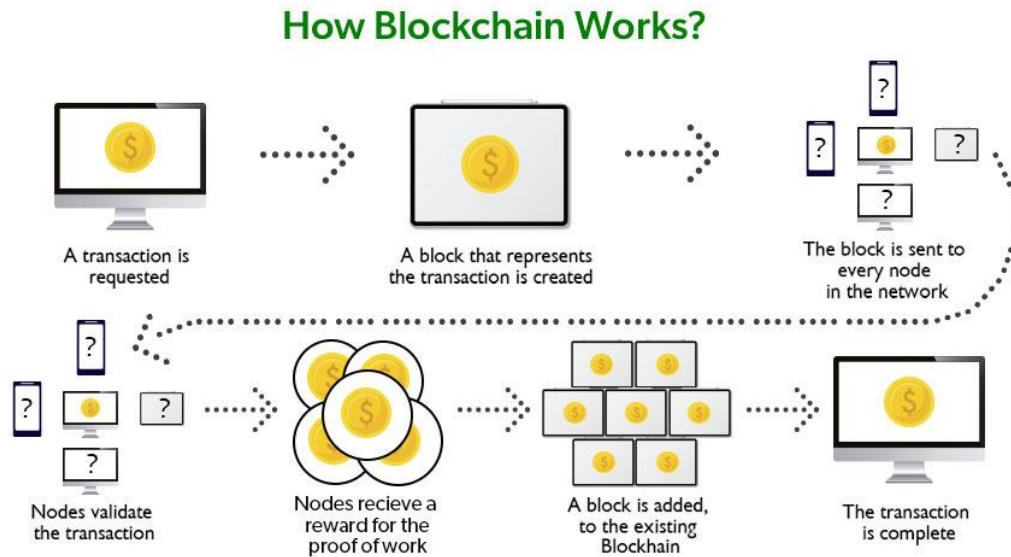
2.2.2 Τρόπος Λειτουργίας, Δομή Μπλοκ & Αρχιτεκτονική

2.2.2.1 Τρόπος Λειτουργίας

Η blockchain λειτουργεί μέσω ενός κατακευκασμένου συστήματος (λογιστικών) βιβλίων, όπου πολλαπλά αντίγραφα της βάσης δεδομένων (άρα των λογιστικών βιβλίων) διατηρούνται σε διαφορετικούς κόμβους ενός δικτύου (Belotti et al., 2019). Η διαδικασία καταγραφής μιας νέας πληροφορίας στην αλυσίδα ξεκινά όταν ένας χρήστης υποβάλει ένα αίτημα για αποθήκευση για μια ολοκληρωμένη συναλλαγή, η οποία περιλαμβάνει λεπτομέρειες, όπως ο αποστολέας, ο παραλήπτης και η φύση της συναλλαγής — για παράδειγμα, μεταφορά προϊόντων, πληρωμές ή ενημερώσεις σχετικά με τη διαδρομή ενός φορτίου. Η συναλλαγή αυτή αποστέλλεται στο δίκτυο και εισέρχεται σε μια φάση επικύρωσης. Σε αυτή τη φάση, οι κόμβοι του δικτύου — γνωστοί ως επικυρωτές ή miners, πρώτα επαληθεύουν τη συναλλαγή και την προσθέτουν σε μια ομάδα εκκρεμών συναλλαγών (transaction pool). Στη συνέχεια, προτείνεται ένα νέο μπλοκ που εμπεριέχει τη συναλλαγή, το οποίο υπόκειται σε επικύρωση από όλους τους άλλους συμμετέχοντες κόμβους μέσω του εκάστοτε αλγορίθμου συναίνεσης. Μόλις ολοκληρωθεί η επικύρωση, το μπλοκ αποθηκεύεται στο τοπικό αντίγραφο της αλυσίδας του κάθε κόμβου. Μάλιστα, το μπλοκ προστίθεται αμετάκλητα στην αλυσίδα, εξασφαλίζοντας την ασφάλεια, τη διαφάνεια και την ιχνηλασιμότητα της πληροφορίας (Habib et al., 2022).

Οι δύο πιο συνηθισμένοι αλγόριθμοι συναίνεσης είναι ο Proof of Work (PoW), που απαιτεί την επίλυση σύνθετων μαθηματικών προβλημάτων, και ο Proof of Stake (PoS), που επιλέγει τους επικυρωτές βάσει των tokens που αυτοί δεσμεύουν (stakes), προσφέροντας ενεργειακή αποδοτικότητα.

²² [Bitcoin Network](#)



Εικόνα 2: Διαδικασία επικύρωσης και εγγραφής συναλλαγής στη blockchain.

2.2.2.2 Δομή Μπλοκ

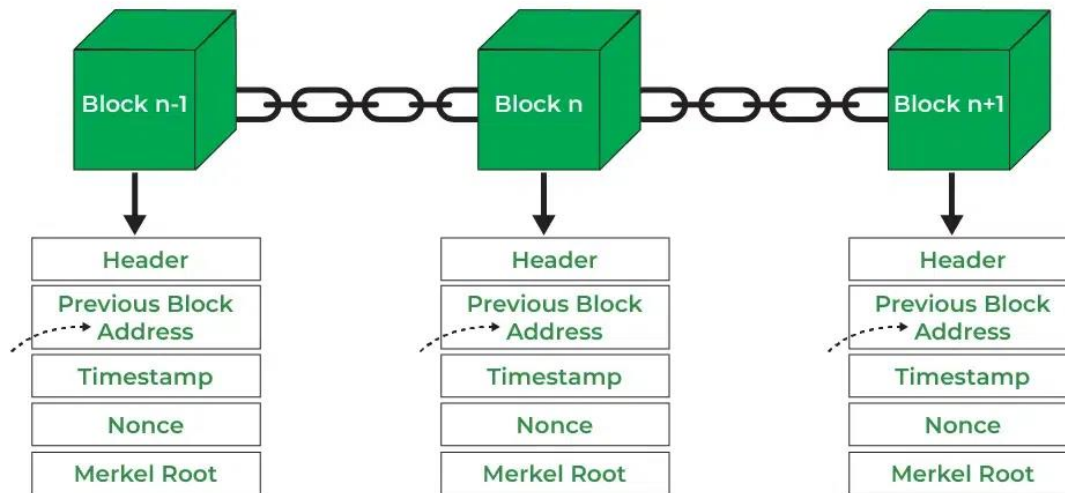
Κάθε μπλοκ αποτελείται από δύο μέρη. Το πρώτο μέρος είναι το σώμα του μπλοκ (block body), δηλαδή τα δεδομένα των συναλλαγών, τα οποία περιλαμβάνουν τόσο μετα-δεδομένα όσο και δομημένα δεδομένα σχετικά με την συναλλαγή ή, σε μερικές περιπτώσεις αναφορές σε δεδομένα που αποθηκεύονται εκτός της αλυσίδας (off-chain). Το δεύτερο μέρος αναφέρεται στη κεφαλίδα του μπλοκ (block header), η οποία περιέχει κρίσιμες πληροφορίες που επιτρέπουν την σωστή λειτουργία της blockchain (Sriman et al., 2020).

Συγκεκριμένα, η κεφαλίδα περιλαμβάνει:

- A. ένα μοναδικό κρυπτογραφικό κατακερματισμό του προηγούμενου μπλοκ (previous block hash) που λειτουργεί ως ψηφιακό αποτύπωμα του μπλοκ και εξασφαλίζει την ισχυρή αλληλουχία της αλυσίδας·
- B. τη χρονοσφραγίδα δημιουργίας του μπλοκ (timestamp)·
- C. έναν αριθμό nonce, μια μεταβλητή που μεταβάλλεται κατά τη διαδικασία της εξόρυξης·
- D. το Merkle Root, που αποτελεί όλο το συνολικό μαθηματικό αποτύπωμα των συναλλαγών του μπλοκ, όπως αυτές οργανώνονται μέσω του Merkle tree²³.

Στη συνέχεια, όλα τα παραπάνω δεδομένα της κεφαλίδας κωδικοποιούνται σε έναν κρυπτογραφικό κατακερματισμό (hash) που υπολογίζεται μέσω κρυπτογραφικής συνάρτησης (π.χ. SHA 256), δημιουργώντας το ψηφιακό αποτύπωμα του μπλοκ. Το συγκεκριμένο hash, λειτουργεί ως η τιμή previous block hash (κατακερματισμός προηγούμενου μπλοκ) στο επόμενο μπλοκ (όπως προαναφέρθηκε), εξασφαλίζοντας έτσι την αλυσιδωτή ακεραιότητα των μπλοκ (Rahim et al., 2020).

²³ **Merkle Trees (Δέντρα Merkle):** Είναι μια ιεραρχική δομή δεδομένων που εφαρμόζεται στην τεχνολογία blockchain για την αποθήκευση και την επαλήθευση μεγάλων όγκων δεδομένων π.χ. συναλλαγές.



Εικόνα 3: Δομή και διασύνδεση μπλοκ στη blockchain.

Συνεπώς, τα μπλοκ συνδέονται μεταξύ τους διαδοχικά μέσω των δεικτών κατακερματισμού (hash pointers) (δηλ. τιμών του προαναφερόμενου πεδίου *previous block hash*), σχηματίζοντας τη γνωστή "αλυσίδα" της blockchain. Η δομή αυτή διασφαλίζει ότι οποιαδήποτε αλλαγή σε ένα μπλοκ θα τροποποιούσε το hash του, το οποίο με τη σειρά του θα καθιστούσε άκυρες τις αναφορές όλων των επόμενων μπλοκ. Επομένως, όσο πιο πίσω στην αλυσίδα βρίσκεται ένα μπλοκ, τόσο περισσότερη υπολογιστική ισχύ απαιτείται για την επιτυχή τροποποίησή του, καθώς απαιτείται η αναδημιουργία όλων των επόμενων μπλοκ (Sriman et al., 2020).

Εκτός από την κρυπτογραφική αλυσίδα που ενισχύει την ασφάλεια του συστήματος, σημαντικό ρόλο στη διατήρηση της ακεραιότητας της blockchain διαδραματίζει και ο τρόπος ενημέρωσης των κόμβων με νέα μπλοκ. Κατά την προσθήκη ενός νέου μπλοκ, κάθε κόμβος του δικτύου ενημερώνει το δικό του αντίγραφο του λογιστικού βιβλίου προσθέτοντας το νέο μπλοκ τοπικά. Δεν απαιτείται πλήρης αναμετάδοση ολόκληρης της αλυσίδας — μόνο το νέο μπλοκ κοινοποιείται και επαληθεύεται, γεγονός που ελαττώνει σημαντικά την ανάγκη για υπερβολική δικτυακή κίνηση (Sarode et al., 2021).

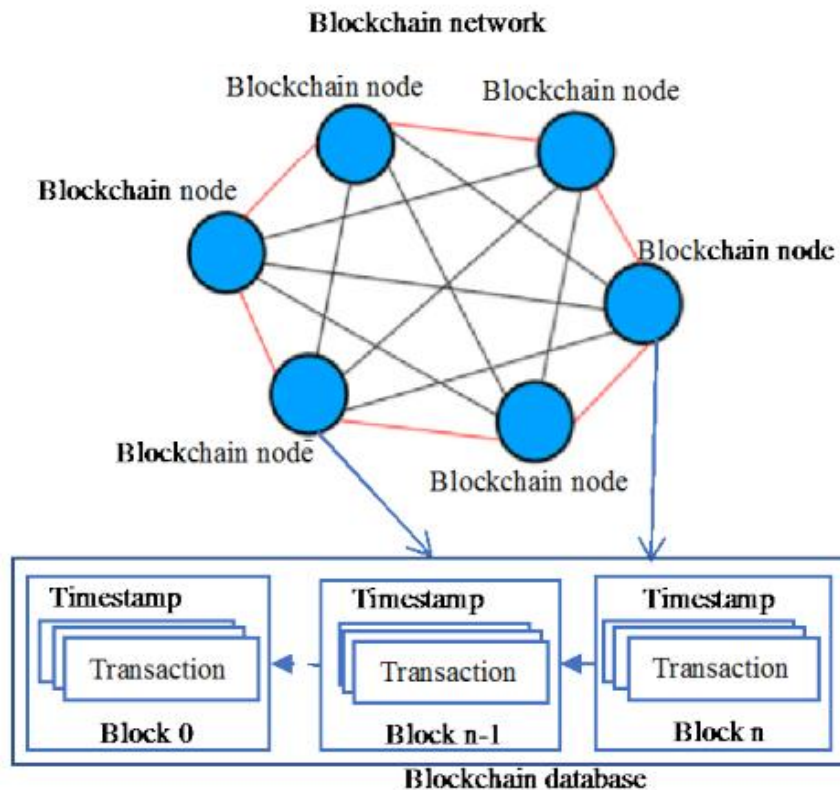
2.2.2.3 Αρχιτεκτονική

Η αρχιτεκτονική της τεχνολογίας blockchain βασίζεται σε μια πολυστρωματική δομή που συνδυάζει την κρυπτογραφία, την αποκέντρωση και τα διανεμημένα δίκτυα. Συγκεκριμένα, το δίκτυο αποτελείται από ένα αποκεντρωμένο σύνολο κόμβων (nodes), οι οποίοι μεταδίδουν και διαχειρίζονται συλλογικά τη βάση δεδομένων της αλυσίδας. Κάθε κόμβος λειτουργεί ως ανεξάρτητη μονάδα που επικυρώνει και καταγράφει συναλλαγές. Τα επικυρωμένα δεδομένα στη συνέχεια οργανώνονται σε μπλοκ, τα οποία περιλαμβάνουν χρονοσφραγίδες (timestamps) και πληροφορίες συναλλαγών και στη συνέχεια συνδέονται διαδοχικά μεταξύ τους με τρόπο αδιάσπαστο και χρονολογικά οργανωμένο.

Αυτή η αρχιτεκτονική εξασφαλίζει ένα αμετάβλητο ψηφιακό σύστημα με χαρακτηριστικά όπως, η αποκέντρωση, η εγγύηση μη αποποίησης (non-repudiation) — καθώς

οι συναλλαγές υπογράφονται ψηφιακά — και η εμπιστευτικότητα, η οποία διασφαλίζεται μέσω της χρήσης προηγμένων κρυπτογραφικών μεθόδων (Salman et al., 2018).

Η παρακάτω Εικόνα 4 παρουσιάζει μόνο τα δύο βασικά επίπεδα της αρχιτεκτονικής της blockchain: (I) το επίπεδο του αποκεντρωμένου δικτύου κόμβων και (II) τη δομή της βάσης δεδομένων των μπλοκ. Αν και προσφέρει μια σαφή απεικόνιση της βασικής λειτουργίας των συναλλαγών, δεν περιλαμβάνει όλα τα κρίσιμα επίπεδα που συνθέτουν μια ολοκληρωμένη αρχιτεκτονική του συστήματος. Συνεπώς, η εικόνα χρησιμοποιείται υποστηρικτικά για την κατανόηση της γενικής δομής.



Εικόνα 4: Η αρχιτεκτονική της blockchain – (Salman et al., 2018).

Ακολουθώς, αναλύονται τα επίπεδα της τεχνολογίας blockchain, τα οποία ουσιαστικά αποτελούν τα θεμελιώδη υπό-συστήματα που συμβάλλουν στην ομαλή λειτουργία της (αν θεωρήσουμε πως όλη η blockchain είναι ένα ολοκληρωμένο σύστημα), παρέχοντας ασφάλεια και αξιοπιστία στους χρήστες.

1. Επίπεδο δικτύου (Peer to Peer, P2P)

Το θεμέλιο της blockchain είναι το peer-to-peer (P2P) (ομότιμο) δίκτυο, στο οποίο συμμετέχουν οι κόμβοι — υπολογιστές που συνδέονται και επικοινωνούν απευθείας μεταξύ τους. Οι κόμβοι διατηρούν αντίγραφα του λογιστικού βιβλίου και διαδραματίζουν ρόλο στην επαλήθευση και την καταγραφή των συναλλαγών. Το P2P δίκτυο της blockchain βασίζεται σε κατάλληλα, ασφαλή και αποδοτικά πρωτόκολλα επικοινωνίας, τα οποία διασφαλίζουν την αξιοπιστία, την ακεραιότητα και την ασφάλεια των δεδομένων που ανταλλάσσονται μεταξύ των κόμβων (Sarmah, 2018).

Υπάρχουν δύο βασικοί τύποι κόμβων blockchain: οι πλήρεις κόμβοι (full nodes), οι οποίοι διατηρούν ολόκληρο το ιστορικό της blockchain, και οι ελαφροί κόμβοι (light nodes) που αποθηκεύουν μόνο βασικά δεδομένα, όπως τις κεφαλίδες των μπλοκ (block headers) — δηλαδή μεταδεδωμένα των μπλοκ χωρίς το πλήρες περιεχόμενο των συναλλαγών. Αυτή η προσέγγιση επιτρέπει τη γρηγορότερη επαλήθευση των συναλλαγών, ελαχιστοποιώντας παράλληλα τις απαιτήσεις αποθήκευσης και επεξεργασίας (Wang et al., 2021).

2. Επίπεδο Δεδομένων (Data Layer)

Το επίπεδο δεδομένων αποτελεί το θεμέλιο κάθε συστήματος blockchain και προσφέρει ένα σύνολο κρίσιμων υπηρεσιών που διασφαλίζουν την σωστή καταγραφή, την πρόσβαση και διατήρηση της πληροφορίας. Συγκεκριμένα, παρέχει υπηρεσίες:

- **Αποθήκευσης συναλλαγών και κατάστασης:** Οι συναλλαγές οργανώνονται σε μπλοκ και καταγράφονται με τρόπο που διασφαλίζεται η μόνιμη και αμετάβλητη αποθήκευσή τους.
- **Διαχείρισης δομής δεδομένων:** Υιοθετούνται δομές, όπως Merkle Trees, για την αποδοτική επαλήθευση και αναζήτηση συναλλαγών.
- **Κρυπτογραφικού κατακερματισμού:** Χρησιμοποιούνται hashes για την ακεραιότητα των δεδομένων και την αλληλουχία των μπλοκ.
- **Σειριοποίησης και αποσειριοποίησης δεδομένων:** Τα δεδομένα μετατρέπονται σε μορφή κατάλληλη για την αποθήκευση και την μεταφορά τους στο δίκτυο, καθώς και επαναφέρονται στην αρχική τους δομή για χρήση, όπως προβολή, επεξεργασία ή αποθήκευση.
- **Διαχείρισης κατάστασης (state management):** Τεκμηριώνεται και ενημερώνεται η κατάσταση του συστήματος (π.χ. υπόλοιπα λογαριασμών).
- **Versioning και διανομής δεδομένων:** Καταγράφεται η ακολουθία των αλλαγών στα δεδομένα μέσω της αλυσίδας των μπλοκ και διασφαλίζεται ο συγχρονισμός τους σε όλους τους κόμβους του δικτύου. Με αυτό το τρόπο, εξασφαλίζεται η συνοχή και η ακεραιότητα των πληροφοριών.
- **Ευρητηριασμού και δυνατότητας επερωτήσεων (querying):** Υποστηρίζεται η αναζήτηση και προσπέλαση ιστορικών δεδομένων συναλλαγών, μέσω μηχανισμών ευρητηριασμού και κατανεμημένης αποθήκευσης.

Ως εκ τούτου, το Επίπεδο Δεδομένων δεν είναι απλώς ένας "αποθηκευτικός χώρος", αλλά ένα πλήρως λειτουργικό υπόστρωμα που εξασφαλίζει την ακεραιότητα, την προσβασιμότητα και την διαθεσιμότητα των δεδομένων σε ένα κατανεμημένο περιβάλλον (Efanov & Roschin, 2018).

3. Επίπεδο Συναίνεσης (Consensus Layer)

Το επίπεδο συναίνεσης είναι υπεύθυνο για τη διασφάλιση της ομοφωνίας μεταξύ των κόμβων του δικτύου σχετικά με τη σειρά και την εγκυρότητα των μπλοκ. Λειτουργεί χωρίς την ανάγκη κεντρικών φορέων ή ελεγκτικών αρχών, αλλά βασίζεται σε αποκεντρωμένους αλγορίθμους συναίνεσης (consensus mechanisms), όπως Proof of Work, Proof of Stake, κ.ά.,

οι οποίοι επιτυγχάνουν την εμπιστοσύνη στο δίκτυο (Lashkari & Musilek, 2021). Οι κύριες υπηρεσίες που παρέχει το επίπεδο αυτό περιλαμβάνουν:

- **Επικύρωσης μπλοκ:** Έλεγχος ότι το περιεχόμενο ενός προτεινόμενου μπλοκ (συναλλαγές, hash, nonce κ.λπ.) είναι έγκυρο και σύμφωνο με τους κανόνες του πρωτοκόλλου (συναίνεσης).
- **Εκτέλεσης αλγορίθμων συναίνεσης:** Εφαρμογή μηχανισμού που καθορίζει πώς και πότε προστίθενται νέα μπλοκ (π.χ. mining, staking, voting).
- **Επιλογής κόμβου-leader:** Καθορίζεται ποιος κόμβος αποκτά δικαίωμα να προτείνει το επόμενο μπλοκ (π.χ. μέσω ανταγωνισμού σε PoW ή τυχαιοποίηση σε PoS).
- **Επιλογής αλυσίδας σε περιπτώσεις διακλάδωσης (fork):** Όταν στη blockchain για ένα χρονικό διάστημα υπάρχουν δύο ή περισσότερες ανταγωνιστικές εκδοχές της αλυσίδας, το επίπεδο αυτό καθορίζει ποια θα θεωρηθεί έγκυρη για την συνέχεια της “επίσημης” (εκδοχής της) αλυσίδας (π.χ. η μακρύτερη αλυσίδα).
- **Ανοχής σε σφάλματα και κακόβουλη συμπεριφορά:** Επιτρέπει στο σύστημα να συνεχίσει τη λειτουργία του ακόμα και αν κάποιο ποσοστό των κόμβων είναι δυσλειτουργικό ή κακόβουλο (π.χ. Byzantine Fault Tolerance).
- **Διαχείρισης μηνυματοδότησης και ψήφισης:** Συντονισμός της επικοινωνίας και της διαδικασίας λήψης αποφάσεων μεταξύ των κόμβων, ιδιαίτερα σε Byzantine-consensus πρωτόκολλα.
- **Διαχείρισης κινήτρων (incentive management):** Σε μηχανισμούς, όπως ο PoW ή ο PoS, παρέχονται ανταμοιβές για την συμμετοχή στη διαδικασία συναίνεσης, ενισχύοντας έτσι την συμμετοχή και την ασφάλεια του δικτύου.

Συνεπώς, το επίπεδο συναίνεσης δεν περιορίζεται στην "απλή συμφωνία" για ένα μπλοκ, αλλά επιτελεί κρίσιμες λειτουργίες για τη συνοχή, ασφάλεια και αποδοτικότητα του συστήματος.

4. Επίπεδο Συμβολαίων (Contract Layer)

Πάνω από τα βασικά δεδομένα της blockchain λειτουργούν τα έξυπνα συμβόλαια (smart contracts) — δηλαδή αυτοεκτελούμενα προγράμματα με προκαθορισμένους κανόνες, τα οποία αποθηκεύονται στην blockchain και ενεργοποιούνται αυτόματα όταν πληρούνται προκαθορισμένες συνθήκες, προσφέροντας υπηρεσίες διαχείρισης συμβολαίων — εκτέλεση, διάταξη, επικύρωση όρων, έλεγχος πρόσβασης και παρακολούθηση της κατάστασής, διευκολύνοντας έτσι τον πλήρη κύκλο ζωής του συμβολαίου, χωρίς να απαιτείται ανθρώπινη παρέμβαση. Στο πλαίσιο της εφοδιαστικής αλυσίδας, μπορούν να αυτοματοποιήσουν κρίσιμες διαδικασίες, όπως οι πληρωμές, η παράδοση αγαθών, ή η καταγραφή διαφόρων παραμέτρων μεταφοράς (π.χ. θερμοκρασία), εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη για μεσάζοντες (Hewa et al., 2021).

5. Επίπεδο Εφαρμογών (Application Layer)

Στην κορυφή της αρχιτεκτονικής βρίσκονται οι αποκεντρωμένες εφαρμογές (decentralized applications, DApps), οι οποίες αξιοποιούν έξυπνα συμβόλαια για την παροχή χρήσιμων λειτουργιών στον τελικό χρήστη. Ωστόσο, η κορυφή της αρχιτεκτονικής της blockchain δεν περιορίζεται μόνο στις εφαρμογές (DApps), αλλά και σε ένα ευρύτερο οικοσύστημα εργαλείων, διεπαφών και υπηρεσιών που διευκολύνουν την ανάπτυξη, την λειτουργία και την ενσωμάτωση των αποκεντρωμένων συστημάτων. Στο πλαίσιο της εφοδιαστικής αλυσίδας, τα DApps μπορούν να προσφέρουν δυνατότητες ιχνηλασιμότητας, ελέγχους συμμόρφωσης ή διαχείρισης αποθεμάτων σε πραγματικό χρόνο (Wu et al., 2019).

Η δομική ακεραιότητα της αρχιτεκτονικής blockchain εγγυάται την αποκέντρωση, τη διαφάνεια και την ασφάλεια, καθιστώντας την ιδανική τεχνολογία για την ασφαλή, απαραβίαστη τήρηση αρχείων σε όλους τους κλάδους (Golosova & Romanovs, 2018).

2.2.3 Χαρακτηριστικά & Πλεονεκτήματα της Τεχνολογίας Blockchain

2.2.3.1 Βασικά Χαρακτηριστικά

Η τεχνολογία blockchain διαθέτει διάφορα καθοριστικά χαρακτηριστικά που συμβάλλουν στην ολοένα και αυξανόμενη υιοθέτησή της σε διάφορους τομείς. Ορισμένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της είναι τα εξής:

Αποκέντρωση (Decentralization)

Η τεχνολογία blockchain στηρίζεται στην αποκέντρωση, δηλαδή στη λειτουργία χωρίς την παρουσία κεντρικής αρχής ή τη μεσολάβηση τρίτων. Οι συναλλαγές καταγράφονται, επαληθεύονται και διαχειρίζονται από ένα κατακεντρωμένο δίκτυο κόμβων, εξαλείφοντας έτσι την ανάγκη για μεσάζοντες και ενισχύοντας την αυτονομία των χρηστών (Verma et al., 2022).

Αμεταβλητότητα (Immutability)

Ένα από τα θεμελιώδη χαρακτηριστικά της blockchain είναι η αμεταβλητότητα. Μόλις καταγραφεί μια πληροφορία ή συναλλαγή, δεν μπορεί να τροποποιηθεί ή να διαγραφεί. Αυτό διασφαλίζει την ακρίβεια και την αξιοπιστία των δεδομένων και ενισχύει την πρόληψη της απάτης (Treiblmaier, 2019).

Διαφάνεια (Transparency)

Η blockchain προσφέρει υψηλή διαφάνεια, ιδιαίτερα στα δημόσια δίκτυα. Όλες οι συναλλαγές είναι διαθέσιμες προς προβολή από όλους τους συμμετέχοντες, γεγονός που ενισχύει την εμπιστοσύνη και την λογοδοσία. Ακόμη και σε ιδιωτικές ή αδειοδοτημένες blockchain, η διαφάνεια διατηρείται μέσω ελεγχόμενης πρόσβασης, αλλά παραμένει καταγεγραμμένη (Laroiya et al., 2020).

Ασφάλεια και Κρυπτογράφηση (Security)

Η κρυπτογράφηση αποτελεί θεμελιώδη παράγοντα στην ασφάλεια. Η τεχνολογία χρησιμοποιεί ισχυρές μεθόδους κρυπτογράφησης, όπως κρυπτογραφικούς κατακερματισμούς (hashes), καθιστώντας τα δεδομένα εξαιρετικά δύσκολα στην αλλοίωσή τους ή ακόμα και στην παραβίαση τους. Αυτό μετατρέπει την blockchain ένα ιδιαίτερα ασφαλές περιβάλλον για την αποθήκευση και διαχείριση ευαίσθητων πληροφοριών (Androulaki et al., 2018).

Μηχανισμοί Συναίνεσης (Consensus Mechanisms)

Οι μηχανισμοί συναίνεσης διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διατήρηση της ακεραιότητας και της ασφάλειας των δικτύων blockchain, όπως θα δούμε αναλυτικότερα στην Ενότητα 2.2.5. Μηχανισμοί/αλγόριθμοι, όπως η απόδειξη εργασίας (Proof of Work) και η απόδειξη συμμετοχής (Proof of Stake), διασφαλίζουν την συμφωνία μεταξύ των συμμετεχόντων κόμβων για το ποιες συναλλαγές είναι έγκυρες. Αυτή η διαδικασία ενισχύει την διαφάνεια και αποτρέπει την αυθαίρετη τροποποίηση των δεδομένων (Treiblmaier, 2019).

Κατανεμημένο Βιβλίο (Distributed Ledger)

Η blockchain λειτουργεί ως ένα κατανεμημένο σύστημα καταγραφής (distributed ledger). Κάθε φορά που μια συναλλαγή καταγράφεται και επιβεβαιώνεται, το πλήρες αντίγραφο της αλυσίδας μπλοκ αποθηκεύεται και διατηρείται σε πολυάριθμους κόμβους του δικτύου. Αυτή η διαδικασία αυξάνει σημαντικά την ανθεκτικότητα του συστήματος έναντι απειλών στον κυβερνοχώρο και μειώνει τον κίνδυνο αποτυχίας λόγω βλάβης ή επίθεσης σε μεμονωμένο κόμβο (Kaur et al., 2021).

Έξυπνα Συμβόλαια (Smart Contracts)

Τα έξυπνα συμβόλαια είναι προγραμματιζόμενες συμφωνίες που εκτελούνται αυτόματα όταν πληρούνται προκαθορισμένοι όροι, μειώνοντας την ανάγκη για ανθρώπινη παρέμβαση. Επιπλέον, επιταχύνουν τις διαδικασίες και ελαχιστοποιούν τα σφάλματα (White et al., 2020).

2.2.3.2 Πλεονεκτήματα

Πέρα από τα χαρακτηριστικά που την διακρίνουν, η τεχνολογία blockchain προσφέρει ουσιαστικά πλεονεκτήματα, τα οποία ενισχύουν ακόμη περισσότερο την υιοθέτηση της καθώς την κάνουν ιδιαίτερα ελκυστική με ποικίλους τρόπους. Ενδεικτικά αναφέρονται τα εξής κύρια πλεονεκτήματα της τεχνολογίας αυτής:

Μείωση Κόστους Συναλλαγών

Η blockchain επιτρέπει την διεκπεραίωση συναλλαγών χωρίς την εξάρτηση από ενδιάμεσους φορείς, όπως τράπεζες, νομικά πρόσωπα και ελεγκτές. Με την αφαίρεση τρίτων μερών, το κόστος των συναλλαγών αλλά και των διαδικασιών μειώνεται σε μεγάλο βαθμό (Chauhan et al., 2018).

Αύξηση Ταχύτητας και Αποτελεσματικότητας

Καθώς η αρχιτεκτονική της blockchain επιτρέπει τη συνεχή λειτουργία της σε 24ωρη βάση, η διεκπεραίωση των συναλλαγών εκτελείται ταχύτατα, εντός ελάχιστων λεπτών ή ακόμη και δευτερολέπτων. Σε αντίθεση με τα παραδοσιακά τραπεζικά συστήματα όπου μια διαδικασία συναλλαγής θα μπορούσε να διαρκέσει ίσως και μέρες (ανάλογα με τον τύπο και τον χρόνο υποβολής) φέροντας καθυστερήσεις, η blockchain προσφέρει μια αποτελεσματική λύση, μειώνοντας σημαντικά τους χρόνους εκτέλεσης, ενώ παράλληλα ενισχύει την αποδοτικότητα των διαδικασιών (Chauhan et al., 2018).

Ευρύτερη Πρόσβαση σε Χρηματοπιστωτικές Υπηρεσίες

Μέσω της αποκεντρωμένης χρηματοδότησης (Decentralised Funding, DeFi), η blockchain διευκολύνει την ευρύτερη πρόσβαση σε χρηματοπιστωτικές υπηρεσίες. Οι πλατφόρμες DeFi επιτρέπουν σε άτομα και σε περιοχές με χαμηλή τραπεζική κάλυψη να έχουν πρόσβαση σε χρηματοπιστωτικές υπηρεσίες χωρίς την ανάγκη για παραδοσιακή τραπεζική υποδομή. Με την αξιοποίηση της αλυσίδας μπλοκ, τα άτομα σε απομακρυσμένες ή αναπτυσσόμενες περιοχές μπορούν να συμμετέχουν σε οικονομικές δραστηριότητες, να έχουν πρόσβαση σε δάνεια και να πραγματοποιούν ασφαλείς συναλλαγές με μεγαλύτερη ευκολία (Dos Santos et al., 2022).

Πολλαπλοί Τομείς Εφαρμογών

Καθώς οι βιομηχανίες διερευνούν ολοένα και περισσότερο τις δυνατότητες της blockchain, η τεχνολογία αυτή φέρνει την επανάσταση της με την εφαρμογή της σε ένα ευρύ φάσμα τομέων πέρα από τις χρηματοοικονομικές συναλλαγές. Ενδεικτικά πεδία αξιοποίησης αποτελούν η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, οι χρηματοπιστωτικές υπηρεσίες, η επαλήθευση ψηφιακής ταυτότητας, η δημόσια διοίκηση, η ψηφιακή υγεία και άλλοι κρίσιμοι κλάδοι. Η πολυμορφία αυτή αποτελεί ιδιαίτερο πλεονέκτημα, διαμορφώνοντας την έτσι σε ένα πολύτιμο εργαλείο για επιχειρήσεις και οργανισμούς (Guo & Yu, 2022).

Παρά τα πολυάριθμα πλεονεκτήματά της όμως, η blockchain εξακολουθεί να αντιμετωπίζει προκλήσεις, όπως ζητήματα κλιμακωσιμότητας, κανονιστικές αβεβαιότητες και υψηλό αρχικό κόστος εφαρμογής. Ωστόσο, οι συνεχιζόμενες εξελίξεις στην τεχνολογία, όπως οι λύσεις κλιμάκωσης επιπέδου 2 (Layer 2 scaling solutions) που επιτρέπουν γρηγορότερες και φθηνότερες συναλλαγές — για παράδειγμα, το Lightning Network²⁴ για το Bitcoin ή το Arbitrum²⁵ για το Ethereum²⁶ — τα υβριδικά μοντέλα blockchain που συνδυάζουν στοιχεία ιδιωτικών και δημοσίων blockchain και οι εξελισσόμενοι κανονισμοί που προσφέρουν νομική σαφήνεια, αναμένεται να ενισχύσουν σημαντικά την αποδοχή και υιοθέτηση της από την αγορά (Chauhan et al., 2018).

²⁴ [Lightning Network](#)

²⁵ [Arbitrum](#)

²⁶ [Ethereum Network](#)

2.2.4 Είδη Blockchain

Τα δίκτυα blockchain κατηγοριοποιούνται βάσει της προσβασιμότητας, της διακυβέρνησης και των μηχανισμών ελέγχου τους. Οι τέσσερις βασικοί τύποι είναι οι δημόσιες, οι ιδιωτικές, οι κοινοπρακτικές και οι υβριδικές blockchain (Cagigas et al., 2021).

Οι δημόσιες (public) blockchain είναι πλήρως αποκεντρωμένες και ανοιχτές σε οποιονδήποτε επιθυμεί να συμμετάσχει. Χαρακτηρίζονται από υψηλή διαφάνεια και ασφάλεια, καθώς οι συναλλαγές επαληθεύονται μέσω μηχανισμών συναίνεσης, όπως η απόδειξη εργασίας (PoW) ή η απόδειξη συμμετοχής (PoS) (Ramadoss, 2022). Χαρακτηριστικά παραδείγματα δημόσιων δικτύων αποτελούν το Bitcoin και το Ethereum. Η ανοιχτή φύση τους τις καθιστά ιδανικές για την ανάπτυξη αποκεντρωμένων εφαρμογών (DApps) και κρυπτονομισμάτων, ενώ ταυτόχρονα προσφέρουν ισχυρή ανθεκτικότητα στη λογοκρισία και πολύ υψηλό επίπεδο ασφάλειας μέσω της δημόσιας επαλήθευσης. Ωστόσο, μειονεκτούν ως προς την κλιμακωσιμότητα και την απόδοση, παρουσιάζοντας περιορισμένο αριθμό συναλλαγών ανά δευτερόλεπτο. Επίσης, σε περιπτώσεις που βασίζονται στο PoW, απαιτούνται μεγάλα ποσά ενέργειας λόγω των υψηλών υπολογιστικών απαιτήσεων, ενώ δεν προσφέρουν στις επιχειρήσεις επαρκή έλεγχο σε ζητήματα ιδιωτικότητας ή κανονιστικής συμμόρφωσης (Paul et al., 2021).

Αντίθετα, οι ιδιωτικές (private) blockchain λειτουργούν με περιορισμένη πρόσβαση και ελέγχονται από μία μόνο οντότητα. Απαιτείται άδεια συμμετοχής (permissioned blockchain), γεγονός που τις καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλες για επιχειρηματικά περιβάλλοντα όπου η απόδοση, η ταχύτητα και η ιδιωτικότητα αποτελούν προτεραιότητες. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα εφαρμογής ιδιωτικού blockchain αποτελεί η χρήση του Hyperledger Fabric²⁷ για τον σχεδιασμό εξωτερικής επένδυσης πολυκατοικιών στην Αυστραλία, το οποίο αναπτύχθηκε για την ασφαλή συνεργασία των εμπλεκομένων. Σε αυτά τα συστήματα, η διαχείριση των δεδομένων γίνεται με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα, ενώ επιτρέπεται καλύτερος έλεγχος πρόσβασης και ευκολότερη συμμόρφωση με ρυθμιστικά πλαίσια. Χρησιμοποιούνται συχνά για εσωτερικές λειτουργίες (σε έναν οργανισμό), όπως η διαχείριση αποθεμάτων ή η επαλήθευση ταυτότητας. Παρόλα αυτά, υστερούν σε διαφάνεια λόγω της κεντρικής διακυβέρνησης, γεγονός που μειώνει τον βαθμό αποκέντρωσης και τις καθιστά πιο ευάλωτες σε εσωτερικές παραβιάσεις σε σύγκριση με τις δημόσιες blockchain (Yang et al., 2020).

Ένα ενδιάμεσο μοντέλο αποτελούν οι κοινοπρακτικές (consortium) blockchain, στις οποίες πολλαπλοί οργανισμοί μοιράζονται τη διαχείριση του blockchain δικτύου. Πρόκειται για συστήματα που βασίζονται στη συνεργασία μεταξύ φορέων με κοινά συμφέροντα και λειτουργίες, όπως τραπεζικά ιδρύματα ή πάροχοι υπηρεσιών υγείας (Liu et al., 2023). Ένα παράδειγμα κοινοπρακτικού blockchain αποτελεί η πλατφόρμα R3CEV²⁸, η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για την συνεργασία μεταξύ επιχειρήσεων όπου συμμετέχουν μόνο επιλεγμένοι κόμβοι. Οι κοινοπρακτικές blockchain συνδυάζουν την αξιοπιστία της αμοιβαίας εμπιστοσύνης με την αποτελεσματικότητα στη λειτουργία και την καλή κλιμακωσιμότητα. Ενισχύουν τη διαφάνεια μεταξύ των μελών, χωρίς να απαιτείται κεντρικός μεσολαβητής,

²⁷ Hyperledger Fabric

²⁸ R3CEV ή αλλιώς R3 (νέας έκδοσης), είναι η εταιρεία που δημιούργησε το Corda, ένα κοινοπρακτικό blockchain για εταιρικές εφαρμογές.

μειώνοντας έτσι το κόστος συντονισμού και αυξάνοντας την ασφάλεια. Ωστόσο, η πρόσβαση παραμένει περιορισμένη, ενώ η διακυβέρνηση μπορεί να καταστεί σύνθετη λόγω της ανάγκης συμφωνίας μεταξύ διαφορετικών οργανισμών. Η αποτελεσματικότητα του συστήματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τον βαθμό εμπιστοσύνης και συνεργασίας μεταξύ των συμμετεχόντων (Khettry et al., 2021).

Οι υβριδικές (hybrid) blockchain συνδυάζουν στοιχεία από τις δημόσιες και τις ιδιωτικές εκδοχές, επιτρέποντας την επιλεκτική αποκάλυψη ή απόκρυψη πληροφοριών. Αυτό τις καθιστά εξαιρετικά ευέλικτες για επιχειρησιακά περιβάλλοντα στα οποία απαιτείται ταυτόχρονα διαφάνεια προς το κοινό και προστασία ευαίσθητων δεδομένων. Σε τέτοια δίκτυα, οι επιχειρήσεις έχουν τη δυνατότητα να ορίζουν ποια δεδομένα παραμένουν ιδιωτικά και ποια γίνονται προσβάσιμα στο ευρύ κοινό, επιτυγχάνοντας έναν συνδυασμό ασφάλειας, διαφάνειας και επιχειρησιακής ευχρηστίας. Ένα παράδειγμα υβριδικής blockchain είναι η Dragonchain²⁹, η οποία επιτρέπει στις επιχειρήσεις να ελέγχουν την πρόσβαση στα δεδομένα, ενώ παράλληλα επωφελούνται από την αμετάβλητη φύση της blockchain. Παρ' όλα αυτά, η υλοποίηση τέτοιων λύσεων είναι τεχνικά πιο σύνθετη και απαιτεί υψηλότερη επένδυση τόσο σε πόρους όσο και σε σχεδιασμό, ιδιαίτερα όσον αφορά τη διαχείριση των δικαιωμάτων πρόσβασης και της διακυβέρνησης. (Paul et al., 2021).

Σε μια συγκριτική θεώρηση, οι δημόσιες blockchain προσφέρουν το υψηλότερο επίπεδο ασφάλειας και αμετάβλητης καταγραφής μέσω ανοιχτής συμμετοχής, αλλά ενδέχεται να υστερούν σε απόδοση και ενεργειακή αποδοτικότητα. Από την άλλη πλευρά, οι ιδιωτικές και κοινοπρακτικές blockchain επιτυγχάνουν καλύτερη ταχύτητα, έλεγχο και δυνατότητα συμμόρφωσης, αν και παρουσιάζουν μεγαλύτερους κινδύνους σε θέματα αποκέντρωσης και ανθεκτικότητας στην παραποίηση. Ενώ οι υβριδικές blockchain επιχειρούν να γεφυρώσουν αυτά τα άκρα, συνδυάζοντας τα πλεονεκτήματα και των δύο κόσμων, με το τίμημα της αυξημένης τεχνικής πολυπλοκότητας (Paul et al., 2021).

2.2.5 Αλγόριθμοι Συναίνεσης

Οι αλγόριθμοι συναίνεσης είναι θεμελιώδεις για την τεχνολογία blockchain, διασφαλίζοντας ότι όλες οι συναλλαγές που καταγράφονται στο κατακευκτικό λογιστικό βιβλίο είναι έγκυρες και συμφωνημένες από όλους τους συμμετέχοντες κόμβους (Xiong et al., 2022). Δεδομένου ότι η blockchain λειτουργεί με αποκεντρωμένο τρόπο, οι μηχανισμοί συναίνεσης αντικαθιστούν την ανάγκη για μια κεντρική αρχή, αποτρέποντας τις κακόβουλες δραστηριότητες, τις διπλές δαπάνες και τη χειραγώγηση των δεδομένων. Υπάρχουν διάφοροι αλγόριθμοι συναίνεσης, καθένας από τους οποίους έχει σχεδιαστεί για να εξισορροπεί την ασφάλεια, την αποτελεσματικότητα και την αποκέντρωση με βάση τις συγκεκριμένες ανάγκες ενός δικτύου blockchain (Bamakan et al., 2020).

Ο αλγόριθμος απόδειξης εργασίας (PoW) είναι ένας από τους πρώτους και πιο ευρέως αναγνωρισμένους μηχανισμούς συναίνεσης, ο οποίος εισήχθη αρχικά στο Bitcoin από τον Satoshi Nakamoto. Στον PoW, ορισμένοι από τους συμμετέχοντες στο δίκτυο, γνωστοί ως ανθρακωρύχοι (miners), ανταγωνίζονται στην επίλυση σύνθετων μαθηματικών γρίφων για την επικύρωση συναλλαγών καθώς και την προσθήκη νέων μπλοκ στην αλυσίδα (Sapra et al.,

²⁹ Dragonchain, (2019)

2023). Ο πρώτος ανθρακωρύχος που λύνει τον γρίφο κερδίζει το δικαίωμα να προσθέσει το νέο μπλοκ και να λάβει μια ανταμοιβή μπλοκ με τη μορφή κρυπτονομίσματος. Αυτή η διαδικασία απαιτεί σημαντική υπολογιστική ισχύ, καθιστώντας την ιδιαίτερα ασφαλή αλλά και εξαιρετικά απαιτητική σε πόρους. Ταυτόχρονα περιορίζει την κλιμακωσιμότητα των blockchain συστημάτων που την υιοθετούν, λόγω της χαμηλής ταχύτητας συναλλαγών αλλά και της υψηλής ενεργειακής απαίτησης (Schinckus, 2021).

Ο αλγόριθμος απόδειξης συμμετοχής (PoS) εισήχθη ως μια ενεργειακά αποδοτική εναλλακτική λύση σε σχέση με τον PoW. Στον PoS, οι επικυρωτές επιλέγονται για τη δημιουργία νέων block με βάση τον αριθμό των tokens που κατέχουν και είναι πρόθυμοι να «ποντάρουν» ως εγγύηση. Αντί για την επίλυση πολύπλοκων γρίφων, οι επικυρωτές επιλέγονται ντετερμινιστικά, με το υψηλότερο ποντάρισμα να αυξάνει την πιθανότητα επιλογής (Wendl et al., 2023). Η προσέγγιση αυτή μειώνει σημαντικά την κατανάλωση ενέργειας, διατηρώντας παράλληλα την ασφάλεια του δικτύου. Το PoS αποθαρρύνει την κακόβουλη συμπεριφορά επιβάλλοντας ποινές, όπως η απώλεια των μαρκών που έχουν στοιχηματιστεί, εφόσον ένας επικυρωτής επιχειρήσει ύπουλες δραστηριότητες. Πολλά σύγχρονα δίκτυα blockchain, συμπεριλαμβανομένων των Ethereum 2.0, Cardano³⁰ και Solana³¹, έχουν υιοθετήσει τον PoS λόγω της βελτιωμένης κλιμάκωσης και βιωσιμότητάς του (Saad et al., 2022).

Ο αλγόριθμος Delegated Proof of Stake (DPoS) αποτελεί μια παραλλαγή του παραδοσιακού PoS, σχεδιασμένη να βελτιώσει την αποδοτικότητα και την ταχύτητα των συναλλαγών. Σε αντίθεση με τον απλό PoS, όπου οποιοσδήποτε κάτοχος token μπορεί να επιλεγεί ως επικυρωτής με βάση το μέγεθος και τη διάρκεια κατοχής των token του, ο DPoS εισάγει έναν μηχανισμό αντιπροσώπευσης (delegation). Οι κάτοχοι των token ψηφίζουν για να εκλέξουν έναν περιορισμένο αριθμό αντιπροσώπων (delegates ή witnesses), οι οποίοι είναι υπεύθυνοι για την επικύρωση των συναλλαγών και την παραγωγή νέων μπλοκ. Αυτοί οι αντιπρόσωποι λειτουργούν με διαφάνεια και υπό συνεχή αξιολόγηση. Εάν κάποιος ενεργήσει κακόβουλα ή δεν εκτελεί σωστά τα καθήκοντά του, μπορεί να καταψηφιστεί και να αντικατασταθεί από άλλον υποψήφιο, διατηρώντας έτσι ένα επίπεδο λογοδοσίας (Shifferaw & Lemma, 2021).

Συγκριτικά με τον PoS, ο DPoS προσφέρει μεγαλύτερη ταχύτητα επεξεργασίας συναλλαγών και βελτιωμένη ενεργειακή αποδοτικότητα, καθώς μειώνεται ο αριθμός των κόμβων που συμμετέχουν άμεσα στη διαδικασία συναίνεσης. Ωστόσο, αυτή η συγκέντρωση εξουσίας σε λίγους αντιπροσώπους μπορεί να περιορίσει την αποκέντρωση σε σχέση με τον κλασικό PoS, όπου η συμμετοχή είναι πιο άμεση και κατανομημένη. Δίκτυα όπως το EOS³² και το TRON³³ χρησιμοποιούν DPoS προκειμένου να πετύχουν μεγαλύτερη ταχύτητα και αποδοτικότητα στη διαδικασία επικύρωσης συναλλαγών. Παρόλα αυτά, ο DPoS θεωρείται μια πρακτική λύση για εφαρμογές που απαιτούν υψηλό ρυθμό συναλλαγών, όπως πολλές εφαρμογές blockchain στην εφοδιαστική αλυσίδα, διατηρώντας μια ισορροπία μεταξύ απόδοσης και εμπιστοσύνης (Saad et al., 2022).

³⁰ [Cardano Network](#)

³¹ [Solana Network](#)

³² [EOS Network](#)

³³ [TRON Network](#)

Ο Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT) είναι ένας μηχανισμός συναίνεσης που έχει σχεδιαστεί για να ανέχεται τα σφάλματα τύπου Byzantine, δηλαδή μπορεί να φτάσει σε συμφωνία ακόμη και αν ορισμένοι κόμβοι συμπεριφέρονται κακόβουλα ή αποτυγχάνουν. Ο PBFT περιλαμβάνει μια σειρά γύρων επικοινωνίας μεταξύ των κόμβων για την επίτευξη συναίνεσης. Χρησιμοποιείται συνήθως σε δίκτυα blockchain με άδεια (permissioned blockchain), όπως το Hyperledger Fabric, όπου η εμπιστοσύνη μεταξύ των συμμετεχόντων είναι υψηλότερη και η αποτελεσματικότητα έχει προτεραιότητα έναντι της αποκέντρωσης (Qi & Guan, 2022).

Κάθε αλγόριθμος συναίνεσης εξυπηρετεί διαφορετικές περιπτώσεις χρήσης blockchain, εξισορροπώντας την ασφάλεια, την αποδοτικότητα και την αποκέντρωση. Ενώ ο PoW παραμένει ένα ισχυρό μοντέλο ασφαλούς συναίνεσης, ο PoS και οι παραλλαγές του παρέχουν κλιμακούμενες και βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις για σύγχρονα δίκτυα και εφαρμογές blockchain (Zhong et al., 2023).

2.2.6 Έξυπνα Συμβόλαια

Τα έξυπνα συμβόλαια είναι αυτοεκτελούμενα συμβόλαια ενσωματωμένα σε δίκτυα blockchain, σχεδιασμένα να εκτελούν αυτόματα ενέργειες όταν πληρούνται προκαθορισμένες συνθήκες. Αυτά τα συμβόλαια λειτουργούν χωρίς την ανάγκη διαμεσολαβητών, εξασφαλίζοντας διαφάνεια, αποτελεσματικότητα και ασφάλεια στις συναλλαγές. Παρουσιάστηκαν από τον Nick Szabo τη δεκαετία του 1990 και έγιναν ευρέως γνωστά με την έλευση του Ethereum, το οποίο παρείχε μια πλατφόρμα βασισμένη στην blockchain για την εκτέλεσή τους (Khan et al., 2021).

Τα έξυπνα συμβόλαια είναι προγράμματα που αποθηκεύονται και εκτελούνται στο δίκτυο blockchain. Περιλαμβάνουν τους όρους μιας σύμβασης/συμβολαίου σε μορφή κώδικα και ενεργοποιούνται αυτόματα όταν πληρούνται προκαθορισμένες προϋποθέσεις. Συνήθως, απαιτείται ένα γεγονός από τον "πραγματικό κόσμο", το οποίο παρέχεται στη blockchain μέσω ειδικών υπηρεσιών, γνωστών ως oracles³⁴. Για παράδειγμα, σε μια εφοδιαστική αλυσίδα, μόλις ένας oracle επιβεβαιώσει την παράδοση ενός φορτίου, το έξυπνο συμβόλαιο μπορεί αυτόματα να αποδεσμεύσει την πληρωμή προς τον προμηθευτή. Αυτό εξαλείφει την ανάγκη για επαλήθευση από τρίτους, μειώνοντας με αυτό το τρόπο το κόστος και τις καθυστερήσεις (Singh et al., 2020).

Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα των έξυπνων συμβολαίων είναι η αμεταβλητότητά τους. Δεδομένου ότι αναπτύσσονται σε μια blockchain, δεν μπορούν να τροποποιηθούν ή να αλλοιωθούν, διασφαλίζοντας την εμπιστοσύνη μεταξύ των μερών. Επιπλέον, ενισχύουν την ασφάλεια με τη χρήση κρυπτογραφικών τεχνικών για την πρόληψη της απάτης. Ωστόσο, τα έξυπνα συμβόλαια έχουν επίσης προκλήσεις, συμπεριλαμβανομένων ευπαθειών στην κωδικοποίησή τους που μπορούν να αξιοποιηθούν από χάκερ/επιτιθέμενους (Balcerzak et al., 2022).

³⁴ **Oracles:** Είναι μια υπηρεσία που παρέχει εξωτερικά δεδομένα σε ένα blockchain ή ένα έξυπνο συμβόλαιο. Πρακτικά λειτουργούν ως "γέφυρες" μεταξύ της blockchain και του εξωτερικού κόσμου, επιτρέποντας στα έξυπνα συμβόλαια να εκτελούνται βάση πραγματικών γεγονότων.

2.2.7 Εφαρμογές της Blockchain

Η τεχνολογία blockchain έχει φέρει επανάσταση σε πολλούς κλάδους, ενισχύοντας την ασφάλεια, τη διαφάνεια και την αποτελεσματικότητα. Ορισμένες από τις σημαντικότερες εφαρμογές της blockchain περιλαμβάνουν τη διαχείριση της αλυσίδας εφοδιασμού, τη χρηματοδότηση, την υγειονομική περίθαλψη, την ακίνητη περιουσία και την επαλήθευση της ψηφιακής ταυτότητας (Chen et al., 2022).

Η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας είναι ένας από τους πιο επιδραστικούς τομείς στους οποίους εφαρμόζεται η τεχνολογία blockchain. Οι παραδοσιακές αλυσίδες εφοδιασμού υποφέρουν από αναποτελεσματικότητα, απάτη και έλλειψη ιχνηλασιμότητας. Η blockchain διευκολύνει την ορατότητα από άκρο σε άκρο, επιτρέποντας στις εταιρείες να παρακολουθούν τα προϊόντα σε πραγματικό χρόνο από τον κατασκευαστή έως τον καταναλωτή (Ratta et al., 2021). Για παράδειγμα, η Walmart χρησιμοποιεί blockchain για να εντοπίζει την προέλευση των προϊόντων διατροφής, διασφαλίζοντας την ασφάλεια των τροφίμων και αποτρέποντας τη μόλυνση. Ομοίως, οι φαρμακευτικές εταιρείες αξιοποιούν την blockchain για την καταπολέμηση των πλαστών φαρμάκων, επαληθεύοντας την αυθεντικότητα των φαρμάκων (Singh & Vishwakarma, 2023).

Τα χρηματοοικονομικά και οι τράπεζες έχουν σημειώσει σημαντικές εξελίξεις με τη blockchain. Οι εφαρμογές αποκεντρωμένης χρηματοδότησης (DeFi) χρησιμοποιούν την blockchain για την παροχή χρηματοπιστωτικών υπηρεσιών χωρίς μεσάζοντες, επιτρέποντας στους χρήστες να έχουν πρόσβαση σε δάνεια, λογαριασμούς ταμιευτηρίου και ασφάλιση μέσω έξυπνων συμβολαίων. Τα κρυπτονομίσματα, όπως το Bitcoin και το Ethereum, προσφέρουν μια εναλλακτική λύση στα παραδοσιακά τραπεζικά συστήματα, επιτρέποντας ασφαλείς και χωρίς σύνορα συναλλαγές. Οι κεντρικές τράπεζες διαθέτουν επίσης τα ψηφιακά νομίσματα κεντρικών τραπεζών (Central Bank Digital Currencies, CBDCs), τα οποία χρησιμοποιούν blockchain για ασφαλείς και αποτελεσματικές νομισματικές συναλλαγές (Dashkevich et al., 2020).

Η υγειονομική περίθαλψη επωφελείται από την blockchain εξασφαλίζοντας την ασφαλή και αμετάβλητη αποθήκευση των ιατρικών αρχείων. Οι ασθενείς μπορούν να ελέγχουν την πρόσβαση στα δεδομένα υγείας τους, μειώνοντας τον διοικητικό φόρτο και βελτιώνοντας την ιδιωτικότητα. Η blockchain ενισχύει επίσης την αποτελεσματικότητα των κλινικών δοκιμών, παρέχοντας διαφανή και απαραβίαστα αρχεία των δεδομένων των ασθενών και των διαδικασιών ανάπτυξης φαρμάκων (Bazel et al., 2021).

Οι συναλλαγές ακινήτων είναι συχνά αργές και απαιτούν εκτεταμένη γραφειοκρατία. Η blockchain απλοποιεί την αγορά και την πώληση ακινήτων, μέσω έξυπνων συμβολαίων, τα οποία αυτοματοποιούν τις συναλλαγές και διασφαλίζουν ότι αυτά θα εκτελεστούν μόλις ολοκληρωθούν οι νομικές και οικονομικές προϋποθέσεις (Fauziah et al., 2020). Αυτό μειώνει την απάτη και επιταχύνει τη διαδικασία. Επιπλέον, παρέχει διαφανή αρχεία ιδιοκτησίας, αποτρέποντας τις διαφωνίες σχετικά με τους τίτλους ιδιοκτησίας (Avantaggiato & Gallo, 2019).

Η ψηφιακή επαλήθευση ταυτότητας είναι ένας άλλος τομέας όπου η blockchain διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο. Τα παραδοσιακά συστήματα ταυτότητας είναι ευάλωτα σε παραβιάσεις δεδομένων και κλοπή ταυτότητας. Αντιθέτως, η χρήση της blockchain προσφέρει ένα αποκεντρωμένο σύστημα ταυτότητας όπου οι χρήστες έχουν τον πλήρη έλεγχο των

προσωπικών τους πληροφοριών. Οι κυβερνήσεις και οι επιχειρήσεις υιοθετούν λύσεις ταυτότητας που βασίζονται στην blockchain για να ενισχύσουν την ασφάλεια και να εξορθολογήσουν τις διαδικασίες πιστοποίησης ταυτότητας (Almadani et al., 2023).

Πέρα από αυτούς τους κλάδους, η blockchain μετασχηματίζει επίσης τομείς, όπως τα συστήματα ψηφοφορίας, η προστασία της πνευματικής ιδιοκτησίας και η ψυχαγωγία. Στα συστήματα ψηφοφορίας, η blockchain ενισχύει την ασφάλεια των εκλογών, αποτρέποντας την απάτη και εξασφαλίζοντας διαφανή καταμέτρηση των ψήφων. Αρκετές κυβερνήσεις και οργανισμοί διερευνούν την ψηφοφορία με βάση τη blockchain για τη βελτίωση της ακεραιότητας των εκλογών. Στην προστασία της πνευματικής ιδιοκτησίας, η blockchain διασφαλίζει τα πνευματικά δικαιώματα και τα διπλώματα ευρεσιτεχνίας παρέχοντας αμετάβλητη απόδειξη της ιδιοκτησίας. Οι καλλιτέχνες και οι δημιουργοί περιεχομένου μπορούν να χρησιμοποιήσουν τη blockchain για να προστατεύσουν το έργο τους και να λάβουν δίκαιη αποζημίωση. Στον τομέα της ψυχαγωγίας, η blockchain επιτρέπει τη δίκαιη κατανομή των εσόδων στη μουσική και την κινηματογραφική βιομηχανία με τη χρήση έξυπνων συμβολαίων για την αυτοματοποίηση των πληρωμών δικαιωμάτων (Makridakis & Christodoulou, 2019).

Καθώς οι δυνατότητες της blockchain συνεχίζουν να αυξάνονται, τείνουν να εμφανίζονται και νέες εφαρμογές της. Με την αυξανόμενη υιοθέτηση της σε όλους τους κλάδους, πρόκειται να φέρει επανάσταση στα παραδοσιακά συστήματα και να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα, την ασφάλεια και τη διαφάνεια σε διάφορους τομείς (Bonnet & Teuteberg, 2022).

3ο Κεφάλαιο – Μεθοδολογία Συστηματικής Ανασκόπησης

Η μεθοδολογία που ακολουθήθηκε στην παρούσα βιβλιογραφική ανασκόπηση βασίζεται στις διεθνώς αναγνωρισμένες κατευθυντήριες γραμμές για τις Συστηματικές Ανασκοπήσεις (Systematic Literature Reviews, SLRs), όπως έχουν διατυπωθεί από τους Kitchenham et al. (2009)³⁵. Η προσέγγιση αυτή περιλαμβάνει διαδοχικά στάδια: τον καθορισμό ερευνητικών ερωτημάτων, τον σχεδιασμό και εφαρμογή της αναζήτησης, τον καθορισμό των κριτηρίων ένταξης και αποκλεισμού, την αξιολόγηση της ποιότητας των ερευνών, τη συλλογή και ανάλυση των δεδομένων και, τέλος, τη σύνθεση των ευρημάτων. Ακολουθώντας αυτήν την αλληλουχία σταδίων, διασφαλίζεται ότι η ανασκόπηση είναι διαφανής και επιστημονικά τεκμηριωμένη, παρέχοντας με αυτό το τρόπο μια αξιόπιστη βάση για την απάντηση των ερευνητικών ερωτημάτων της παρούσας μελέτης. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι ενέργειες που πραγματοποιήθηκαν και τα αποτελέσματα που παρήχθησαν στα 4 πρώτα στάδια της μεθοδολογίας ανασκόπησης.

3.1 Καθορισμός Ερευνητικών Ερωτημάτων

Ο πρωταρχικός στόχος της παρούσας μελέτης είναι να διερευνήσει την υιοθέτηση, τα οφέλη και τις προκλήσεις της χρήσης της τεχνολογίας blockchain στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας. Η έρευνα αποσκοπεί στην αξιολόγηση του τρόπου με τον οποίο η blockchain ενισχύει τη διαφάνεια, την ιχνηλασιμότητα και την ασφάλεια στις αλυσίδες εφοδιασμού, ενώ παράλληλα εντοπίζει τα βασικά εμπόδια για την ευρεία υιοθέτησή της. Για την επίτευξη αυτών των στόχων, η μελέτη θα εξετάσει τα ακόλουθα βασικά ερευνητικά ερωτήματα:

1. Ερευνητική Ερώτηση:

Πως εφαρμόζεται η τεχνολογία blockchain στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας;

Απάντηση:

Το άνωθεν ερώτημα, εξετάζεται κυρίως στο Κεφάλαιο 4, όπου αναλύονται οι τρόποι εφαρμογής της blockchain στην διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, μέσω παραδειγμάτων χρήσης και αξιολόγησης έργων. Παράλληλα, οι τεχνικές αρχές της τεχνολογίας, όπως η δομή της, κ.α., που βοηθούν στην ενίσχυση της λειτουργίας της SCM παρουσιάζονται στο Κεφάλαιο 2, το οποίο παρέχει το απαραίτητο θεωρητικό υπόβαθρο.

2. Ερευνητική Ερώτηση:

Ποια είναι τα κύρια οφέλη από την ενσωμάτωση της blockchain, όπως η ενίσχυση της διαφάνειας, της ιχνηλασιμότητας και της ασφάλειας;

³⁵ Kitchenham et al. (2009)

Απάντηση

Το ερώτημα αυτό απαντάται στα Κεφάλαια 2 και 4, με έμφαση στην παρουσίαση των πλεονεκτημάτων που προσφέρει η τεχνολογία blockchain στις λειτουργίες των εφοδιαστικών αλυσίδων.

3. Ερευνητική Ερώτηση:

Ποια είναι τα βασικά εμπόδια και προκλήσεις για την ευρεία υιοθέτηση της blockchain στις αλυσίδες εφοδιασμού;

Απάντηση

Το τρίτο ερώτημα αναλύεται εκτενώς στο Κεφάλαιο 5, το οποίο εστιάζει στις τεχνικές, οικονομικές και ρυθμιστικές δυσκολίες που εμποδίζουν την υιοθέτηση της τεχνολογίας blockchain σε μεγάλη κλίμακα, όπως αυτό απαιτείται σε περιβάλλοντα εφοδιαστικών αλυσίδων.

Μέσω αυτών των ερωτημάτων, η εργασία επιχειρεί να κατανοήσει τόσο τις στρατηγικές χρήσης όσο και τον αντίκτυπο της blockchain στη σύγχρονη εφοδιαστική αλυσίδα.

3.2 Αναζήτηση Άρθρων

Η διαδικασία αναζήτησης επιστημονικών άρθρων πραγματοποιήθηκε με στόχο την ανεύρεση έγκυρων και πρόσφατων δημοσιεύσεων που αφορούν την εφαρμογή της blockchain στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας. Αξιοποιήθηκαν τρεις βασικές επιστημονικές/βιβλιογραφικές βάσεις δεδομένων: Scopus, Web of Science και Google Scholar. Η επιλογή αυτών των πηγών/βάσεων βασίστηκε στην εκτενή κάλυψη που παρέχουν σε θέματα τεχνολογίας, καινοτομίας, διοίκησης επιχειρήσεων και εφοδιαστικής αλυσίδας, καθώς και στην αξιοπιστία των επιστημονικών αναφορών που ενσωματώνουν.

Για την αναζήτηση σχετικής βιβλιογραφίας χρησιμοποιήθηκε ένας συνδυασμός λέξεων-κλειδιών, οι οποίες αντικατοπτρίζουν τις κύριες έννοιες του θέματος/αντικειμένου υπό διερεύνηση. Συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκαν οι εξής όροι: “blockchain in supply chain”, “blockchain logistics”, “blockchain transparency in SCM”, “blockchain adoption challenges in logistics”, και “blockchain implementation supply chain management”. Οι όροι αυτοί χρησιμοποιήθηκαν τόσο αυτόνομα όσο και σε συνδυασμούς με λογικούς τελεστές ακολουθώντας την εξής δομή: “blockchain” AND (όροι σχετικοί με την εφοδιαστική αλυσίδα) AND (όροι σχετικοί είτε με την ιχνηλασιμότητα και την διαφάνεια, είτε με την υιοθέτηση και τις προκλήσεις εφαρμογής). Παρακάτω, παρουσιάζεται ο συνδυασμός αυτός με τους αντίστοιχους όρους:

"blockchain" AND

{

("supply chain" OR "value chain" OR "logistics" OR "procurement" OR
("distribution" AND ("network" OR "chain"))) OR "supply chain management"
OR "SCM")

```

}
AND
{
    ("traceability" OR "transparency" OR "provenance" OR "auditability" OR
    "visibility")
    OR
    ("adoption" OR "integration" OR "embrace" OR "implementation challenges"
    OR "application barriers")
}

```

Εφαρμόζοντας τους προαναφερθέντες συνδυασμούς και αξιοποιώντας λειτουργίες boolean αναζήτησης (AND, OR), επιτεύχθηκε η διερεύνηση του πεδίου των αποτελεσμάτων, χωρίς ωστόσο να χάνεται η συνάφεια και η ακρίβεια με το αντικείμενο της μελέτης.

3.3 Φιλτράρισμα Άρθρων

Αφού ολοκληρώθηκε η αρχική αναζήτηση των άρθρων και εντοπίστηκαν συνολικά 95 σχετικές δημοσιεύσεις, ακολούθησε το στάδιο του φιλτραρίσματος, το οποίο είχε στόχο την επιλογή των πλέον κατάλληλων και επιστημονικά τεκμηριωμένων μελετών για περαιτέρω ανάλυση. Η διαδικασία φιλτραρίσματος πραγματοποιήθηκε με βάση προκαθορισμένα κριτήρια ένταξης και αποκλεισμού, τα οποία διασφάλισαν τη συνάφεια, την ποιότητα και την επικαιρότητα της βιβλιογραφίας. Τα κριτήρια επιλογής των πηγών διαμορφώθηκαν ως εξής:

Κριτήρια Ένταξης:

- Συμπερίληψη άρθρων δημοσιευμένων σε επιστημονικά περιοδικά και συνέδρια με σύστημα αξιολόγησης από ομότιμους (peer-reviewed) καθώς και κεφαλαίων βιβλίων και ολόκληρων βιβλίων. Προτεραιότητα δόθηκε σε άρθρα περιοδικών και συνεδρίων και δευτερευόντως σε κεφάλαια βιβλίων και ολόκληρα βιβλία.
- Επιλογή μελετών γραμμένη στην αγγλική γλώσσα.
- Περίοδος δημοσίευσης: 2017 - 2025, ώστε να ληφθούν υπόψη οι πιο πρόσφατες εξελίξεις στην τεχνολογία blockchain και η δυναμική της ένταξής της στον τομέα της εφοδιαστικής αλυσίδας.
- Για τα άρθρα σε περιοδικά, λήφθηκε υπόψη ο συντελεστής απήχησης (impact factor), ενώ για άρθρα σε συνέδρια οι διεθνείς κατατάξεις (π.χ. CORE Conference Ranking³⁶), ώστε να ενισχυθεί η αξιοπιστία της επιλογής.
- Εστίαση στην πρακτική εφαρμογή ή/και στρατηγική αξιολόγηση της blockchain στην εφοδιαστική αλυσίδα.

³⁶ International CORE Conference Rankings (ICORE)

Κριτήρια Αποκλεισμού:

- Άρθρα που δεν εστίαζαν άμεσα στην εφαρμογή της blockchain στον τομέα της εφοδιαστικής αλυσίδας. Ορισμένες μελέτες αφορούσαν γενικά την τεχνολογία blockchain ή την εφαρμογή της σε άλλους κλάδους (π.χ. υγειονομική περίθαλψη, χρηματοοικονομικές υπηρεσίες), οπότε κρίθηκαν ότι δεν εξυπηρετούσαν τους σκοπούς της παρούσας μελέτης.
- Μη επιστημονικές πηγές, όπως επαγγελματικά ιστολόγια (blogs), τεχνικά white papers εταιρειών ή άρθρα γνώμης, που δεν είχαν υποβληθεί σε διαδικασία αξιολόγησης από ομότιμους κριτές (peer-review) δεν λήφθηκαν υπόψη.
- Άρθρα που είχαν δημοσιευθεί πριν από το 2017.
- Άρθρα τα οποία αφορούσαν καθαρά θεωρητικές ή εννοιολογικές μελέτες που δεν περιλάμβαναν εμπειρικά δεδομένα, μεθοδολογική τεκμηρίωση ή πρακτικά ευρήματα.

Κριτήρια Ποιότητας:

- *Σαφήνεια & κατανόηση*: το περιεχόμενο να παρουσιάζεται με τρόπο κατανοητό, χωρίς να δημιουργούνται δυσκολίες στην ερμηνεία βασικών εννοιών και συνεισφορών.
- *Επιστημονική τεκμηρίωση της μεθοδολογίας*: καταλληλότητα και σαφήνεια της ερευνητικής μεθοδολογίας που ακολουθεί η κάθε μελέτη.

Από τις 95 δημοσιεύσεις που εντοπίστηκαν αρχικά, με βάση την θεματολογική τους συνάφεια, πραγματοποιήθηκε μια συστηματική διαδικασία αξιολόγησης που διενεργήθηκε σε δύο διαδοχικά στάδια με βάση τα προαναφερθέντα κριτήρια.

Στο πρώτο στάδιο, η αξιολόγηση πραγματοποιήθηκε με βάση συγκεκριμένα κριτήρια ένταξης και αποκλεισμού, όπως η γλώσσα (που επιλέχθηκαν μόνο άρθρα γραμμένα στην αγγλική γλώσσα), προκειμένου να διασφαλιστεί η καθολική κατανόηση και η δυνατότητα επαλήθευσης των αποτελεσμάτων, ο τύπος δημοσίευσης (περιοδικά άρθρα, πρακτικά συνεδρίων, ανασκοπήσεις) και το έτος έκδοσης (δημοσιευμένα την τελευταία επταετία). Επιπλέον, εξετάστηκε η αξιοπιστία των πηγών, με τη χρήση του συντελεστή απήχησης για περιοδικά και των διεθνών κατατάξεων για συνέδρια, ώστε να εξασφαλιστεί η εγκυρότητα και η αξιοπιστία των επιλογών. Το στάδιο αυτό βασίστηκε κυρίως στα μεταδεδομένα (τίτλος, περίληψη, τύπος δημοσίευσης κλπ.) των άρθρων. Από αυτή τη διαδικασία, 68 δημοσιεύσεις από τις 95 κρίθηκαν κατάλληλες για περαιτέρω ανάλυση που αντιστοιχεί στο επόμενο στάδιο αξιολόγησης/φίλτραρίσματος.

Στο δεύτερο στάδιο αξιολόγησης, διενεργήθηκε ποιοτική αξιολόγηση των άρθρων με βάση το πλήρες περιεχόμενό τους. Τα κριτήρια ποιότητας που εφαρμόστηκαν αφορούσαν την σαφήνεια και κατανόηση του κειμένου, ώστε να μην προκύπτουν δυσκολίες στην αντίληψη βασικών εννοιών, καθώς και στην επιστημονική τεκμηρίωση και καταλληλότητα της μεθοδολογίας. Με τον τρόπο αυτό διασφαλίστηκε ότι τα άρθρα που επιλέχθηκαν συνεισέφεραν ουσιαστικά στα ερευνητικά ερωτήματα της μελέτης.

Μετά την υλοποίηση και ολοκλήρωση των παραπάνω σταδίων, ο τελικός αριθμός των άρθρων που επιλέχθηκαν για την αναλυτική συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση ανήλθε

στα 39. Η διαδικασία επιλογής διασφάλισε ότι το θεωρητικό υπόβαθρο της παρούσας μελέτης βασίζεται σε επικαιροποιημένα και επιστημονικά τεκμηριωμένα δεδομένα, τα οποία αποτέλεσαν τη βάση για τη διεξαγωγή της ανάλυσης που απαιτείται στα πλαίσια της βιβλιογραφικής ανασκόπησης και τη διαμόρφωση των βασικών αξόνων της μεθοδολογίας, παρέχοντας ισχυρή υποστήριξη στις ερευνητικές ερωτήσεις που τέθηκαν.

Τα άρθρα αυτά αποτέλεσαν τη βάση τόσο για την ποσοτική ανάλυση όσο και για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τον τρόπο εφαρμογής της τεχνολογίας blockchain στην εφοδιαστική αλυσίδα. Παράλληλα, μέσα από την ανάλυση αναδείχθηκαν τα βασικά πλεονεκτήματα της ενσωμάτωσης της συγκεκριμένης τεχνολογίας, καθώς και τα κύρια εμπόδια και οι προκλήσεις που συνοδεύουν την αξιοποίησή της στον εν λόγω τομέα.

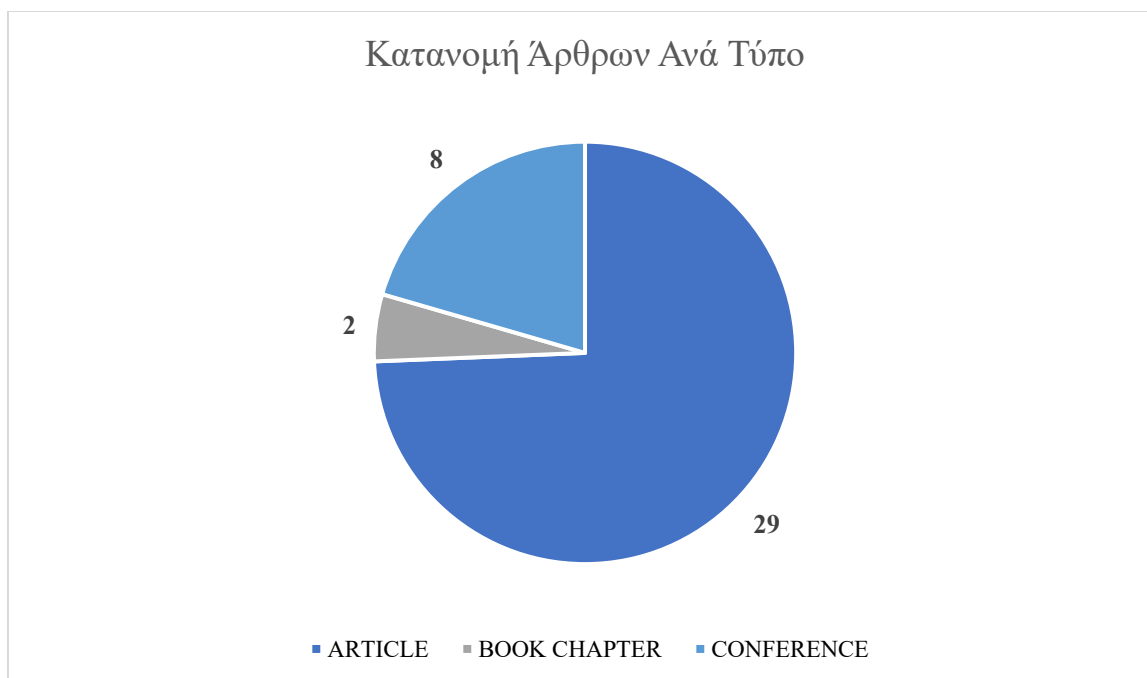
3.4 Ποσοτική Ανάλυση

Η ποσοτική ανάλυση είναι μια ερευνητική μέθοδος που βασίζεται στη συλλογή και ανάλυση αριθμητικών δεδομένων με σκοπό την εξαγωγή αντικειμενικών και στατιστικά τεκμηριωμένων συμπερασμάτων. Χρησιμοποιείται κυρίως για τη μέτρηση μεταβλητών, την ανίχνευση συσχετίσεων και την επιβεβαίωση υποθέσεων. Εφαρμόζεται μέσω εργαλείων, όπως ερωτηματολόγια, πειράματα και βάσεις δεδομένων, με τις πληροφορίες να αναλύονται με στατιστικές τεχνικές. Η ποσοτική ανάλυση επιτρέπει τη γενίκευση αποτελεσμάτων σε μεγαλύτερους πληθυσμούς και προσφέρει ακρίβεια, αξιοπιστία και επαναληψιμότητα στα ερευνητικά ευρήματα (Mellinger & Hanson, 2021).

Τα 39 άρθρα που επιλέχθηκαν λοιπόν για την τελική φάση της συστηματικής βιβλιογραφικής ανασκόπησης, παρείχαν ποσοτικά δεδομένα βασισμένα σε εμπειρική έρευνα. Οι μελέτες, περιλάμβαναν ερωτηματολόγια, στατιστικές αναλύσεις και δεδομένα πεδίου από επιχειρήσεις που είχαν εφαρμόσει τεχνολογία blockchain σε διάφορες λειτουργίες της εφοδιαστικής αλυσίδας. Τα ποσοτικά ευρήματα των μελετών αυτών συνέβαλαν καθοριστικά στη διαμόρφωση μιας αντικειμενικής εικόνας για τον βαθμό αποδοχής και την αποτελεσματικότητα της τεχνολογίας.

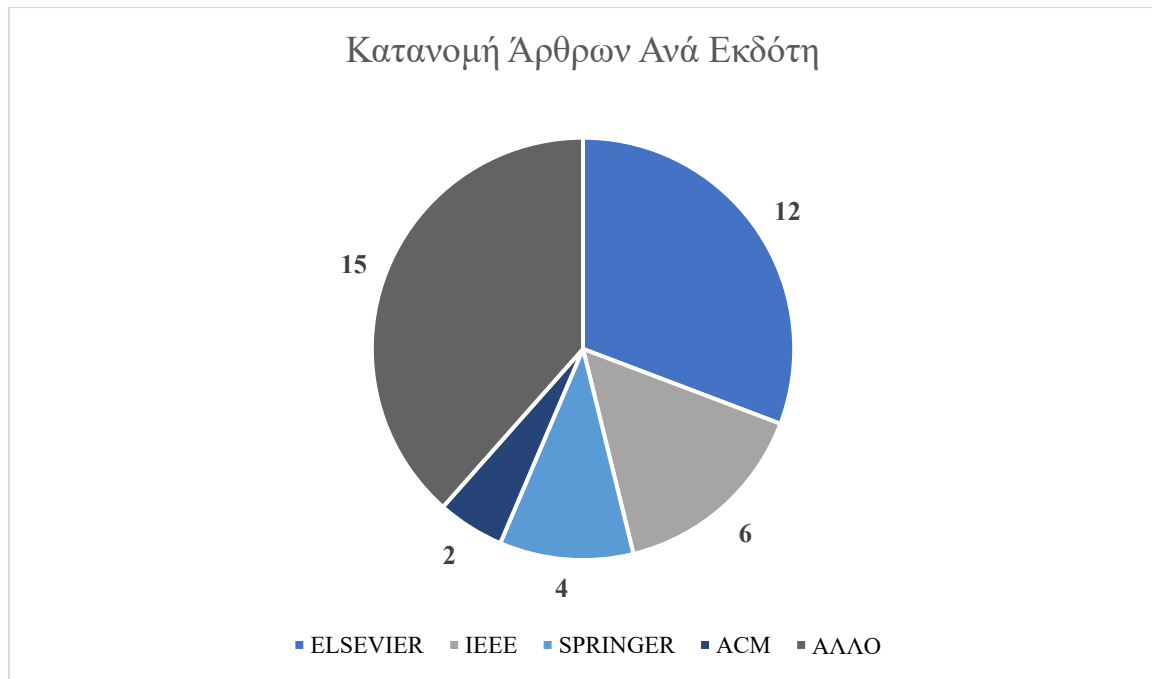
Παρακάτω, θα παρουσιαστούν οι μελέτες αυτές μέσω διαγραμμάτων πίτας και ράβδων, με στόχο την ευκολότερη κατανόηση και σύγκριση των αποτελεσμάτων. Συγκεκριμένα:

1. Διάγραμμα 1 (Πίτα): Απεικονίζει την κατανομή των άρθρων ανά τύπο (περιοδικά, συνέδρια, βιβλία).
2. Διάγραμμα 2 (Πίτα): Παρουσιάζει τα ποσοστά των άρθρων ανά εκδότη (Elsevier, ACM, IEEE, Springer, Άλλοι).
3. Διάγραμμα 3 (Ράβδων): Αποτυπώνει την κατανομή των άρθρων ανά έτος δημοσίευσης τους.



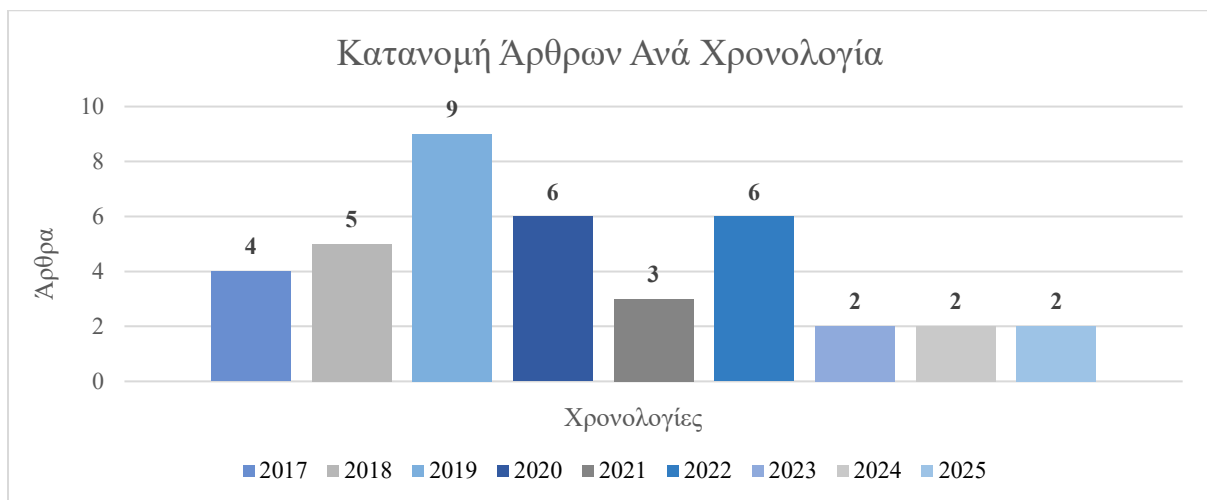
Εικόνα 5: Διάγραμμα (1) – Κατανομή των άρθρων ανά τύπο.

Στην παραπάνω εικόνα, απεικονίζεται το πρώτο κυκλικό διάγραμμα (πίτας), το οποίο αποκαλύπτει ότι η πλειονότητα των πηγών είναι κυρίως επιστημονικά άρθρα (37 - 94%), γεγονός που υποδηλώνει το μεγαλύτερο μέρος του συνόλου των δεδομένων. Αυτή η διαφοροποίηση σε σχέση με τις υπόλοιπες πηγές παραπέμπει στην ισχυρή εξάρτηση από βιβλιογραφία με κριτές, η οποία είναι προσανατολισμένη στην έρευνα και την καινοτομία, ενισχύοντας με αυτό το τρόπο την αξιοπιστία της μελέτης. Από τα 37 άρθρα, τα 29 (78% των άρθρων και 74% των πηγών) δημοσιεύθηκαν σε περιοδικά και τα 8 (22% άρθρων και 21% των πηγών) σε συνέδρια. Αυτό σημαίνει πως η πλειονότητα των επιστημονικών άρθρων αντιστοιχεί σε πλήρη και ολοκληρωμένη έρευνα ενώ μόνο ένα μικρό ποσοστό αντιστοιχεί σε νεωτεριστικές αλλά όχι πλήρως ολοκληρωμένες έρευνες. Εντός των 37 επιστημονικών άρθρων εντοπίστηκαν και (4) άρθρα ανασκόπησης, όλα δημοσιευμένα σε επιστημονικά περιοδικά. Συνεπώς, το 14% των άρθρων σε περιοδικά αφορά ανασκοπήσεις. Σε γενικό επίπεδο, τα άρθρα ανασκόπησης τονίζουν την προσπάθεια των ευρημάτων τους να ενσωματώσουν μια ευρύτερη οπτική και να καταγράψουν συνολικά την τρέχουσα κατάσταση της ερευνητικής προόδου στο πεδίο. Τέλος, τα κεφάλαια βιβλίων (2 - 5%) αποτελούν την τρίτη και μικρότερη ομάδα, δείχνοντας περιορισμένη χρήση ευρημάτων θεωρητικών ή εφαρμοσμένων προοπτικών.



Εικόνα 6: Διάγραμμα (2) – Κατανομή των άρθρων ανά εκδότη.

Το δεύτερο κυκλικό διάγραμμα που παρουσιάζεται παραπάνω, επισημαίνει τους εκδότες των επιλεγμένων άρθρων. Ο Elsevier εμφανίζεται με (12 - 31%) δημοσιεύσεις, ακολουθούμενος από τον IEEE (6 - 15%) και τον Springer (4 - 10%), υποδεικνύοντας την προτίμηση για αξιόπιστους και υψηλού επιπέδου εκδότες στον τομέα της επιστήμης και της μηχανικής. Ο ACM, εκπροσωπείται επίσης, αλλά σε μικρότερο βαθμό (2 - 5%). Ενδιαφέρουσα είναι η περίπτωση ότι (15 - 39%) άρθρα εμπίπτουν στην κατηγορία “Άλλο”, υποδηλώνοντας ποικιλομορφία στις δημοσιευμένες πηγές αλλά και στη διάχυση της γνώσης. Αυτή η τάση, ενδεχομένως αντικατοπτρίζει τη σταδιακή μετατόπιση της επιστημονικής κοινότητας προς μικρότερους εκδότες και δημοσιευμένα περιοδικά ανοικτής πρόσβασης.



Εικόνα 7: Διάγραμμα (3) – Κατανομή των άρθρων ανά χρονολογία.

Το διάγραμμα μπάρας, όπως φαίνεται παραπάνω, αποκαλύπτει την ετήσια κατανομή των επιλεγμένων άρθρων με βάση το έτος δημοσίευσής τους. Το σύνολο των έργων εκτείνεται από τη χρονολογία του 2017 έως το 2025, με αξιοσημείωτη αύξηση στις δημοσιεύσεις. Η

χρονιά που επιφέρει τα περισσότερα αποτελέσματα είναι το 2019 με (9) άρθρα, γεγονός που φανερώνει σημαντική αύξηση στη σχετική έρευνα κατά τη διάρκεια του έτους. Η ανοδική ροή που διατηρήθηκε από το 2017 και έπειτα, αντανακλά το αυξανόμενο ενδιαφέρον για το θέμα. Αν και μετά το 2019 εμφανίζεται μια σχετική μείωση, αυτό δεν σημαίνει απαραίτητα πως υπάρχει περιορισμός του ερευνητικού ενδιαφέροντος, αλλά ενδέχεται να μαρτυρά το γεγονός πως ορισμένα άρθρα να μην είχαν ακόμη δημοσιευθεί όταν πραγματοποιήθηκε η αναζήτηση. Επιπλέον, τα κριτήρια αναζήτησης και επιλογής που εφαρμόστηκαν στην παρούσα μελέτη, σε συνδυασμό με τις ιδιαιτερότητες κάθε βάσης δεδομένων (όπως το Google Scholar, Scopus, κ.α.) επηρέασαν εξίσου σε κάποιο βαθμό τα αποτελέσματα της αναζήτησης και του τελικού δείγματος των πηγών. Όμως η παρουσία πρόσφατων δημοσιεύσεων μέχρι και το 2025 δείχνει ότι λαμβάνονται υπόψη οι τρέχουσες εξελίξεις, διασφαλίζοντας ότι η μελέτη σε αυτό το τομέα παραμένει ενημερωμένη.

Συνολικά, τα τρία διαγράμματα παρέχουν μια ολοκληρωμένη και ενημερωμένη εικόνα των πηγών, επισημαίνοντας την επιλογή άρθρων από αξιόπιστους εκδότες και αναδεικνύοντας την αυξανόμενη έμφαση που δίνεται στο συγκεκριμένο θέμα τα τελευταία χρόνια από την επιστημονική κοινότητα.

4ο Κεφάλαιο – Ανάλυση

Αυτό το κεφάλαιο στοχεύει να παρέχει μια ολοκληρωμένη κατανόηση των εφαρμογών/έργων blockchain στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, αναλύοντας τις 39 επιλεγμένες μελέτες. Δομείται σε τέσσερα βασικά τμήματα:

1. Η Ενότητα 4.1 παρουσιάζει την εννοιολογική εφαρμογή της blockchain στην αλυσίδα εφοδιασμού δίνοντας μιας καλύτερη εικόνα των πλεονεκτημάτων χρήσης αλλά και λειτουργίας της.
2. Η Ενότητα 4.2 κατηγοριοποιεί τις μελέτες με βάση 3 διαστάσεις: τον τύπο blockchain, τον τομέα εφαρμογής και τον σκοπό.
3. Η Ενότητα 4.3 εξετάζει και αναλύει τις πρακτικές εφαρμογές, περιγράφοντας λεπτομερώς τις τεχνολογίες που χρησιμοποιούνται, ενώ παράλληλα παρέχεται υπόβαθρο για την ενσωμάτωσή τους με τεχνολογίες όπως το IoT και η Τεχνητή Νοημοσύνη.
4. Η Ενότητα 4.4 προσφέρει μια συγκριτική ανάλυση σημαντικών έργων blockchain χρησιμοποιώντας έξι κριτήρια αξιολόγησης.

Σε συνδυασμό, αυτά τα τμήματα παρέχουν τόσο εννοιολογικές όσο και πρακτικές γνώσεις σχετικά με τον μετασχηματιστικό ρόλο της blockchain στις αλυσίδες εφοδιασμού.

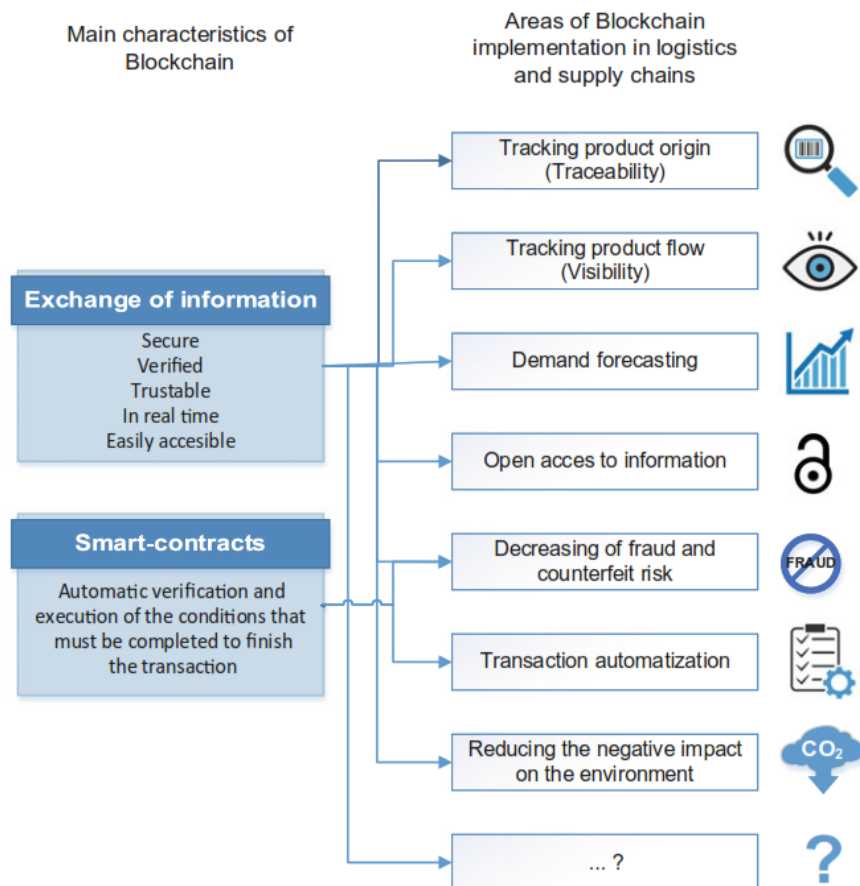
4.1 Εννοιολογική Εφαρμογή της Τεχνολογίας Blockchain στην Εφοδιαστική Αλυσίδα

Η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας στην σύγχρονη εποχή αποτελεί ένα σύνθετο πλέγμα δραστηριοτήτων και οργανισμών που συντονίζει τη ροή των αγαθών, των πόρων και των πληροφοριών από τον προμηθευτή μέχρι τον τελικό καταναλωτή. Τα κρίσιμα χαρακτηριστικά που την διέπουν είναι η διαφάνεια η αποδοτικότητα και η συνεργασία μεταξύ των εμπλεκόμενων μερών, τα οποία αποτελούν βασικοί παράγοντες για την επιτυχία της. Οι κύριες δυσκολίες που αντιμετωπίζει είναι η έλλειψη εμπιστοσύνης, η περιορισμένη ορατότητα, η δυσκολία στη διαχείριση συμβολαίων και η ελλιπής ψηφιοποίηση (Gohil & Thakker, 2021). Αυτές οι δυσκολίες/προβλήματα αναδεικνύουν την ανάγκη για τεχνολογική καινοτομία.

Η τεχνολογία blockchain από την άλλη, αν και αρχικά αναπτύχθηκε ως ένα σταθερό, αποκεντρωμένο, αυτόνομο και βιώσιμο χρηματοοικονομικό σύστημα, — γνωστή μέσω της χρήσης των κρυπτονομισμάτων — με τα χρόνια αναπτύχθηκε σε ένα ισχυρό εργαλείο για την ασφαλή, αμετάβλητη και αποκεντρωμένη καταγραφή δεδομένων. Αν και η blockchain, ως τεχνολογία στον τομέα της εφοδιαστικής, βρίσκεται ακόμα σε αναπτυξιακό στάδιο, στο σημερινό παγκοσμιοποιημένο και διασυνδεδεμένο επιχειρηματικό περιβάλλον, έχει κεντρίσει το ενδιαφέρον σε πολλές ιδιωτικές και δημόσιες εταιρείες αλλά και οργανισμούς, λόγω της εμπιστευτικότητας αλλά και της ακεραιότητας που προσφέρει. Επειδή, οι εφοδιαστικές αλυσίδες γίνονται ολοένα και πιο περίπλοκες, γεωγραφικά εκτεταμένες και ευάλωτες σε

διαταραχές, ο συνδυασμός αυτών των δύο πεδίων επισημαίνει την έναρξη μιας τεχνολογικής καινοτόμους επανάστασης.

Το βασικό προνόμιο της τεχνολογίας blockchain στην εφοδιαστική αλυσίδα είναι η διαφάνεια. Καταγράφοντας τις συναλλαγές σε ένα κατακευκαλισμένο και αμετάβλητο ψηφιακό βιβλίο, η blockchain επιτρέπει σε όλους τους ενδιαφερόμενους να έχουν πρόσβαση σε επαληθεύσιμες πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο. Αυτό οδηγεί στη μείωση της απάτης και της παραχάραξης, ιδιαίτερα σε κλάδους όπως τα φαρμακευτικά προϊόντα και τα είδη πολυτελείας, όπου η αυθεντικότητα των προϊόντων είναι κρίσιμη. Παράλληλα, η blockchain βελτιώνει την αποδοτικότητα των διαδικασιών μέσω των έξυπνων συμβολαίων, τα οποία αυτοματοποιούν τις συμφωνίες και ενεργοποιούν ενέργειες βάσει προκαθορισμένων συνθηκών, μειώνοντας τις καθυστερήσεις και τα διοικητικά βάρη. Η ασφάλεια ενισχύεται μέσω κρυπτογραφικών αλγόριθμων, οι οποίοι προστατεύουν τα δεδομένα από αλλοιώσεις και καθιστούν τις αλυσίδες εφοδιασμού πιο ανθεκτικές στις κυβερνοαπειλές (Esmaeilian et al., 2020). Επιπλέον, ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα της blockchain είναι η ικανότητά της να επιτρέπει τη συνεργασία αγνώστων ή μη συντονισμένων μερών, χάρη στη χρήση πρωτοκόλλων συναίνεσης. Τα παραπάνω οφέλη ωθούν τις επιχειρήσεις να εκσυγχρονίσουν τις ροές δεδομένων και τα πληροφοριακά τους συστήματα, επιτυγχάνοντας ακριβή ιχνηλασιμότητα, αυτόματη παρακολούθηση παραγγελιών και προστασία από πλαστά προϊόντα (Gohil & Thakker, 2021).



Εικόνα 8: Κύρια χαρακτηριστικά της blockchain και τομείς εφαρμογής της στη διαχείριση εφοδιαστικής αλυσίδας (Dujak & Sajter, 2018).

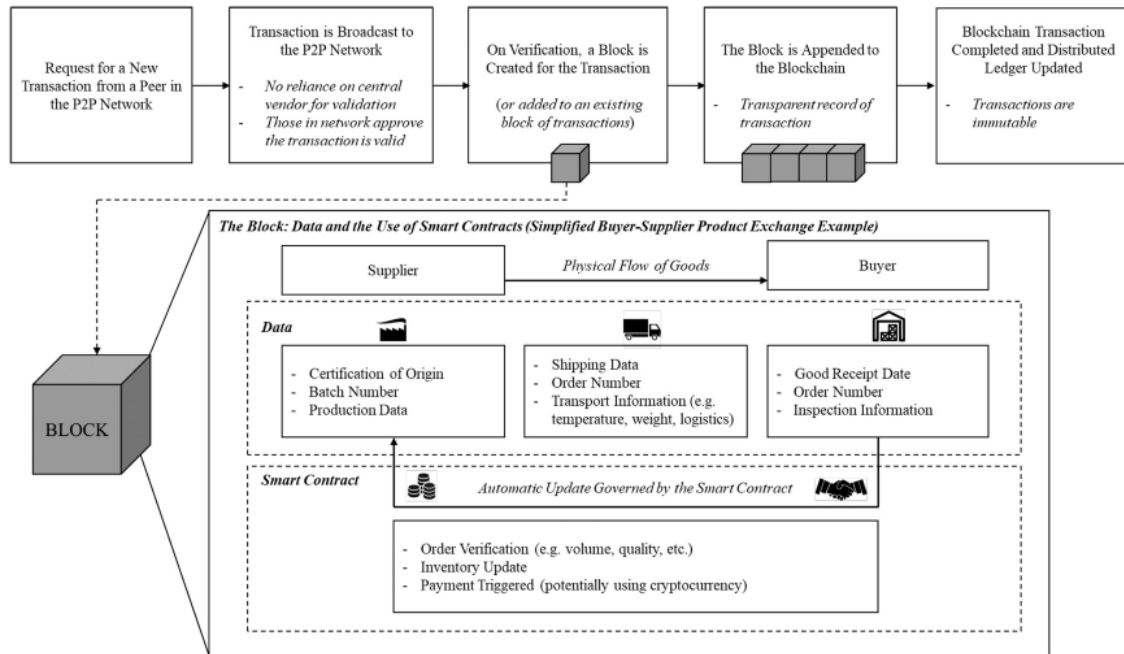
Η άνωθεν εικόνα, παρουσιάζει τα οφέλη της λειτουργικότητας της τεχνολογίας blockchain ως προς την εφοδιαστική αλυσίδα. Συγκεκριμένα, αυτά διαχωρίζεται σε δύο κύριες κατηγορίες: (I) την ανταλλαγή των πληροφοριών και (II) τα έξυπνα συμβόλαια, όπου οι ιδιότητες που παρουσιάζονται στην πρώτη στήλη συσχετίζονται με τις αντίστοιχες εφαρμογές που απεικονίζονται στη δεύτερη στήλη.

Ορισμένοι από τους σημαντικότερους τομείς εφαρμογής (και αντίστοιχα οφέλη) της αλυσίδας μπλοκ στην εφοδιαστική αλυσίδα περιλαμβάνουν την παρακολούθηση της προέλευσης των προϊόντων (traceability) καθώς και της ροής τους μέσω του δικτύου εφοδιασμού (visibility), την πρόβλεψη της ζήτησης (demand forecasting), τη μείωση του κινδύνου απάτης και απομίμησης (fraud & counterfeit risk), την ανοικτή πρόσβαση σε πληροφορίες (open access), τη μείωση των αρνητικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων (negative environmental impact) και την αυτοματοποίηση των συναλλαγών μέσω έξυπνων συμβολαίων (transaction automatization). Αξιοσημείωτο είναι πως όλες αυτές οι εφαρμογές δεν λειτουργούν ανεξάρτητα, αλλά μπορούν να συνδυαστούν, προσφέροντας έτσι πολλαπλά πλεονεκτήματα. Για παράδειγμα η ταυτόχρονη παρακολούθηση της προέλευσης και της ροής, μπορεί να συμβάλλει θετικά στην μείωση του κινδύνου απάτης και στην πιο ακριβέστερη πρόβλεψη της ζήτησης (Dujak & Sajter, 2018).

Σημαντικός τομέας εφαρμογής είναι και τα πιστοποιητικά (certificates), καθώς η blockchain μπορεί να εγγυάται την προέλευση, την ακεραιότητα και τη συμμόρφωση των προϊόντων με την αξιοποίηση ψηφιακών πιστοποιητικών (Public Key Infrastructure, PKI). Με το τρόπο αυτό, εξακριβώνεται η γνησιότητα και το ιστορικό του προϊόντος, ενισχύοντας έτσι την ακεραιότητα. Αυτή η αρχιτεκτονική ενδυναμώνει την εμπιστοσύνη της αλυσίδας εφοδιασμού και επιπλέον παρέχεται στο σύνολο μια ολοκληρωμένη ορατότητα (Azevedo et al., 2023).

Συνοψίζοντας, η ενσωμάτωση της τεχνολογίας blockchain στην εφοδιαστική αλυσίδα συνιστά θεμελιώδη μεταβολή στον τρόπο διαχείρισης, παρακολούθησης και εκτέλεσης των διαδικασιών. Οι εφαρμογές της προσφέρουν αυξημένη, διαφάνεια, ασφάλεια και αποτελεσματικότητα, χαρακτηριστικά που είναι πολύ πολύτιμα διότι πολλοί ενδιαφερόμενοι απαιτούν κοινή ορατότητα, δυνατότητα ελέγχου και εμπιστοσύνη.

Αφού αναδείχθηκαν τα οφέλη της τεχνολογίας blockchain, παρακάτω θα παρουσιαστεί η εφαρμογή της στο πεδίο της διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας με έμφαση στην λειτουργικότητα της.



Εικόνα 9: Η ενσωμάτωση της blockchain στη ροή δεδομένων και αγαθών της εφοδιαστικής αλυσίδας (Cole et al., 2019).

Η παραπάνω απεικόνιση αποδίδει με σαφήνεια την λειτουργικότητα της blockchain στο πλαίσιο της διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας (Operations and Supply Chain Management, OSCM), με διάκριση στην ροή των δεδομένων και την χρήση των έξυπνων συμβολαίων. Η κλασική διαδικασία ξεκινάει όταν ένας συμμετέχων στο δίκτυο (κόμβος) υποβάλλει ένα νέο αίτημα. Αυτό το αίτημα διαμοιράζεται σε όλους τους κόμβους του δικτύου P2P, οι οποίοι ελέγχουν και επιβεβαιώνουν αν η συναλλαγή είναι έγκυρη, χωρίς να απαιτείται κάποιος μεσάζοντας. Μόλις η συναλλαγή εγκριθεί, το μπλοκ ενσωματώνεται στην αλυσίδα blockchain. Έτσι διασφαλίζεται ότι η συναλλαγή είναι διαφανής και προσβάσιμη οποιαδήποτε στιγμή και δεν μπορεί να υπάρξει τροποποίηση ή διαγραφή, εκτός αν συμφωνήσει όλο το δίκτυο.

Το διάγραμμα επεκτείνεται και παρουσιάζει ένα ενδεικτικό σενάριο ενός προμηθευτή και ενός αγοραστή, αποτυπώνοντας τόσο την φυσική ροή των αγαθών, όσο και της ροής των δεδομένων που συμβάλλουν στην εκτέλεση της συναλλαγής. Καθ' όλη την διάρκεια της διαδικασίας, σε κάθε στάδιο καταγράφονται εντός των μπλοκ της blockchain κρίσιμες πληροφορίες, όπως η πιστοποίηση προέλευσης, αριθμός παρτίδας, δεδομένα παραγωγής, μεταφορές καθώς και πληροφορίες παραλαβής και επιθεώρησης. Επιπλέον, τα έξυπνα συμβόλαια που ενσωματώνονται και αυτά στη blockchain εκτελούν τις εξής αυτόματες ενέργειες, όπως απεικονίζονται στην Εικόνα 9:

- Επικύρωση παραγγελίας βάση όγκου ή ποιότητας,
- Επικαιροποίηση αποθέματος,
- Ενεργοποίηση της πληρωμής.

Η αυτοματοποίηση μειώνει τις χειρωνακτικές ενέργειες (π.χ. τιμολόγηση, έκδοση παραγγελιών), ελαχιστοποιεί σφάλματα και τυχόν καθυστερήσεις, ενώ ενισχύει την διαφάνεια και την λογοδοσία.

Παρατηρείται λοιπόν, πως η blockchain στο πλαίσιο του OSCM, επιφέρει μια σειρά πλεονεκτημάτων. Πρώτα από όλα λειτουργεί ως ένα αποκεντρωμένο καθολικό που είναι η μοναδική πηγή αλήθειας για όλους τους εμπλεκόμενους φορείς. Δεύτερον, η δυναμική παρακολούθηση των συναλλαγών σε πραγματικό χρόνο επιτρέπει την εύρεση προβλημάτων και πλαστών προϊόντων, και οδηγεί στην βελτίωση της εξυπηρέτησης. Τέλος, ο συνδυασμός της blockchain και με άλλες τεχνολογίες, όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων και τα κυβερνο-φυσικά συστήματα (Cyber Physical Systems, CPS), μπορεί να συνδράμει στην αυτόνομη λήψης αποφάσεων και την δημιουργία ευέλικτων εφοδιαστικών δικτύων. Παρά τις δυνατότητες αυτές, η εφαρμογή της blockchain είναι περιορισμένη, με πολλές υλοποιήσεις να βρίσκονται ακόμα σε πιλοτικό στάδιο και να αντιμετωπίζουν εμπόδια τεχνικής, κανονιστικής και οργανωσιακής φύσεως (Cole et al., 2019).

Όπως θα φανεί σε επόμενη ενότητα του κεφαλαίου (4.3.1), οι αναλυθείσες μελέτες αποκαλύπτουν ότι η τεχνολογία blockchain εφαρμόζεται συχνότερα σε τομείς όπου η διαφάνεια, η ιχνηλασιμότητα και η συμμόρφωση με τους κανονισμούς αποτελούν κρίσιμες προτεραιότητες — όπως η ασφάλεια των τροφίμων, τα φαρμακευτικά προϊόντα, η εφοδιαστική και τα είδη πολυτελείας (Zhu et al., 2022).

Επιπλέον, σε όλη τη βιβλιογραφία που εξετάστηκε, η blockchain χρησιμοποιήθηκε για την επίλυση διαφόρων λειτουργικών προκλήσεων, όπως η πρόληψη της παραποίησης, η διασφάλιση της αυθεντικότητας των προϊόντων, η παρακολούθηση της προέλευσης των εμπορευμάτων και η αυτοματοποίηση των διαδικασιών μέσω έξυπνων συμβολαίων (Dutta et al., 2020). Αυτές οι περιπτώσεις χρήσης καταδεικνύουν την ικανότητα της αλυσίδας μπλοκ να παρέχει αποκεντρωμένη εμπιστοσύνη, αντικαθιστώντας τα παραδοσιακά συστήματα που βασίζονται σε χαρτί ή σε απομονωμένα ψηφιακά συστήματα (Almutairi et al., 2022).

Συνεπώς, η επιλεγμένη βιβλιογραφία επικυρώνει την παραπάνω ανάλυση (συμπ. του περιεχομένου των Εικόνων 8 & 9) και υποδεικνύει τόσο τα πλεονεκτήματα όσο και τις ξεχωριστές χρήσεις/τομείς και τις ενδεδειγμένες περιπτώσεις εφαρμογής της blockchain στην αλυσίδα εφοδιασμού.

4.2 Κατηγοριοποίηση

Σε αυτή την ενότητα παρουσιάζεται μια ιεραρχική ταξινόμηση των 39 επιλεγμένων μελετών που αφορούν τη χρήση της τεχνολογίας blockchain στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας. Η ταξινόμηση αυτή ακολουθεί τρεις βασικές διαστάσεις οι οποίες συμβάλλουν στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο εφαρμόζεται η blockchain σε πραγματικά περιβάλλοντα εφοδιαστικών αλυσίδων: (I) με βάση τον τύπο της blockchain, (II) ανά τομέα εφαρμογής και (III) με βάση τον σκοπό της εφαρμογής.



Εικόνα 10: Κατηγοριοποίηση εφαρμογής της τεχνολογίας blockchain στην εφοδιαστική αλυσίδα.

4.2.1 Ταξινόμηση με Βάση τον Τύπο Blockchain

Οι εφαρμογές της blockchain στις αλυσίδες εφοδιασμού ποικίλλουν σημαντικά ως προς την αρχιτεκτονική και τη διακυβέρνησή τους. Με βάση τον τύπο της blockchain που χρησιμοποιείται, οι μελέτες κατηγοριοποιήθηκαν σε τρεις κύριους τύπους:

1. Δημόσιες (Public) Blockchain

Αρκετές μελέτες (Xu et al. 2017, Casino et al. 2019, Alam et al. 2021) ανέλυσαν τη χρήση λύσεων βασισμένων στο Ethereum για την παρακολούθηση γεωργικών προϊόντων, τη διαχείριση συναλλαγών με βάση tokens και την αυτοματοποίηση της συμμόρφωσης με τους εμπορικούς κανονισμούς χρησιμοποιώντας έξυπνα συμβόλαια. Ένα σημαντικό πλεονέκτημα που επισημάνθηκε σε αυτές τις εργασίες είναι η διαφάνεια, καθώς όλες οι συναλλαγές είναι δημόσια ορατές και επαληθεύσιμες. Ωστόσο, τα δημόσια blockchain επικρίθηκαν επίσης για τους περιορισμούς τους σε ό,τι αφορά την κλιμακωσιμότητα και το υψηλό κόστος των συναλλαγών.

2. Ιδιωτικές (Private) Blockchain

Όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 2.2.4, μόνο εξουσιοδοτημένοι συμμετέχοντες μπορούν να έχουν πρόσβαση και να συνεισφέρουν σε μια ιδιωτική blockchain, καθιστώντας την πιο κατάλληλη για βιομηχανικές εφαρμογές όπου η προστασία των δεδομένων και η απόδοση είναι κρίσιμης σημασίας (Tuan et al., 2017).

Πολλά από τα άρθρα που εξετάστηκαν επικεντρώθηκαν σε εφαρμογές που χρησιμοποιούν το Hyperledger Fabric, ένα αρθρωτό και ευέλικτο πλαίσιο ιδιωτικών blockchain (Mohan, 2019). Αυτές οι λύσεις εφαρμόστηκαν σε φαρμακευτικές αλυσίδες εφοδιασμού, όπου η συμμόρφωση με τους κανονισμούς, η δυνατότητα ελέγχου και η ασφαλής ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των ενδιαφερομένων μερών είναι ουσιαστικής σημασίας. Το ελεγχόμενο περιβάλλον και η αποτελεσματικότητα των ιδιωτικών blockchain τις καθιστούν ιδανικές προς εφαρμογή στην πράξη (Hao et al., 2018).

3. Κοινοπρακτικές (Consortium) Blockchain

Οι blockchain που βασίζονται σε κοινοπραξίες (consortium blockchains) είναι δημοφιλείς στον τομέα της εφοδιαστικής και της βιομηχανίας τροφίμων, όπου πολλοί ανταγωνιστές συνεργάζονται μέσω κοινής υποδομής (Nathan & Jacobs, 2020). Αυτά τα συστήματα προωθούν την εμπιστοσύνη και τη συνεργασία, αποφεύγοντας ταυτόχρονα τον ανοιχτό χαρακτήρα των δημόσιων blockchain και τον συγκεντρωτισμό των ιδιωτικών (O’Leary, 2017).

Ένα αξιοσημείωτο παράδειγμα κοινοπρακτικής blockchain είναι το IBM Food Trust, η οποία έχει εφαρμοστεί σε παγκόσμιες αλυσίδες εφοδιασμού τροφίμων για την παρακολούθηση της προέλευσης, της φρεσκάδας και της ποιότητας των προϊόντων (Zavolokina et al., 2020).

4.2.2 Ταξινόμηση ανά Τομέα Εφαρμογής

Η τεχνολογία blockchain υιοθετείται πλέον σε ένα ευρύ φάσμα βιομηχανικών κλάδων στο πλαίσιο της διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας, προσφέροντας λύσεις που ενισχύουν την αποτελεσματικότητα, την ασφάλεια και την διαφάνεια. Με βάση τους τομείς εφαρμογής, τα επιλεγμένα άρθρα ομαδοποιήθηκαν ως εξής:

1. Αγροδιατροφικός Τομέας

Η αγροδιατροφική ήταν στους πιο εντατικά μελετημένους τομείς στην εφαρμογή της τεχνολογίας blockchain, καθώς η τελευταία παρουσιάζει πληθώρα δυνατοτήτων στην ενίσχυση της (αγροδιατροφικής) εφοδιαστικής αλυσίδας. Ειδικότερα, ο τομέας αξιοποιεί την blockchain για τη βελτίωση της ιχνηλασιμότητας, την επαλήθευση της αυθεντικότητας πιστοποιήσεων βιολογικών προϊόντων ή την επαλήθευση δίκαιου εμπορίου και τη διασφάλιση της ασφάλειας των τροφίμων. Έργα, όπως το Provenance και το TE-FOOD, παρακολουθούν τα δεδομένα από το αγρόκτημα έως το πιάτο και βοηθούν τους καταναλωτές να έχουν πρόσβαση στο ιστορικό των προϊόντων χρησιμοποιώντας κωδικούς QR (Antonucci et al., 2019).

2. Φαρμακευτική

Στη φαρμακευτική βιομηχανία, οι εφαρμογές blockchain επικεντρώνονται στην καταπολέμηση των παραποιημένων φαρμάκων και στη διασφάλιση της ακεραιότητας τους. Για παράδειγμα, το MediLedger Project είναι ένα δίκτυο blockchain που έχει σχεδιαστεί για την επαλήθευση της νομιμότητας των φαρμάκων σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού των ΗΠΑ, σύμφωνα με τον Νόμο για την Ασφάλεια της Αλυσίδας Εφοδιασμού Φαρμάκων (Drug Supply Chain Security Act, DSCSA) (Zakari et al., 2022).

3. Λιανική

Οι μελέτες που εστιάζουν στη λιανική πώληση δίνουν έμφαση στη διαχείριση αποθεμάτων σε πραγματικό χρόνο, στην αυθεντικοποίηση των προϊόντων πολυτελείας και στην αφοσίωση των πελατών. Λύσεις, όπως το VeChain, χρησιμοποιούνται από μάρκες πολυτελών ειδών μόδας για την παρακολούθηση και την αυθεντικοποίηση των

προϊόντων τους, μειώνοντας την απάτη και αυξάνοντας την εμπιστοσύνη των καταναλωτών (Chakrabarti & Chaudhuri, 2017).

4. Μεταφορές και Επιμελητεία

Η blockchain στην επιμελητεία έχει ως στόχο τη μείωση της γραφειοκρατίας, την αυτοματοποίηση του εκτελωνισμού και την απλοποίηση των αποστολών. Εταιρείες, όπως η Maersk και η UPS, έχουν διερευνήσει τη blockchain για να επιτρέψουν την πιο αποτελεσματική και διαφανή μεταφορά εμπορευμάτων σε παγκόσμιο επίπεδο, συχνά σε συνδυασμό με συσκευές IoT (Koh et al., 2020).

5. Βιομηχανική Παραγωγή

Στον τομέα της παραγωγής, η blockchain χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση ανταλλακτικών, τη διαχείριση εγγυήσεων και την παρακολούθηση της συμμόρφωσης με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς. Αυτές οι περιπτώσεις χρήσης συχνά περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση με συστήματα IoT και ERP, ειδικά για τη διαχείριση σύνθετων δικτύων προμηθευτών και ελέγχων ποιότητας (Fernandez-Carames & Fraga-Lamas, 2019).

4.2.3 Ταξινόμηση με Βάση τον Σκοπό της Εφαρμογής

Οι μελέτες ταξινομήθηκαν επίσης με βάση τον κύριο σκοπό της εφαρμογής της τεχνολογίας blockchain στην αλυσίδα εφοδιασμού:

1. Ιχνηλασιμότητα

Η ιχνηλασιμότητα είναι ο πιο διαδεδομένος σκοπός εφαρμογής που βρέθηκε στη βιβλιογραφία που εξετάστηκε. Η blockchain επιτρέπει την παρακολούθηση των προϊόντων από άκρο σε άκρο, καταγράφοντας κάθε σημείο επαφής από την πρώτη ύλη έως τον τελικό καταναλωτή. Αυτό εξασφαλίζει τη λογοδοσία και διευκολύνει τον εντοπισμό των σημείων συμφόρησης ή της απάτης. Αυτή η λειτουργικότητα είναι ιδιαίτερα πολύτιμη στις βιομηχανίες τροφίμων και φαρμάκων (Galvez et al., 2018).

2. Διαφάνεια και Αυθεντικότητα

Αρκετές εφαρμογές blockchain στοχεύουν στην παροχή διαφάνειας των προϊόντων και στην καταπολέμηση της παραποίησης. Με την καταγραφή αμετάβλητων πληροφοριών για τα προϊόντα, οι καταναλωτές και τα ενδιαφερόμενα μέρη μπορούν να επαληθεύσουν την προέλευση, τις πρακτικές παραγωγής και το ιστορικό ιδιοκτησίας. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τα είδη πολυτελείας και τα περιουσιακά στοιχεία υψηλής αξίας (Azzi et al., 2019).

3. Συμμόρφωση και Ασφάλεια

Η συνεισφορά της blockchain στη συμμόρφωση και την ασφάλεια αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για την τήρηση κανονιστικών πλαισίων. Για παράδειγμα, στον αγροδιατροφικό και φαρμακευτικό τομέα, η αμετάβλητη καταγραφή των δεδομένων μπορεί να μειώσει τον κίνδυνο της παραποίησης ενός προϊόντος και να

διευκολύνει την συνεχή τήρηση των κανονισμών. Έτσι, οι επιχειρήσεις μπορούν να αποδεικνύουν με ακρίβεια εύκολα και γρήγορα τη συμμόρφωση τους και να ενισχύουν την εμπιστοσύνη των καταναλωτών αλλά και των αρμόδιων αρχών (Hastig and Sodhi, 2020).

4. Διαχείριση Κινδύνων

Η blockchain διαδραματίζει επίσης ρόλο στη διαχείριση των λειτουργικών και κανονιστικών κινδύνων καθώς και κινδύνων φήμης. Με τη βελτίωση της αξιοπιστίας και της δυνατότητας ελέγχου των δεδομένων, οι εταιρείες μπορούν να διασφαλίσουν τη συμμόρφωση, να μειώσουν τις διαφορές και να αξιολογήσουν καλύτερα τις ευπάθειες στην αλυσίδα εφοδιασμού τους. Εφαρμογές στον φαρμακευτικό και τον αεροδιαστημικό τομέα έχουν χρησιμοποιήσει την blockchain για να ενισχύσουν την ασφάλεια και τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς (Panda et al., 2019).

5. Αποδοτικότητα

Βασικός σκοπός εφαρμογής της blockchain στις εφοδιαστικές αλυσίδες είναι η βελτίωση της αποδοτικότητας. Με την χρήση ενός κοινόχρηστου ψηφιακού μητρώου (ledger), όλα τα μέλη της αλυσίδας μπορούν να έχουν ταυτόχρονη και άμεση πρόσβαση στις ίδιες πληροφορίες, χωρίς να απαιτούνται πολλαπλές καταχωρήσεις ή συνεχόμενες επιβεβαιώσεις. Αυτό μπορεί να μειώσει την γραφειοκρατία και τα λάθη που προκαλούνται από ασυνέπεια δεδομένων και να επιταχυνθούν διαδικασίες, όπως οι πληρωμές, οι τελωνειακοί έλεγχοι, ο έλεγχος και επεξεργασία των παραγγελιών, κ.α. Η διαδικασία αυτή, συμβάλει στην μείωση του κόστους και αυξάνει την λειτουργική αποδοτικότητα της αλυσίδας (Hastig and Sodhi, 2020).

6. Βιωσιμότητα

Αξιοποιώντας την blockchain για την καταγραφή περιβαλλοντικών στοιχείων και την επαλήθευση της προέλευσης πρώτων υλών, οι επιχειρήσεις έχουν την δυνατότητα να επιβεβαιώνουν ότι εφαρμόζουν ηθικές πρακτικές. Με το τρόπο αυτό, έχουν την ικανότητα να ανταποκρίνονται άμεσα στις απαιτήσεις (Environmental, Social, Governance, ESG) και ενισχύουν την εικόνα της κοινωνικής υπευθυνότητας προς τους καταναλωτές (Francisco & Swanson, 2018).

7. Αυτοματοποίηση μέσω Έξυπνων Συμβολαίων

Τα έξυπνα συμβόλαια αυτοματοποιούν τις συμφωνίες και τις συναλλαγές χωρίς την ανάγκη μεσαζόντων. Αυτή η αυτοματοποίηση μειώνει τα διοικητικά έξοδα και επιβάλλει τους επιχειρηματικούς κανόνες με διαφάνεια. Οι περιπτώσεις χρήσης περιλαμβάνουν αυτόματες πληρωμές, εκτέλεση παραγγελιών υπό όρους και υποβολή κανονιστικών εκθέσεων. Οι μελέτες δείχνουν πώς τα έξυπνα συμβόλαια συμβάλλουν στη μείωση των ανθρώπινων σφαλμάτων, στην επιτάχυνση των λειτουργιών και στην αύξηση της αποδοτικότητας (Shrestha et al., 2020).

Αυτό το τρισδιάστατο σύστημα ταξινόμησης παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα του τρόπου με τον οποίο χρησιμοποιείται η blockchain στις εφοδιαστικές αλυσίδες. Ο τύπος

εφαρμογής της τεχνολογίας blockchain επηρεάζει τα τεχνικά χαρακτηριστικά όσο και τα χαρακτηριστικά της διακυβέρνησης, ενώ ο τομέας καθορίζει το λειτουργικό πλαίσιο και τους εμπλεκόμενους φορείς. Συγχρόνως, ο σκοπός ορίζει το εκάστοτε πρόβλημα που καλείται να αντιμετωπίσει η τεχνολογία. Η ταξινόμηση αποτελεί τη βάση για μια πιο λεπτομερή ανάλυση και σύγκριση στις επόμενες ενότητες του τρέχοντος κεφαλαίου, όπου θα αξιολογηθούν τα πλεονεκτήματα, οι περιορισμοί και τα αποτελέσματα της κάθε μελέτης.

4.3 Ανάλυση

Αυτή η ενότητα διερευνά την εφαρμογή της blockchain στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, επισημαίνοντας τον ρόλο της στην ενίσχυση της ιχνηλασιμότητας, της διαφάνειας και της ακεραιότητας των δεδομένων. Εξετάζει βασικές πλατφόρμες blockchain — όπως το Hyperledger Fabric, το Ethereum, το VeChain αλλά και ιδιόκτητες λύσεις — και ερευνά τη χρήση τους σε βιομηχανίες, όπως τα τρόφιμα, τα φαρμακευτικά προϊόντα, η εφοδιαστική και τα είδη πολυτελείας, διερευνώντας έξι (6) εξέχοντα έργα που αξιοποιούν τις πλατφόρμες αυτές. Επίσης, γίνεται αναφορά και στην ενσωμάτωση της blockchain με συμπληρωματικές πλατφόρμες — όπως το OpenSC και το Modum.io — αλλά και αναδυόμενες τεχνολογίες, όπως το IoT και η TN, ιδιαίτερα ως προς την προοπτική ενίσχυσης της αξίας της εφοδιαστικής αλυσίδας. Αποκαλύπτονται τα δυνατά σημεία στην ιχνηλασιμότητα και την ασφάλεια καθώς και κοινές προκλήσεις όπως η ενσωμάτωση, το κόστος και η τυποποίηση. Αυτές οι διαστάσεις είναι απαραίτητες για την κατανόηση της αποτελεσματικότητας, της πολυπλοκότητας και της κλιμακωσιμότητας των λύσεων εφοδιαστικής αλυσίδας που βασίζονται στην τεχνολογία blockchain.

4.3.1 Τεχνολογικά Υποσυστήματα και Συσχέτιση με Εφαρμογές

Blockchain στην Εφοδιαστική Αλυσίδα

Η επιλογή των πλατφορμών που χρησιμοποιούνται στην υλοποίηση έργων blockchain στην εφοδιαστική αλυσίδα καθορίζεται σε ένα μεγάλο βαθμό από τις τεχνολογικές απαιτήσεις, τις ανάγκες κλιμακωσιμότητας, το επίπεδο εμπιστοσύνης που απαιτείται και το περιβάλλον του κάθε κλάδου. Το κάθε έργο που δημιουργείται αξιοποιεί διαφορετικό πλαίσιο (π.χ. Ethereum, Hyperledger Fabric, κ.α.), ανάλογα με το είδος της εφαρμογής, το επίπεδο διαφάνειας ή ιδιωτικότητας που ζητείται και τους εμπλεκόμενους φορείς στο έργο (είδος & προτιμήσεις φορέων). Επιπροσθέτως, η ενσωμάτωση της blockchain στις εφοδιαστικές αλυσίδες εξαρτάται από την πολυπλοκότητα και τις κανονιστικές απαιτήσεις του εκάστοτε κλάδου, τη γεωγραφική διασπορά και τη διαλειτουργικότητα των ήδη υπάρχων συστημάτων. Στην παρούσα ενότητα αναλύονται ενδεικτικά έργα που υλοποιήθηκαν σε διάφορες πλατφόρμες blockchain, καθώς και η τεχνολογική τους συμβολή στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας.

4.3.1.1 Πλατφόρμα Hyperledger Fabric και Σχετικές Εφαρμογές

Το Hyperledger Fabric, είναι μια ευρέως διαδεδομένη πλατφόρμα ανοιχτού κώδικα, η οποία φιλοξενείται από την Hyperledger Foundation καθώς και αναπτύσσεται και συντηρείται από το Linux Foundation από τον Δεκέμβριο του 2015 (Saraf & Sabadra, 2018). Πρόκειται για το πιο γνωστό χρησιμοποιημένο πλαίσιο (framework) του οικοσυστήματος Hyperledger. Αυτό που το καθιστά ιδιαίτερα ξεχωριστό είναι η αρθρωτή αρχιτεκτονική του, η οποία του δίνει την δυνατότητα να επεξεργάζεται χιλιάδες συναλλαγές ανά δευτερόλεπτο (3.000 - 20.000) (Foschini et al., 2020). Ο κύριος σκοπός της είναι η ενημέρωση του ευρύτερου κοινού σχετικά με τις επιχειρηματικές ευκαιρίες που προκύπτουν από τη χρήση της blockchain.

Σε αντίθεση με άλλες πλατφόρμες, το Hyperledger Fabric διαφοροποιείται καθώς, παρότι είναι ανοιχτού κώδικα, προορίζεται κυρίως για ιδιωτικά, με δικαιώματα πρόσβασης (permissioned), blockchain δίκτυα. Αυτό υποδηλώνει πως η πρόσβαση στο δίκτυο και η συμμετοχή σε συναλλαγές πραγματοποιείται μόνο από εξουσιοδοτημένα μέλη. Παράλληλα, η συμβατότητα του με το chaincode (έξυπνα συμβόλαια) το καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλο για σύνθετα δίκτυα εφοδιαστικής αλυσίδας. Μέχρι σήμερα, το Hyperledger Fabric έχει χρησιμοποιηθεί αποκλειστικά από ιδιωτικές εταιρείες, γεγονός που το καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλο για επιχειρηματικές εφαρμογές, στις οποίες κύρια ευθύνη είναι η εμπιστευτικότητα, η υψηλή απόδοση και ο αυστηρός έλεγχος (Devi & Voola, 2023).

Στη συνέχεια, αναλύουμε ορισμένα ενδεικτικά έργα που έχουν στηριχθεί στο Hyperledger Fabric για την ενσωμάτωση της blockchain στην αλυσίδα εφοδιασμού.

4.3.1.1.1 IBM Food Trust

Η International Business Machines Corporation (IBM), ιδρύθηκε το 1911 και αποτελεί πολυεθνική αμερικανική εταιρεία τεχνολογίας. Παρακολουθώντας και συμμερίζοντας τις εξελίξεις της βιομηχανίας, και ειδικότερα της τεχνολογίας blockchain, η IBM σε συνεργασία με τις Walmart, Carrefour και άλλους συνεργάτες, ανέπτυξαν το έργο IBM Food Trust³⁷ Blockchain, για την αντιμετώπιση των προβλημάτων στην εφοδιαστική αλυσίδα τροφίμων, έχοντας ως βασική προϋπόθεση την ενίσχυση της ιχνηλασιμότητας και της ασφάλειας των τροφίμων από τον παραγωγό έως τον λιανο - έμπορο και τον τελικό καταναλωτή. Η τεχνολογία αυτή έχει ήδη εφαρμοστεί με επιτυχία σε περιπτώσεις όπως είναι η ιχνηλασιμότητα χοιρινού κρέατος στην Κίνα και μάνγκο στις ΗΠΑ (Xu et al., 2020).

Η λύση της τεχνολογίας blockchain στην IBM θεμελιώνεται στο HyperLedger Fabric, όπου διαθέτει αρθρωτή αρχιτεκτονική (modular architecture) και plug-and-play στοιχεία, όπως για παράδειγμα υπηρεσίες μελών πιστοποίησης ή μηχανισμούς συναίνεσης. Αυτή η λύση επιτρέπει στους ενδιαφερόμενους να καταγράφουν δεδομένα σε κάθε στάδιο του κύκλου ζωής του προϊόντος, εξασφαλίζοντας ορατότητα σε πραγματικό χρόνο και ταχύτερη ανταπόκριση σε περίπτωση μόλυνσης. Με αυτό το τρόπο μειώνεται ο χρόνος που απαιτείται για την ιχνηλάτηση των προϊόντων από αρκετές μέρες σε μόλις λίγα δευτερόλεπτα, ενώ παράλληλα χάριν στα ιδιωτικά κανάλια επικοινωνίας (private channels) διατηρείται η ιδιοκτησία και ο έλεγχος των πληροφοριών από κάθε συμμετέχοντα του δικτύου (Kamath, 2018).

Το έργο IBM Food Trust διαθέτει ένα σύνολο λειτουργιών, μεταξύ των οποίων είναι οι εξής:

³⁷ IBM Food Trust

- *Ιχνηλασιμότητα (Traceability)*: Δίνεται η δυνατότητα ανάχνευσης της προέλευσης του προϊόντος μέσω της άμεσης πρόσβασης σε δεδομένα της αλυσίδας. Επιπλέον, παρουσιάζονται στοιχεία τοποθεσίας και κατάστασης του προϊόντος, βοηθώντας έτσι στην άμεση ανάκλαση σε περίπτωση προβλήματος.
- *Ορατότητα (Visibility)*: Παρέχεται ορατότητα των αποθεμάτων σε όλη την αλυσίδα. Με την ταχεία εμφάνιση του χρόνου παραγωγής έως τη λήξη, ευνοείται ο εντοπισμός υψηλών κινδύνων. Με αυτό το τρόπο οι προμηθευτές μπορούν να βελτιώνουν την αρχική κατάσταση των προϊόντων και να μειώνουν τις απώλειες.
- *Πιστοποιήσεις (Certifications)*: Ψηφιοποιούνται κρίσιμα έγγραφα, όπως πιστοποίησης και επιθεώρησης, ενισχύοντας έτσι την προέλευση, τη διαχείριση πληροφοριών και την αυθεντικότητα.

Πέρα από τα θετικά όμως χαρακτηριστικά που παρέχει η blockchain, στοιχεία όπως το “ποιος κατέχει τι” και “ποιος πραγματοποιεί τι”, δεν παύουν να προκαλούν προβλήματα στο μέγεθος αποθήκευσης του όγκου των πληροφοριών. Με άλλα λόγια, η εφοδιαστική αλυσίδα μπορεί να γίνει πιο περίπλοκη και ο όγκος των δεδομένων να αυξάνεται σε ραγδαίο βαθμό. Παρατείνεται λοιπόν πως η blockchain από μόνο της δεν επαρκεί για την επίλυση του προβλήματος αυτού, καταφεύγοντας έτσι σε πιο αποτελεσματικούς τρόπους, όπως τον συνδυασμό της blockchain με κατακευματισμένη αποθήκευση. Υπό το πρίσμα αυτό, η blockchain δεν αποθηκεύει τα ίδια τα δεδομένα, αλλά δείκτες (π.χ. κρυπτογραφικά hashes) που παραπέμπουν σε αυτά και τηρούνται σε κατακευματισμένα συστήματα αποθήκευσης. Με αυτή τη τεχνική προσέγγιση εξασφαλίζεται η ακεραιότητα και η χρονική σήμανση του περιεχομένου, χωρίς να επιβαρύνεται το δίκτυο με τεράστιους όγκους δεδομένων. Έτσι οι συναλλαγές θα μπορούν να είναι πιο διαχειρίσιμες και να υπάρχει υποστήριξη και σε μεγάλης κλίμακας δεδομένα (Kawaguchi, 2019).

4.3.1.1.2 TradeLens

Το TradeLens³⁸ είναι ένα ακόμα φιλόδοξο έργο που αξιοποιεί την τεχνολογία blockchain με σκοπό την ψηφιοποίηση της παγκόσμιας εφοδιαστικής αλυσίδας διακίνησης εμπορευματοκιβωτίων. Πρόκειται για ένα έργο που αναπτύχθηκε από κοινού από την IBM και τη Maersk έχοντας ως κοινό όραμα την ψηφιοποίηση της διασυνοριακής συνεργασίας σχετιζόμενη με την ναυτιλία. Το 2013, τέθηκαν σε εφαρμογή οι πρωτοβουλίες για μια εμπορική λύση, στηριζόμενη στην τεχνολογία blockchain, επιδιώκοντας τη δημιουργία μια σημαντικής επιχειρηματικής αξίας στον ναυτιλιακό τομέα (Jensen et al., 2019). Παλαιότερα, μια απλή διαδικασία αποστολής ψυγμένων προϊόντων, θα μπορούσε να περάσει από 30 άτομα και οργανισμούς, με πάνω από 200 αλληλεπιδράσεις και επικοινωνίες. Με τη βοήθεια της blockchain, η ψηφιοποίηση των εγγράφων σχετιζόμενων με το εμπόριο και τη διοίκηση, εκτιμάται ότι μπορεί να μειώσει το πραγματικό κόστος μεταφοράς κατά 80% (Zhang et al., 2019).

Το έργο TradeLens, βασισμένο στο Hyperledger Fabric, δίνει τη δυνατότητα διαμοιρασμού κρίσιμων εγγράφων και δεδομένων, με ασφαλή, αποκεντρωμένο και

³⁸ TradeLens

επαληθεύσιμο τρόπο. Ο στόχος της είναι να εξελίξει τη διαφάνεια — προσφέροντας ορατότητα από άκρη σε άκρη — την εμπιστευτικότητα και την αποτελεσματικότητα ανάμεσα σε μέλη ενός πολύπλοκου οικοσυστήματος που περιλαμβάνει τελωνειακές διαδικασίες, εισαγωγές και εξαγωγές, λιμάνια και μεταφορείς. Επιπλέον, με την επιδίωξη δημιουργίας ενός ενιαίου ψηφιακού περιβάλλοντος επικοινωνίας, της μείωσης του κόστους γραφειοκρατίας, της δομημένης ροής δεδομένων, της αυτοματοποίησης των συναλλαγών μεταξύ των μερών και της πληροφόρησης σε πραγματικό χρόνο, το έργο θέτει τις βάσεις για μια καινοτομία βασισμένη στα δεδομένα (Jovanovic et al., 2022).

Για παράδειγμα, η Maersk και η UPS, χρησιμοποιούν τη blockchain για να απλοποιήσουν τις τελωνειακές διαδικασίες, να μειώσουν τη γραφειοκρατία και να βελτιώσουν την ορατότητα των φορτίων (cargo visibility) καθ' όλη τη διάρκεια της εφοδιαστικής αλυσίδας. Αισθητήρες IoT ενσωματωμένοι σε εμπορευματοκιβώτια παρέχουν ενημερώσεις σε πραγματικό χρόνο σχετικά με τη θερμοκρασία, την τοποθεσία και την κατάσταση, τροφοδοτώντας τα δεδομένα απευθείας στη blockchain (Musa et al., 2014).

Παρά τις καινοτομίες που διαθέτει το TradeLens, χρειάζεται να έρθει αντιμέτωπο και με σημαντικές προκλήσεις, όπως η διστακτικότητα των μελών να συμμετάσχουν σε ένα σύστημα υπό την ηγεσία της Maersk, οι αυστηρές ρυθμιστικές απαιτήσεις φυσικών εγγράφων — οι αρχές διαφόρων κρατών ίσως να μην δέχονται ψηφιακά έγγραφα — και το φαινόμενο του “διπλού δικτύου” (double-network effect) (Jensen et al., 2019). Ο όρος αυτός, παραπέμπει στην ανάγκη παράλληλης συμμετοχής τόσο των μεταφορέων όσο και των λιμένων ή τελωνειακών αρχών, ώστε το έργο να αποδίδει τα πλήρη οφέλη της, καθώς η απουσία μίας από τις δύο πλευρές μπορεί να επιβραδύνει την υιοθέτηση της λύσης από κρίσιμους συμμετέχοντες της εφοδιαστικής.

4.3.1.2 Πλατφόρμες *Ethereum & Quorum* και Σχετικές Εφαρμογές

Το Ethereum αποτελεί ένα αποκεντρωμένο σύστημα blockchain ανοιχτού κώδικα του οποίου η δημοτικότητα οφείλεται στην ευελιξία του και στη μεγάλη κοινότητα προγραμματιστών. Τα βασικά χαρακτηριστικά που υποστηρίζει είναι η παροχή ενός αφηρημένου επιπέδου λειτουργίας (abstract layer), το οποίο επιτρέπει στον κάθε χρήστη να ορίσει δικούς του κανόνες ιδιοκτησίας μέσω της χρήσης των έξυπνων συμβολαίων (smart contracts) και επιπλέον παρέχει τη δυνατότητα ανάπτυξης αποκεντρωμένων εφαρμογών (Vujičić et al., 2018). Αυτά τα χαρακτηριστικά το καθιστούν κατάλληλο για εφαρμογές που αφορούν την ιχνηλασιμότητα, την παροχή κινήτρων βάσει tokens και τις συναλλαγές που σχετίζονται με την εφοδιαστική αλυσίδα. Ωστόσο, τα ζητήματα κλιμακωσιμότητας και τα τέλη συναλλαγών σε έργα της εφοδιαστικής αλυσίδας έχουν οδηγήσει ορισμένους επιχειρηματικούς χρήστες να υιοθετήσουν διακλαδώσεις με άδεια (permissioned blockchain forks) που προσφέρουν καλύτερη απόδοση και προστασία των δεδομένων (Zutshi et al., 2021).

Το Quorum³⁹, είναι ένα πρωτόκολλο καταναμεμένου καθολικού (distributed ledger protocol) ανοιχτού κώδικα που υποστηρίζεται από την ConsenSys. Πρόκειται για μια παραλλαγή (fork) του Ethereum που προσφέρει τη δυνατότητα δημιουργίας ιδιωτικών (permissioned) δικτύων blockchain, παρέχοντας έτσι ελεγχόμενη πρόσβαση στα δεδομένα και

³⁹ Quorum

τα έξυπνα συμβόλαια (Melissari et al., 2024). Το έργο σχεδιάστηκε για να καλύπτει βασικές απαιτήσεις στο πλαίσιο του *permissioned blockchain*: (I) την υλοποίηση ιδιωτικών συναλλαγών και έξυπνων συμβολαίων, (II) την υιοθέτηση διαφορετικών μηχανισμών συναίνεσης και (III) την ευέλικτη και αναλυτική διαχείριση δικαιωμάτων πρόσβασης στο δίκτυο (Mazzoni et al., 2021). Αρκετά έργα εφοδιαστικής αλυσίδας χρησιμοποίησαν αυτήν την παραλλαγή με άδεια πρόσβασης, καθώς η αξιοπιστία του Quorum επιτρέπει υψηλά επίπεδα ιδιωτικότητας, όπως η αποκεντρωμένη διαχείριση δεδομένων, η ιχνηλασιμότητα των προϊόντων και η κλιμακωσιμότητα, ενώ παράλληλα διατηρείται η συμβατότητα με το οικοσύστημα του Ethereum. Ορισμένα ενδεικτικά από τα έργα αυτά αναλύονται παραπάνω.

4.3.1.2.1 MediLedger

Το MediLedger⁴⁰ είναι το πρώτο ομότιμο (Peer-to-Peer) δίκτυο στην φαρμακευτική βιομηχανία. Θεσπίζει ένα σύνολο θεμελιακών στοιχείων πρωτοκόλλων (Protocol Primitives), τα οποία επιτρέπουν στον φαρμακευτικό κλάδο την ευκολότερη ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ οργανισμών στο τομέα της υγείας. Το δίκτυο υποστηρίζεται από την τεχνολογία blockchain ώστε να εκτελούνται δια-οργανωσιακές επιχειρησιακές διαδικασίες και να επικυρώνονται τα μηνύματα που ανταλλάσσονται μεταξύ των συμμετεχόντων. Ο στόχος της είναι η εξασφάλιση της εμπιστευτικότητας των ιδιωτικών δεδομένων, η δυνατότητα κλιμακωσιμότητας, η καθιέρωση επιχειρησιακών διαδικασιών μεταξύ οργανισμών και τέλος η παροχή αναφορών υλοποίησης των προδιαγραφών για ευκολότερη υιοθέτηση και ενσωμάτωση (Greco et al., 2018).

Πρωταρχικός ρόλος στην φαρμακευτική εφοδιαστική αλυσίδα είναι η καταπολέμηση των παραποιημένων φαρμάκων και στην συνέχεια η διασφάλιση της συμμόρφωσης με τους κανονισμούς. Η αξιοποίηση της τεχνολογίας Quorum, δίνει το πλεονέκτημα στο MediLedger να ανιχνεύει και να επαληθεύει τα φαρμακευτικά προϊόντα σε πραγματικό χρόνο — καταπολεμώντας πλαστά προϊόντα — καθώς και να επιτυγχάνει την εγκεκριμένη σειριοποίηση φαρμάκων, την εξάλειψη μεσαζόντων — γεγονός που μειώνει τα κόστη και ενισχύει την εμπιστευτικότητα των μελών — και τη συμμόρφωση με τους νόμους. Παρόλα αυτά, συναντώνται προκλήσεις, όπως η έλλειψη προτύπων, η ανάγκη ενσωμάτωσης με legacy συστήματα και η απαιτούμενη υπολογιστή ισχύ σε μεγάλης κλίμακας δίκτυα. Όμως, η έως τώρα εμπειρία του MediLedger με τη βοήθεια της τεχνολογίας blockchain, υπόσχεται ένα μέλλον με ασφάλεια και διαφάνεια στις φαρμακευτικές αλυσίδες εφοδιασμού (Zakari et al., 2022).

4.3.1.2.2 TE-FOOD & Provenance

Η αναγκαιότητα για την διαφάνεια και την ιχνηλασιμότητα των προϊόντων στην εφοδιαστική αλυσίδα, έχει οδηγήσει στην ανάπτυξη blockchain πλατυσίων που προσφέρουν αξιόπιστη τεκμηριωμένη προέλευση, ιδιοκτησία και μεταφορά (Cui et al., 2019).

⁴⁰ [MediLedger](#)

Το TE-FOOD⁴¹ και το Provenance⁴² είναι δύο καινοτόμες εφαρμογές που εστιάζουν στον αγροδιατροφικό τομέα και έχουν αναπτυχθεί για να προσφέρουν διαφάνεια και ασφάλεια κατά τη διαδρομή των προϊόντων από τον παραγωγό έως τον καταναλωτή, αξιοποιώντας την δυνατότητα της τεχνολογία blockchain. Μέσω της ενίσχυσης της ιχνηλασιμότητας από άκρη σε άκρη (end-to-end record), ενδυναμώνεται η εμπιστοσύνη στην εφοδιαστική αλυσίδα των τροφίμων (Antonucci et al., 2019).

Το έργο TE-FOOD, αποτελεί την πιο ολοκληρωμένη λύση ιχνηλασιμότητας κατά μήκος όλης της εφοδιαστικής αλυσίδας. Βασίζεται στο FoodChain, ένα δημόσιο permissioned blockchain που αναπτύχθηκε πάνω στο δίκτυο Ethereum και επιτρέπει στις επιχειρήσεις, στους καταναλωτές και στις αρχές να παρακολουθούν τη διαδικασία καταγραφής και επαλήθευσης δεδομένων. Αξιοποιεί τεχνολογίες, όπως το Radio Frequency Identification (RFID) και τα barcodes, προκειμένου να αυξήσει την διαφάνεια και την ιχνηλασιμότητα και να διασφαλίσει την συμμόρφωση με τους κανονισμούς εξαγωγών. Για παράδειγμα, χρησιμοποιεί το Ethereum σε συνδυασμό με το RFID για την ιχνηλάτηση κρέατος και ζώων στη Νοτιοανατολική Ασία, προσφέροντας στους καταναλωτές ένα διαφανές ιστορικό των τροφίμων που καταναλώνουν. Επιπρόσθετα, παρέχει λύσεις για περιβάλλοντα B2B, B2C και B2A, ενισχύοντας την εμπιστοσύνη των καταναλωτών και εξασφαλίζει σε περίπτωση προβλήματος ταχεία ανάκληση προϊόντος. Παρά τα οφέλη που προσφέρει, αντιμετωπίζει και περιορισμούς, όπως η χαμηλή ταχύτητα των συναλλαγών λόγω του token TFD του δικτύου Ethereum (~15 συναλλαγές/sec), καθώς και προκλήσεις, όπως ο ανταγωνισμός από άλλες εταιρείες ιχνηλασιμότητας, όπως οι WABI και MOD (Gangwar & Rupain, 2024).

Από την άλλη πλευρά, το έργο Provenance επικεντρώνεται στη δημιουργία “ψηφιακών διαβατηρίων”, δηλαδή μοναδικών αναγνωριστικών (identifications, ID’s) για κάθε προϊόν, συνδέοντας τα απευθείας με τις πληροφορίες και το ιστορικό τους. Βασιζόμενο κυρίως στη πλατφόρμα Ethereum, ενώ σε επιχειρησιακές εκδοχές, για λόγους ιδιωτικότητας, αξιοποιεί και το Quorum, το Provenance κατορθώνει την πλήρη ιχνηλασιμότητα και διαφάνεια στην εφοδιαστική αλυσίδα καταγράφοντας δεδομένα σχετικά με την προέλευση, τη συγκομιδή, τη μεταποίηση και τη διανομή. Μέσω των RFID και QR codes, οι καταναλωτές μπορούν να έχουν άμεση πρόσβαση σε πληροφορίες που σχετίζονται με την προέλευση, τη μεταφορά και τη συσκευασία των προϊόντων (Cole et al., 2019). Ένα παράδειγμα εφαρμογής αποτελεί η ιχνηλασιμότητα των ψαριών από τη στιγμή της αλίευσης τους μέχρι την πώληση τους σε πακέτα κονσέρβας, με στόχο την αποτροπή της απάτης και την ενίσχυση της βιωσιμότητας. Ωστόσο, η ανάγκη διαλειτουργικότητας και η εξάρτηση από την ακρίβεια των εισερχόμενων πληροφοριών — διότι η blockchain αποθηκεύει τις πληροφορίες όπως εισάγονται χωρίς τη δυνατότητα αξιολόγησης — παραπέμπει σε προκλήσεις και ανταγωνισμούς (Galvez et al., 2018).

⁴¹ TE-FOOD

⁴² Provenance

4.3.1.3 Πλατφόρμα VeChain και Εφαρμογή

Το VeChain⁴³ αποτελεί μια από τις πρώτες πλατφόρμες blockchain που σχεδιάστηκαν και αναπτύχθηκαν αποκλειστικά για επιχειρηματικές εφαρμογές στον τομέα της διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας. Ιδρύθηκε το 2015 από τον Sunny Lu και βασίστηκε πάνω στο Ethereum για την ανάπτυξη της. Ωστόσο το 2018, πραγματοποιήθηκε μια μετάβαση σε δικό της blockchain δίκτυο με όνομα VeChainThor, αποχωρώντας έτσι από το Ethereum. Ο κύριος στόχος του έργου VeChain είναι η εξασφάλιση της ποιότητας των προϊόντων (πιστοποιητικά), η παρακολούθηση της παραγωγής (ιχνηλασιμότητα) και η αποτροπή απομιμήσεων (αυθεντικότητα), αποθηκεύοντας τα δεδομένα του κάθε προϊόντος στην αλυσίδα blockchain. Ιδιαίτερο χαρακτηριστικό του είναι η παρακολούθηση των αποτυπωμάτων άνθρακα. Λόγω της αυξανόμενης ρύπανσης, επιδιώκει να αντιμετωπίσει το πρόβλημα μέσω καταγραφής των δεδομένων ρύπων σε blockchain, με τη συμμετοχή τρίτων φορέων πιστοποίησης, προσδίδοντας διαφάνεια και αξιοπιστία (She, 2022).

Το VeChain παρέχει μια εξατομικευμένη λύση για την αυθεντικοποίηση των προϊόντων και τη διαφάνεια της εφοδιαστικής αλυσίδας, ιδίως στον τομέα των πολυτελών αγαθών, του λιανικού εμπορίου και των φαρμακευτικών προϊόντων. Η εγγενής υποστήριξη του για την ενσωμάτωση κωδικών RFID, NFC και QR επιτρέπει τη σύνδεση φυσικών προϊόντων με ψηφιακές ταυτότητες στη blockchain, προσφέροντας μια αδιάβλητη μέθοδο για την εξασφάλιση της ακεραιότητας και της ιχνηλασιμότητας. Εταιρείες, όπως η Givenchy και η H&M, αξιοποιούν το έργο για την καταπολέμηση της παραποίησης και την προώθηση της διαφάνειας στις πρακτικές προμήθειας και παραγωγής (Yu et al., 2018), ενώ αντίστοιχα τόσο οι πολυτελείς μάρκες — που συχνά υφίστανται ζημιές στη φήμη και οικονομικές απώλειες λόγω της πλαστογράφησης — όσο και ο φαρμακευτικός κλάδος, χρησιμοποιώντας την απόδοση μοναδικών ψηφιακών ταυτοτήτων στα προϊόντα, επιτρέπουν στους πελάτες να πιστοποιούν τις αγορές τους και να ελέγχουν την πλήρη διαδρομή του προϊόντος (Solanki & Brewster, 2025).

Παρά το δυναμικό του, το VeChain παρουσιάζει και ορισμένες προκλήσεις. Η κεντρική αρχιτεκτονική του μπορεί να επιφέρει μείωση της ασφάλειας και κινδύνους στη λειτουργικότητά του με αποτέλεσμα να προκληθεί μέχρι και διακοπή. Επίσης, η μεγάλη διασπορά του σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς αυξάνει το κόστος προσαρμογής και δυσκολεύει την εξειδίκευση. Επιπλέον, το κάθε κράτος θεσπίζει τις δικές τους νομοθεσίες και αυτό μπορεί επιφέρει προβλήματα στην αξιοπιστία των πληροφοριών. Για παράδειγμα η Κίνα, μπορεί να επηρεάσει την διαφάνεια των παρεχόμενων δεδομένων καθώς αυτά περιορίζονται από νόμους και πολιτικές. Τέλος, ο ανταγωνισμός από άλλες αποκεντρωμένες πλατφόρμες ενδεχομένως να εμποδίζει την παγκόσμια επέκταση του (She, 2022).

4.3.2 Δυνατότητα Ενσωμάτωσης με IoT και Τεχνητή Νοημοσύνη

Όσο περνούν τα χρόνια ο κόσμος μεταμορφώνεται και μαζί του εξελίσσεται και η τεχνολογία, φέρνοντας στην επιφάνεια νέες καινοτομίες που κάνουν τη ζωή πιο απλή και λειτουργική σε διάφορους τομείς όπως αυτή των επιχειρήσεων αλλά και οργανισμών.

⁴³ VeChain

Η σύνδεση της blockchain με τεχνολογίες, όπως του Διαδικτύου των Πραγμάτων και της Τεχνητής Νοημοσύνης, αναδεικνύεται ως ένας κρίσιμος κόμβος για τη δημιουργία έξυπνων και βιώσιμων συνεργατικών δικτύων στη βιομηχανία. Μέσω των έξυπνων συσκευών IoT (π.χ. αισθητήρες), κατορθώνεται η καταγραφή και συλλογή συνεχόμενων δεδομένων σε πραγματικό χρόνο από τα διάφορα περιβάλλοντα και η αποθήκευσή τους σε κατανεμημένα καθολικά (blockchains). Στη συνέχεια, τα δεδομένα αυτά, με τη χρήση της ΤΝ μπορούν να αναλυθούν με ακρίβεια και να εντοπιστούν τυχόν προβλήματα, να γίνει πρόβλεψη συμβάντων, να υπάρξει βελτιστοποίηση λειτουργιών ή ακόμη και η δημιουργία αυτοματοποιημένων αποφάσεων. Αυτό το τρίπτυχο (IoT-Blockchain-TN), διαμορφώνει ένα δίκτυο νοημοσύνης που οδηγεί σε πιο διαφανή, ανθεκτικά και αποδοτικά δίκτυα, ειδικά σε τομείς, όπως η παραγωγή και η εφοδιαστική αλυσίδα (Mrabti et al., 2021; Venuta et al., 2021).

Καθώς επιδιώκεται η ανάγκη για αποτελεσματικότητα, διαφάνεια και καινοτομία, η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας διασταυρώνεται με πρωτοποριακές τεχνολογίες αιχμής, αναδιαμορφώνοντας το τοπίο του εμπορίου. Η συγχώνευση του IoT και της ΤΝ σε συνδυασμό με την τεχνολογία blockchain, δημιουργεί ένα νέο πρότυπο εφοδιαστικής αλυσίδας που έχει την δυναμική να μεταμορφώσει πλήρως τον τρόπο με τον οποίο ελέγχονται, παρακολουθούνται και διακινούνται τα προϊόντα. Η σύνθεση αυτή, εξασφαλίζει την ακεραιότητα των δεδομένων, προσφέροντας στους καταναλωτές αλλά και στις επιχειρήσεις ένα σύστημα που βασίζεται στην εμπιστοσύνη, την ακρίβεια και την βιωσιμότητα (Vijaykumar et al. 2024).

Στην παρούσα ενότητα εξετάζεται η ενσωμάτωση της τεχνολογίας blockchain με αυτές τις συμπληρωματικές τεχνολογίες που ενισχύουν την λειτουργικότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας. Στην πρώτη Ενότητα 4.3.2.1, αναλύεται η εφαρμογή του IoT σε συνδυασμό με τη blockchain για τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο, κ.α., και στην συνέχεια η δεύτερη Ενότητα 4.3.2.2 εστιάζει στη χρήση της ΤΝ για προγνωστική συντήρηση, ασφάλεια και άλλες λειτουργίες, παρέχοντας μια ενοποιημένη εικόνα των προνομιών που προκύπτουν από τον συνδυασμό των τεχνολογιών με τη blockchain.

4.3.2.1 Διαδίκτυο των Πραγμάτων (Internet of Things, IoT)

Το Διαδίκτυο των Πραγμάτων είναι ένας όρος που περιγράφει την σύνδεση αντικειμένων με το διαδίκτυο, επιτρέποντας να επικοινωνούν μεταξύ τους και να ανταλλάσσουν δεδομένα. Πρακτικά το IoT βοηθάει στην ενοποίηση του φυσικού κόσμου με τον ψηφιακό. Αυτό γίνεται λόγω της ανάπτυξης τεχνολογιών, όπως το RFID, το NFC και τα ασύρματα δίκτυα. Πλέον, η ενσωμάτωση της ΤΝ στις λύσεις IoT, και όχι απαραίτητα στις ίδιες τις συσκευές, αποτελεί θεμελιώδη στοιχείο στην εξέλιξη και αξιοποίηση της τεχνολογίας σε διάφορους τομείς, όπως της εφοδιαστικής αλυσίδας (Ozmen & Bora, 2023).

Η ένωση της τεχνολογίας IoT με τη blockchain αναβαθμίζει ουσιαστικά τη λειτουργία της εφοδιαστικής αλυσίδας μέσω αισθητήρων, που συλλέγουν κρίσιμα δεδομένα όπως — θερμοκρασία, τοποθεσία, υγρασία, κατάσταση προϊόντος κατά τη μεταφορά ή αποθήκευση — τα οποία είναι ιδιαίτερα χρήσιμα σε τομείς, όπως η φαρμακευτική βιομηχανία (Sodhi et al., 2022).

Στη συνέχεια αυτά τα δεδομένα καταγράφονται με αμετάβλητο τρόπο στην αλυσίδα blockchain, εξασφαλίζοντας πλήρες ιστορικό, ορατότητα σε πραγματικό χρόνο και αποδείξεις

συμμόρφωσης με κανονιστικά πλαίσια. Μερικά από τα βασικά πλεονεκτήματα αυτής της τεχνολογικής προσέγγισης είναι τα εξής (Casino et al. 2019):

- Η εφαρμογή έξυπνων συμβολαίων για την αυτοματοποίηση πληρωμών, παραγγελιών και ειδοποιήσεων,
- Η αποκέντρωση της πληροφορίας, μειώνοντας την ανάγκη για μεσάζοντες,
- Η ενισχυμένη ιχνηλασιμότητα και ροή των αγαθών,
- Η παροχή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο,
- Η ενεργοποίηση προγνωστικής συντήρησης και προληπτικών παρεμβάσεων,
- Η ενίσχυση της συνεργασίας μεταξύ των εταίρων.

Παράδειγμα χρήσης του IoT στην εφοδιαστική είναι το Modum.io που χρησιμοποιεί έξυπνους αισθητήρες σε συνδυασμό με το Ethereum για την παρακολούθηση της θερμοκρασίας των φαρμακευτικών αποστολών και την αυτόματη ενεργοποίηση ειδοποιήσεων σε περίπτωση αποκλίσεων, διασφαλίζοντας την ακεραιότητα του προϊόντος κατά τη μεταφορά (Charles et al., 2023). Το OpenSC⁴⁴, με την υποστήριξη της Nestlé, αξιοποιεί την blockchain για ηθική προμήθεια, καταγράφοντας δεδομένα σχετικά με τις εργασιακές πρακτικές, το αποτύπωμα άνθρακα και την προέλευση των πόρων. Το σύστημα πραγματοποιεί διασταύρωση των δεδομένων (αρχείων) blockchain, συσκευών IoT και δορυφόρων για να διασφαλίσει ότι οι προμηθευτές πληρούν τα πρότυπα βιωσιμότητας και συμμόρφωσης (Schilhabel et al., 2023).

4.3.2.2 Τεχνητή Νοημοσύνη (Artificial Intelligence, AI)

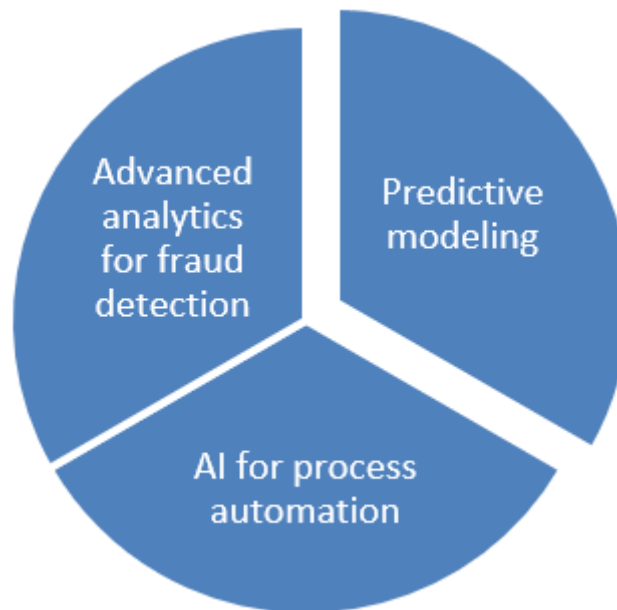
Η Τεχνητή Νοημοσύνη (TN) χρησιμοποιείται για τη δημιουργία έξυπνων μηχανών που λειτουργούν σαν άνθρωποι. Οι αλγόριθμοι στους οποίους βασίζεται, αναπτύσσονται με τρόπο ώστε να βοηθούν στη λήψη αποφάσεων, παρέχοντας προτάσεις, προβλέψεις ή κατηγοριοποιήσεις μετά από ανάλυση δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Ουσιαστικά υλοποιούν λειτουργίες που "αγγίζουν" την ανθρώπινη νοημοσύνη. Ο συνδυασμός της με την τεχνολογία blockchain, μπορεί να μεταμορφώσει τις εφοδιαστικές αλυσίδες προσφέροντας προηγμένες δυνατότητες στην πρόβλεψη της ζήτησης, την καλύτερη διαχείριση των πόρων και τη βελτίωση της βιωσιμότητας (Aditya et al., 2024).

Η TN εφαρμόζεται όλο και περισσότερο παράλληλα με τη blockchain για τη βελτιστοποίηση των λειτουργιών της εφοδιαστικής αλυσίδας. Οι αλγόριθμοι TN αναλύουν τα δεδομένα της blockchain για την πρόβλεψη της ζήτησης, την ανίχνευση ανωμαλιών και τη βελτιστοποίηση των διαδρομών (Gohil & Thakker, 2021).

Πιο συγκεκριμένα, στις εφοδιαστικές αλυσίδες διαμορφώνει πλήρως τον τρόπο κατά τον οποίο οι επιχειρήσεις διαχειρίζονται τις λειτουργίες τους. Τεχνολογίες όπως η μηχανική μάθηση (Machine Learning, ML) και η προγνωστική ανάλυση (predictive analytics) χρησιμοποιούνται ολοένα και περισσότερο για την ανίχνευση της απάτης και την πρόβλεψη οικονομικών αποκλίσεων. Καθώς οι εφοδιαστικές αλυσίδες γίνονται πιο περίπλοκες, η χρήση της TN για τέτοιου είδους εργασίες είναι κρίσιμη για τη βελτίωση της ασφάλειας και της

⁴⁴ OpenSC

αποδοτικότητα των συναλλαγών. Παρακάτω η εικόνα παρουσιάζει την αναγκαιότητα της χρήσης της TN στις εφοδιαστικές αλυσίδες (Ogunyankinnu et al., 2022).



Εικόνα 11: Η σημαντικότητα της Τεχνητής Νοημοσύνης στο πεδίο της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Η TN μπορεί να κατοχυρώσει την ακεραιότητα, τη διαφάνεια και την ιχνηλασιμότητα των δεδομένων που μοιράζονται οι συμμετέχοντες μεταξύ τους. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί το εργαλείο IBM Watson Studio⁴⁵, το οποίο βελτιώνει την επιμελητεία συνδυάζοντας την TN με την blockchain. Ειδικότερα, χρησιμοποιεί ιστορικά δεδομένα καιρού και τοποθεσίας ώστε να γίνει πρόβλεψη τυχόν καθυστερήσεων καθώς και διασφαλίζει την αξιοπιστία των πληροφοριών καταγράφοντας τα στη blockchain. Αξίζει να αναφερθεί πως η TN έχει επίσης τη δυνατότητα να εντοπίζει πιθανά σφάλματα μέσα στα έξυπνα συμβόλαια και να συμβάλλει στην πρόληψη κυβερνοεπιθέσεων, ενώ παράλληλα μπορεί να στηρίζει την λήψη αποφάσεων που βασίζονται σε μεγάλα ετερογενή σύνολα δεδομένων που είναι προς ανάλυση (Tsolakis et al., 2022).

Μια άλλη συνεργατική πλατφόρμα που αναδεικνύει τις δυνατότητες της TN και της blockchain συνδυαστικά, είναι το Global Shipping Business Network (GSBN)⁴⁶. Με την βοήθεια της ενσωματωμένης TN, το GSBN μπορεί να προβλέψει καθυστερήσεις, να εκτελεί αυτόματες οικονομικές συναλλαγές μέσω των έξυπνων συμβολαίων και να εντοπίζει αναποτελεσματικότητες στην εφοδιαστική αλυσίδα. Αυτό το οικοσύστημα, εγγυάται στα εμπλεκόμενα μέρη την ασφαλή πρόσβαση στα δεδομένα και σε πραγματικό χρόνο, μειώνοντας τις δυνατότητες απάτης και ενισχύοντας την βελτιστοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας (Ogunyankinnu et al., 2022).

Οι ιδιόκτητες πλατφόρμες blockchain, όπως η OpenSC, αν και λιγότερο ανεπτυγμένη σε λεπτομερείς μετρήσεις ιχνηλασιμότητας, συχνά συνδυάζει τη blockchain με τη τεχνητή νοημοσύνη και τα δορυφορικά δεδομένα, την παρακολούθηση της βιωσιμότητας της εφοδιαστικής αλυσίδας ή των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα. Οι προσαρμοσμένες

⁴⁵ IBM. Watson Studio

⁴⁶ Global Shipping Business Network

πλατφόρμες αναπτύσσονται συχνά για να καλύψουν τις συγκεκριμένες ανάγκες συμμόρφωσης και ενσωμάτωσης του κάθε κλάδου (Yu et al., 2018).

Παρότι η συγχώνευση της blockchain και της Τεχνητής Νοημοσύνης προάγει αρκετά πλεονεκτήματα για την ενίσχυση της ασφάλειας, της αποδοτικότητας και της διαφάνειας, οι εφοδιαστικές αλυσίδες αντιμετωπίζουν και σοβαρές προκλήσεις. Για παράδειγμα η ενοποίηση της TN σε υφιστάμενες αλυσίδες εφοδιασμού αποτελεί από μόνη της μια τεχνικά σύνθετη και απαιτητική διαδικασία. Επίσης, οι αλγόριθμοι TN χρειάζονται εκτενή προετοιμασία ώστε να μπορέσουν να παράγουν αξιόπιστες και προγνωστικές αναλύσεις. Αυτό συνεπάγεται ότι τα συστήματα θα πρέπει να επικαιροποιούνται και να εκπαιδεύονται συνεχώς ώστε να παραμένουν αποτελεσματικά στον εντοπισμό νέων ανωμαλιών. Σε γενικό πλαίσιο, η διαδικασία προϋποθέτει επανασχεδιασμό των βασικών λειτουργιών και συστημάτων και αυτό από μόνο του το καθιστά αρκετά σύνθετο και χρονοβόρο, κάτι που οι επιχειρήσεις στοχάζονται διπλά πριν προχωρήσουν σε κάποια ενδεχόμενη υλοποίηση (Kush et al., 2020).

4.4 Σύγκριση

Αυτή η ενότητα παρουσιάζει μια συγκριτική ανάλυση σημαντικών εφαρμογών/έργων που βασίζονται στην blockchain ως προς τη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας. Ο πρωταρχικός στόχος είναι η αξιολόγηση της απόδοσης των επιλεγμένων έργων που αναλύθηκαν στην Ενότητα 4.3 (τα οποία αντλήθηκαν από τις πηγές που συλλέχθηκαν από την βιβλιογραφική ανασκόπηση), χρησιμοποιώντας ένα τυποποιημένο σύνολο κριτηρίων, και η εξαγωγή γνώσεων σχετικά με την αποτελεσματικότητά τους, τους περιορισμούς και τις δυνατότητες κλιμακωσιμότητάς τους. Συγκρίνοντας διάφορες εφαρμογές, μπορούμε να διακρίνουμε ποια έργα έχουν θέσει βιομηχανικά σημεία αναφοράς, την ανάδειξη επίμονων προκλήσεων και την βαθύτερη κατανόηση της εξελισσόμενης δυναμικής στην υιοθέτηση της τεχνολογίας blockchain στις αλυσίδες εφοδιασμού (Cole et al., 2019).

Για να εξασφαλιστεί μια δομημένη και δίκαιη αξιολόγηση, επιλέχθηκαν έξι βασικά κριτήρια με βάση τη συνάφεια που προέρχεται από την ακαδημαϊκή βιβλιογραφία και την πρακτική του κλάδου. Αυτά περιλαμβάνουν την ιχνηλασιμότητα, τη διαφάνεια και την αυθεντικότητα, την ασφάλεια και την ακεραιότητα των δεδομένων, την κλιμακωσιμότητα και την απόδοση, την ευκολία ενοποίησης και υλοποίησης και τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας. Καθένα από αυτά τα κριτήρια συλλαμβάνει μια ουσιαστική διάσταση του ρόλου της blockchain στην αντιμετώπιση κρίσιμων σημείων πόνου στα οικοσυστήματα της εφοδιαστικής αλυσίδας (Famous et al., 2025).

4.4.1 Κριτήρια και Κλίμακα Αξιολόγησης

Η αξιολόγηση των έργων ως προς τα κριτήρια αυτά, πραγματοποιήθηκε με τη χρήση μιας ενιαίας κλίμακας πέντε βαθμίδων, η οποία επιτρέπει την σύγκριση και την ισότιμη μέτρηση των διαφορετικών αναλύσεων.

Παρακάτω παρουσιάζεται η κλίμακα αξιολόγησης:

1. **Καθόλου:** Το έργο δεν ικανοποιεί το κριτήριο.

2. **Χαμηλά:** Υπάρχει περιορισμένη ικανοποίηση του κριτηρίου με αρκετά κενά.
3. **Μέτρια:** Το έργο πληροί το κριτήριο σε καλό βαθμό με ορισμένα περιθώρια βελτίωσης.
4. **Υψηλά:** Το έργο φανερώνει ανεπτυγμένη συμμόρφωση με το κριτήριο με μικρά περιθώρια βελτίωσης.
5. **Πολύ υψηλά:** Το έργο πληροί πλήρως το κριτήριο με βέλτιστες επιδόσεις, αποτελώντας σημείο αναφοράς για την πρακτική.

Στη συνέχεια, περιγράφονται αναλυτικά τα έξι κριτήρια αξιολόγησης και ο τρόπος με τον οποίο εφαρμόζεται σε κάθε ένα από αυτά η ενιαία κλίμακα:

1. Ιχνηλασιμότητα

Η ιχνηλασιμότητα αναφέρεται στην ικανότητα ενός συστήματος να παρακολουθεί τη διαδρομή ενός προϊόντος από την προέλευσή του μέσω κάθε σταδίου της αλυσίδας εφοδιασμού έως τον τελικό του προορισμό.

- *Τρόπος Αξιολόγησης:* Πραγματοποιείται με βάση (α) την αξιοπιστία των δεδομένων, (β) την επικαιρότητα της πληροφόρησης και (γ) το εύρος των σταδίων της αλυσίδας που καλύπτονται.

Στην κλίμακα (1-5) οι τιμές αποδίδονται ως εξής:

- **1:** Πολύ χαμηλή έως και καθόλου ιχνηλασιμότητα, κατακερματισμένα δεδομένα και σημαντικά κενά.
- **2:** Βασική κάλυψη ιχνηλασιμότητας, με ανεπαρκώς αξιόπιστα δεδομένα.
- **3:** Ικανοποιητική κάλυψη των περισσότερων σταδίων με ορισμένες καθυστερήσεις ή ελλείψεις.
- **4:** Αναπτυγμένη κάλυψη σε όλη τη διαδρομή, με μικρά περιθώρια βελτίωσης.
- **5:** Πλήρης κάλυψη, με αξιόπιστα επικαιροποιημένα δεδομένα σε πραγματικό χρόνο (Real Time).

2. Διαφάνεια και Αυθεντικότητα

Η διαφάνεια και η αυθεντικότητα περιλαμβάνουν τον βαθμό κοινοποίησης δεδομένων που σχετίζονται με προϊόντα και συναλλαγές, καθώς και την ικανότητα του συστήματος να επαληθεύει την προέλευση και τον χειρισμό των αγαθών (Blossey et al., 2019).

- *Τρόπος Αξιολόγησης:* Η αποτίμηση πραγματοποιείται με βάση αν το έργο εξασφαλίζει τη καταγραφή και τη δυνατότητα επαλήθευσης προϊόντων και συναλλαγών.

Στην κλίμακα (1-5) οι τιμές αποδίδονται ως εξής:

- **1:** Ελάχιστη έως και καθόλου διαφάνεια, χωρίς επαλήθευση.
- **2:** Βασικοί μηχανισμοί διαφάνειας με μερική επαλήθευση.
- **3:** Ικανοποιητική διαφάνεια με βασική επαλήθευση.

- **4:** Αναπτυγμένη διαφάνεια σε πολλαπλά επίπεδα, με τεκμηριωμένη επαλήθευση γνησιότητας.
- **5:** Πλήρης διαφάνεια προϊόντων και συναλλαγών με πολυεπίπεδη επαλήθευση αυθεντικότητας.

3. Ασφάλεια και Ακεραιότητα

Η ασφάλεια και η ακεραιότητα των δεδομένων σχετίζονται με την ανθεκτικότητα του συστήματος έναντι μη εξουσιοδοτημένης πρόσβασης ή παραβίασης.

➤ *Τρόπος Αξιολόγησης:* Πραγματοποιείται με βάση το επίπεδο μηχανισμών προστασίας δεδομένων, την πληρότητα των μέτρων ασφάλειας που εφαρμόζονται, καθώς και τη συμμόρφωση με τα πρότυπα.

Στην κλίμακα (1-5) οι τιμές αποδίδονται ως εξής:

- **1:** Καμία εφαρμογή πρόσθετων μέτρων ασφάλειας και απλή αξιοποίηση εγγενών ιδιοτήτων της τεχνολογία blockchain.
- **2:** Βασική αξιοποίηση εγγενών ιδιοτήτων της blockchain (π.χ. αμεταβλητότητα, hashing) με περιορισμένη πρακτική εφαρμογή και χωρίς οργανωμένες πολιτικές.
- **3:** Υιοθέτηση βασικών μηχανισμών ασφάλειας (π.χ. έλεγχος πρόσβασης ή βασική κρυπτογράφηση) που μπορούν να καλύψουν βασικές λειτουργικές ανάγκες αλλά με κενά.
- **4:** Ικανοποιητικά μέτρα ασφάλειας (π.χ. ισχυρή κρυπτογράφηση, πολυεπίπεδη ταυτοποίηση), χωρίς πλήρη συμμόρφωση σε διεθνή πρότυπα.
- **5:** Ολοκληρωμένη στρατηγική ασφάλειας, με ισχυρές πολιτικές ταυτοποίησης και ελέγχου πρόσβασης, καθώς και συμμόρφωση με διεθνή πρότυπα.

4. Κλιμακωσιμότητα & Απόδοση

Η κλιμακωσιμότητα και η απόδοση αξιολογούν εάν η λύση blockchain μπορεί να φιλοξενήσει αποτελεσματικά αυξανόμενους όγκους δεδομένων και έναν αυξανόμενο αριθμό συμμετεχόντων, διατηρώντας ταυτόχρονα την ταχύτητα εκτέλεσης των συναλλαγών και την αξιοπιστία της λειτουργίας, καθώς και τη δυνατότητα επέκτασης της αρχιτεκτονικής.

➤ *Τρόπος Αξιολόγησης:* Η τεκμηρίωση της αξιολόγησης αν και ιδανικά βασίστηκε σε δείκτες, όπως οι συναλλαγές ανά δευτερόλεπτο (Transactions Per Second, TPS), ο χρόνος καθυστέρησης (latency) και η απόκριση του συστήματος σε συνθήκες φόρτου (system response under load), καθώς αυτοί δεν αναφέροντουσαν με συνέπεια στη βιβλιογραφία, σε ορισμένα έργα η αποτίμηση έγινε ποιοτικά με βάση την κρίση του συγγραφέα.

Στην κλίμακα (1-5) οι τιμές αποδίδονται ως εξής:

- **1:** Χαμηλή έως και καθόλου απόδοση. Υπάρχει αδυναμία εξυπηρέτησης βασικού όγκου συναλλαγών με πολλές καθυστερήσεις.

- **2:** Βασική λειτουργικότητα με αρκετά περιορισμένη δυνατότητα κλιμάκωσης.
- **3:** Ικανοποιητική λειτουργία. Όταν υπάρχει αύξηση του φόρτου, η απόδοση παρουσιάζει μείωση.
- **4:** Υψηλή απόδοση με μικρές διακυμάνσεις σε αυξημένο φόρτο. Η πτώση της απόδοσης είναι ελεγχόμενη.
- **5:** Παρέχεται υψηλή και σταθερή απόδοση ακόμη και σε συνθήκες μεγάλης κλίμακας, δηλαδή αυξημένου όγκου συναλλαγών και χρηστών.

5. Ενσωμάτωση & Υλοποίηση

Η ευκολία ενσωμάτωσης και υλοποίησης μιας λύσης αντικατοπτρίζει τον βαθμό στον οποίο μπορεί ενταχθεί στις υφιστάμενες τεχνολογικές υποδομές, όπως τα συστήματα ERP και οι συσκευές IoT. Παράλληλα, εξετάζεται το πόσο απαιτητική είναι η υιοθέτηση της σε επίπεδο πόρων.

➤ *Τρόπος Αξιολόγησης:* Η αποτίμηση εξετάζει αν η λύση διαθέτει APIs (Application Programming Interfaces), ακολουθεί πρότυπα διαλειτουργικότητας, συνοδεύεται από επαρκές επίπεδο τεχνικής υποστήριξης και ποιες είναι οι απαιτήσεις των πόρων (π.χ. προσπάθεια προσαρμογής, χρόνος, τεχνική εργασία, κ.α.), ώστε να διασφαλίζεται η ομαλή ενσωμάτωση σε υπάρχον περιβάλλον.

Στην κλίμακα (1-5) οι τιμές αποδίδονται ως εξής:

- **1:** Ελάχιστοι έως και καθόλου μηχανισμοί ενσωμάτωσης. Υπάρχει απουσία τεχνικής υποστήριξης με υψηλές απαιτήσεις προσαρμογών και πόρων.
- **2:** Διατίθενται βασικοί μηχανισμοί ενσωμάτωσης με περιορισμένες δυνατότητες. Υπάρχει μέτρια τεχνική υποστήριξη και οι απαιτήσεις σε προσαρμογές παραμένουν σημαντικές.
- **3:** Ικανοποιητική ενσωμάτωση με επαρκή βασική υποστήριξη, όμως υπάρχουν και περιορισμοί (π.χ. έλλειψη πλήρους αυτοματοποίησης).
- **4:** Υψηλή ενσωμάτωση με εκτενή χρήση APIs και βασική συμβατότητα σε πρότυπα. Υπάρχει καλή τεχνική υποστήριξη, εξαλείφοντας σε ικανοποιητικό βαθμό τις απαιτήσεις σε προσαρμογές.
- **5:** Πλήρης ενσωμάτωση και λειτουργικότητα με εκτεταμένη τεχνική υποστήριξη, ολοκληρωμένη συμβατότητα με πρότυπα και ελάχιστες απαιτήσεις σε πόρους.

6. Κόστος - Αποτελεσματικότητα

Τέλος, η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας αφορά την αναλογία μεταξύ της χρηματοοικονομικής επένδυσης — τόσο αρχικής όσο και συνεχιζόμενης — και των επιχειρησιακών ωφελειών ή της αποδοτικότητας που επιτυγχάνονται με την πάροδο του χρόνου (Saberli, 2019).

- *Τρόπος Αξιολόγησης:* Βασίζεται στην συνεκτίμηση, του αρχικού κόστους (initial cost), των λειτουργικών εξόδων (operational expenses) και της απόδοσης της επένδυσης σε βάθος χρόνου (Return on Investment, ROI).

Στην κλίμακα (1-5) οι τιμές αποδίδονται ως εξής:

- **1:** Πολύ υψηλό κόστος με ελάχιστα επιχειρησιακά οφέλη και αρνητικό ROI.
- **2:** Υψηλό κόστος με περιορισμένα οφέλη, δυσκολεύοντας την απόσβεση της επένδυσης. Αρνητικό ή αβέβαιο ROI.
- **3:** Αποδεκτή σχέση κόστους-οφέλους. Το ROI είναι οριακά θετικό, καλύπτοντας τα βασικά έξοδα σε βάθους χρόνου.
- **4:** Καλή σχέση κόστους-οφέλους. Το ROI είναι σταθερά θετικό, καλύπτοντας όλα τα έξοδα σε βάθος χρόνου και αποδίδοντας μικρό πλεόνασμα, με περιθώρια βελτίωσης.
- **5:** Χαμηλό κόστος σε συνδυασμό με υψηλή απόδοση επένδυσης και σταθερά επιχειρησιακά πλεονεκτήματα, με ισχυρά θετικό ROI.

Πριν την παρουσίαση της συγκριτικής ανάλυσης, αξίζει να σημειωθεί ότι οι πληροφορίες που πρόσφερε η βιβλιογραφία δεν ήταν δυνατόν να είναι σε όλες τις περιπτώσεις ομοιογενείς. Σε ορισμένα έργα, για παράδειγμα, καταγράφονται συγκεκριμένες μετρικές, οι οποίες λήφθηκαν υπόψη κατά την αποτίμηση. Σε άλλα, η τεκμηρίωση ήταν περισσότερο περιγραφική και, επομένως, η αξιολόγηση στηρίχθηκε στην ποιοτική ανάλυση των υπαρχόντων βιβλιογραφικών δεδομένων και περιγραφών, καθώς και στην κριτική σύνθεση των πληροφοριών που προέκυψαν από τις μελέτες, στο μέτρο που αυτές οι πληροφορίες ήταν διαθέσιμες. Και στις δύο περιπτώσεις όμως, η τελική εκτίμηση δόθηκε με βάση την ενιαία κλίμακα αξιολόγησης, ώστε να διασφαλιστεί η συγκρισιμότητα τους.

Επίσης, κρίνεται σκόπιμο να αναφερθεί ότι η ενσωμάτωση τεχνολογιών, όπως αισθητήρες IoT και οι μέθοδοι Τεχνητής Νοημοσύνης, αποτελούν ένα ανερχόμενο και ιδιαίτερα υποσχόμενο πεδίο ενδιαφέροντος στην διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, με σημαντικές προοπτικές. Ωστόσο, στο πλαίσιο της παρούσας εργασίας, οι τεχνολογίες αυτές δεν αποτέλεσαν αντικείμενο συγκριτικής αξιολόγησης, καθώς η μελέτη επικεντρώνεται καθαρά στο “πάντρεμα” της blockchain με τη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας. Η ενσωμάτωση επιπλέον τεχνολογιών, αν και σε ορισμένα έργα παρατηρήθηκε ότι ενισχύει το πάντρεμα και βοηθάει στη μείωση διαφόρων προκλήσεων, θα μπορούσε να αλλοιώσει το σκοπό της έρευνας, που είναι να αναδείξει τις προκλήσεις αυτές. Για τον λόγο αυτό, η διερεύνηση των συμπληρωματικών τεχνολογιών παραπέμπει σε μελλοντικές κατευθύνσεις αντιμετώπισης. Τα στοιχεία που σχετίζονται με την TN και το IoT αναφέρονται θεωρητικά στην Ενότητα 4.3.2, χωρίς να ενταχθούν στους συγκριτικούς πίνακες που ακολουθούν. Παρ’ όλα αυτά, οι σχετικές αναφορές σε ορισμένα έργα, ξεχωρίζουν ως νεωτεριστικοί ηγέτες.

4.4.2 Κατηγοριοποίηση Έργων

Ο Πίνακας 1 παρουσιάζει την κατηγοριοποίηση των έξι επιλεγμένων έργων blockchain με βάση την κύρια λειτουργία τους, το είδος blockchain που χρησιμοποιούν και τον κλάδο

εφαρμογής τους, δηλαδή βάσει των 3 διαστάσεων κατηγοριοποίησης που παρουσιάστηκαν στην Ενότητα 4.2.

Πίνακας 1: Εννοιολογική κατηγοριοποίηση πλατφορμών.

#	Έργα Εφαρμογής	Κύρια Λειτουργία	Είδος Blockchain	Κλάδος Εφαρμογής
1	IBM Food Trust	Ιχνηλασιμότητα, Ορατότητα, Πιστοποίηση	Ιδιωτικό (Private) - HyperLedger Fabric	Αγροδιατροφικός
2	TradeLens	Διαφάνεια φορτίων, Αυτοματοποίηση logistics, Βελτίωση συνεργασίας	Ιδιωτικό (Private) - HyperLedger Fabric	Θαλάσσιες Μεταφορές / Επιμελητεία
3	TE-FOOD	Ιχνηλασιμότητα τροφίμων	Δημόσιο / Permissioned - Ethereum-based	Αγροδιατροφικός
4	Provenance	Διαφάνεια, Πιστοποίηση, Προέλευση	Δημόσιο (Public) - Ethereum	Αγροδιατροφικός / Οικολογικά φιλικά προϊόντα
5	MediLedger	Συμμόρφωση, Πιστοποίηση, Αυθεντικότητα	Ιδιωτικό (Private) - Quorum	Φαρμακευτική
6	VeChain	Αυθεντικότητα, Ιχνηλασιμότητα, Βιωσιμότητα	Κοινοπρακτικό (Consortium) - VeChainThor	Λιανική / Πολυτελή Είδη / κ.α.

Όπως γίνεται φανερό από τον Πίνακα 1, τα περισσότερα έργα δραστηριοποιούνται στον αγροδιατροφικό τομέα, αξιοποιώντας είτε ιδιωτικές είτε δημόσιες πλατφόρμες. Επιπλέον, πλατφόρμες, όπως το Hyperledger Fabric (ιδιωτικό) και το Ethereum (δημόσιο ή παραμετροποιημένο), χρησιμοποιούνται ευρέως, ενώ το VeChain (κοινοπρακτικό) χρησιμοποιείται μόνο σε ένα έργο. Επίσης, με βάση τον κάθε τομέα/κλάδο εφαρμογής και ανάλογα με τις απαιτήσεις του, τείνουν να αξιοποιούνται και διαφορετικές πλατφόρμες blockchain. Για παράδειγμα, η φαρμακευτική βιομηχανία δίνει έμφαση στη συμμόρφωση με τα κανονιστικά πλαίσια, ενώ η λιανική στον έλεγχο ποιότητας των προϊόντων. Παρότι τα παραδείγματα στους αντίστοιχους τομείς είναι περιορισμένα, φανερώνεται πως οι επιλογές πλατφόρμας συνδέονται άμεσα με τις ανάγκες του κάθε κλάδου. Αντίστοιχα, στον αγροδιατροφικό τομέα, όπου καταγράφονται περισσότερα έργα, οι διαφοροποιήσεις αυτές αποτυπώνονται πιο καθαρά.

Σημαντική είναι και η διάσταση των κύριων λειτουργιών των έργων. Αρκετά από αυτά, εστιάζουν κυρίως στην ιχνηλασιμότητα, που είναι μείζον ζήτημα για τις εφοδιαστικές αλυσίδες, την πιστοποίηση και την αυθεντικοποίηση των προϊόντων (π.χ. TE-FOOD, VeChain), ενώ άλλα δίνουν έμφαση στη συνεργασία των μελών της αλυσίδας (π.χ. TradeLens) και στη συμμόρφωση με κανονιστικά πλαίσια και τη βιωσιμότητα. Συνεπώς, παρατηρείται ότι κάθε έργο ιεραρχεί διαφορετικά τις λειτουργίες που αξιοποιεί, προκειμένου να επιτύχει τους εκάστοτε σκοπούς του. Η επιδίωξη αυτή υλοποιείται μέσω της τεχνολογίας blockchain, λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιαιτερότητες του κάθε κλάδου στον οποίο δραστηριοποιείται.

4.4.3 Συγκριτική Αξιολόγηση Έργων

Η συγκριτική αξιολόγηση των έξι εφαρμογών/έργων (Πίνακας 2), διενεργήθηκε με βάση τα έξι καθορισμένα κριτήρια και την κλίμακα αξιολόγησης (1-5), ενώ ο συνολικός δείκτης απόδοσης κάθε έργου υπολογίστηκε ως ο μέσος όρος (Μ.Ο.) των επιμέρους τιμών. Συγκεκριμένα, θεωρείται ότι αν:

- X_{1i} : βαθμολογία για την **Ιχνηλασιμότητα**
- X_{2i} : βαθμολογία για την **Διαφάνεια & Αυθεντικότητα**
- X_{3i} : βαθμολογία για την **Ασφάλεια & Ακεραιότητα**
- X_{4i} : βαθμολογία για την **Κλιμακωσιμότητα & Απόδοση**
- X_{5i} : βαθμολογία για την **Ενσωμάτωση**
- X_{6i} : βαθμολογία για το **Κόστος - Αποτελεσματικότητα**

Τότε, με βάση τα ανωτέρω, ο **Μέσος Όρος (Μ.Ο.)** κάθε έργου i υπολογίζεται ως:

$$MO_i = \frac{X_{1i} + X_{2i} + X_{3i} + X_{4i} + X_{5i} + X_{6i}}{6}$$

όπου ο αριθμητής αντιπροσωπεύει το άθροισμα των βαθμολογιών των έξι κριτηρίων, και ο παρονομαστής (6) είναι ο αριθμός των κριτηρίων στο σύνολο, δηλαδή:

$$MO = \text{Άθροισμα Βαθμολογιών} / \text{Αριθμός Κριτηρίων}$$

Πίνακας 2: Αξιολόγηση των έργων blockchain βάση των κριτηρίων.

Έργα #	Ιχνηλασιμότητα	Διαφάνεια & Αυθεντικότητα	Ασφάλεια & Ακεραιότητα	Κλιμακωσιμότητα & Απόδοση	Ενσωμάτωση	Κόστος - Αποτελεσματικότητα	Μ.Ο.
1	5	5	4	4	4	3	4.17
2	4	4	4	5	3	2	3.67
3	5	4	3	3	4	5	4.00
4	4	5	3	3	4	4	3.83
5	3	5	5	4	3	2	3.67
6	4	5	4	3	4	3	3.83

Με βάση τα αποτελέσματα αξιολόγησης των επιλεγμένων έργων στον Πίνακα 2, παρατηρείται ότι το έργο (#1) IBM Food Trust συγκέντρωσε την υψηλότερη συνολική βαθμολογία (4.17), παρουσιάζοντας ισχυρή απόδοση στα πέντε από τα έξι κριτήρια, ξεχωρίζοντας στην ιχνηλασιμότητα και τη διαφάνεια-αυθεντικότητα. Από ολιστική σκοπιά αναδεικνύεται ως η κορυφαία λύση για τη βιομηχανία τροφίμων, προσφέροντας αξιόπιστη και αποδοτική λειτουργία σε απαιτητικές αγορές.

Στην δεύτερη θέση κατατάσσεται το έργο (#3) TE-FOOD με βαθμολογία (4.00), πετυχαίνοντας πολύ καλή απόδοση σε τέσσερα από τα έξι κριτήρια, κυρίως στην ιχνηλασιμότητα και στο κόστος-αποτελεσματικότητα. Υποστηρίζεται από δημόσιο δίκτυο και καθορισμένα εργαλεία ιχνηλασιμότητας (RFID, QR), καθιστώντας το ιδανικό για αναδυόμενες αγορές και περιβάλλοντα με δύσκολες ή και καθόλου υποδομές. Επιπλέον, συγκεντρώνει υψηλές βαθμολογίες στην ιχνηλασιμότητα και τη διαφάνεια λόγω της εξειδίκευσης του στον αγροδιατροφικό τομέα (τρόφιμα).

Στην τρίτη θέση βρίσκονται τα έργα (#4) Provenance και (#6) VeChain με βαθμολογία (3.83), όπου και τα δύο επιτυγχάνουν καλή απόδοση σε τέσσερα από τα έξι κριτήρια, με έμφαση στην διαφάνεια-αυθεντικότητα. Το Provenance ξεχωρίζει για την εστίασή του στη διαφάνεια προέλευσης στον χώρο των βιώσιμων προϊόντων, ενώ η σχετικά απλή υλοποίηση του το καθιστά πιο εύκολο στην ενσωμάτωση σε μικρότερες επιχειρήσεις με περιορισμένους τεχνικούς και οικονομικούς πόρους. Το VeChain επιδεικνύει ισχυρή απόδοση στη διαφάνεια και αυθεντικότητα, αξιοποιώντας τεχνολογίες, όπως NFC/QR, ενώ αποδεικνύεται ιδιαίτερα αποτελεσματικό σε περιβάλλοντα πολυτελείας και λιανικής (Joo & Han, 2021).

Τέλος, στην τέταρτη και τελευταία θέση συγκαταλέγονται τα έργα (#5) MediLedger και (#2) TradeLens με βαθμολογία (3.67). Το πρώτο έργο παρουσιάζει αποδοτικότητα σε τρία από τα έξι κριτήρια, υπερέχοντας κυρίως στην διαφάνεια-αυθεντικότητα και την ασφάλεια-ακεραιότητα, ενώ το δεύτερο έργο αποφέρει απόδοση σε τέσσερα από τα έξι κριτήρια, με διάκριση στο κριτήριο της κλιμακωσιμότητας και απόδοσης. Η χαμηλή κατάταξη των 2 τελευταίων έργων οφείλεται κυρίως στην κακή απόδοσή τους ως προς το τελευταίο κριτήριο, κόστος-αποτελεσματικότητα.

Ο Πίνακας 3 παρουσιάζει την κατάταξη σε επίπεδο κριτηρίων. Ο μέσος όρος κάθε κριτηρίου προκύπτει από το άθροισμα των επιμέρους βαθμολογιών που συγκεντρώνονται από τα έργα, διαιρούμενο με το πλήθος των έργων (N=6):

$$MO = \text{Άθροισμα Βαθμολογιών} / \text{Αριθμός Έργων}$$

Πίνακας 3: Αποτελέσματα κατάταξης των κριτηρίων.

Κριτήρια	IBM	TradeLens	TE-FOOD	Provenance	MediLedger	VeChain	M.O.
Ιχνηλασιμότητα	5	4	5	4	3	4	4.17
Διαφάνεια & Αυθεντικότητα	5	4	4	5	5	5	4.67
Ασφάλεια & Ακεραιότητα	4	4	3	3	5	4	3.83
Κλιμακωσιμότητα & Απόδοση	4	5	3	3	4	3	3.67
Ενσωμάτωση	4	3	4	4	3	4	3.67
Κόστος - Αποτελεσματικότητα	3	2	5	4	2	3	3.17

Ανά κριτήριο, ξεκινώντας από τις υψηλότερες επιδόσεις, παρατηρείται ότι η διαφάνεια-αυθεντικότητα και η ιχνηλασιμότητα με μέσο όρο (4.67) και (4.17) αντίστοιχα,

διακρίνονται ως οι τομείς με τις υψηλότερες συνολικά επιδόσεις. Η υψηλή τους βαθμολογία έχει ιδιαίτερη σημασία, καθώς αντιστοιχούν σε πρωταρχικές λειτουργίες της εφοδιαστικής αλυσίδας — την εξασφάλιση της γνησιότητας των προϊόντων και την παρακολούθηση της ροής τους — που αποτελούν βασικές παραμέτρους για την αξιοπιστία και την αποτελεσματικότητα σε κάθε σύστημα εφοδιαστικής αλυσίδας. Αντιθέτως, το κριτήριο κόστος-αποτελεσματικότητα εμφανίζεται τελευταίο στην κατάταξη με τιμή (3.17), αναδεικνύοντας ένα μείζον πρόβλημα για τις επιχειρήσεις του εκάστοτε κλάδου.

Επίσης, στη δεύτερη θέση έρχεται η ασφάλεια-ακεραιότητα με μέσο όρο (3.83), και τέλος στην τρίτη θέση της κατάταξης βρίσκονται τα κριτήρια κλιμακωσιμότητα και απόδοση, και ευκολία ενσωμάτωσης με παρόμοιες τιμές (3.67). Αυτές οι διαφοροποιήσεις αναδεικνύουν τις τεχνολογικές και επιχειρησιακές στρατηγικές που υιοθετεί η κάθε προσέγγιση.

Λαμβάνοντας υπόψη τις βαθμολογίες των έργων στον Πίνακα 2, ακολουθεί αναλυτική παρουσίαση των αποτελεσμάτων τους, βάσει των κριτηρίων που χρησιμοποιήθηκαν για τη συγκριτική αξιολόγησή τους.

4.4.4 Συγκριτική Αξιολόγηση Απόδοσης Κριτηρίων

4.4.4.1 Ιχνηλασιμότητα

Τα άνωθεν αποτελέσματα αποκαλύπτουν ότι η ιχνηλασιμότητα καλύπτεται αρκετά καλά για όλες τις πλατφόρμες που εξετάστηκαν. Αυτό αντανακλά την εγγενή ισχύ της blockchain στην καταγραφή αμετάβλητων συναλλαγών με χρονική σήμανση που εντοπίζουν την κίνηση και την κατάσταση των αγαθών σε πολύπλοκες αλυσίδες εφοδιασμού. Το IBM Food Trust κατέχει πολύ υψηλή απόδοση καθώς ενσωματώνει ολοκληρωμένες λειτουργίες ιχνηλασιμότητας που χρησιμοποιούνται από λιανέμπορες, όπως η Walmart, ενώ το TE-FOOD, κατέχει το ίδιο υψηλό επίπεδο απόδοσης διότι έχει δημιουργηθεί συγκεκριμένα για την παρακολούθηση τροφίμων, δηλαδή, “από το αγρόκτημα στο πιάτο του καταναλωτή”, καλύπτοντας κρίσιμες ανάγκες στην εφοδιαστική αλυσίδα. Στο επόμενο επίπεδο βρίσκονται τα έργα Provenance, VeChain και TradeLens τα οποία καταγράφουν υψηλή απόδοση. Το Provenance, δίνει έμφαση στην παροχή πληροφοριών προέλευσης σε προϊόντα πολυτελείας και βιωσιμότητας, επιτρέποντας στους καταναλωτές να επαληθεύουν οποιαδήποτε στιγμή την αυθεντικότητα του προϊόντος. Σε αντίθεση με το IBM Food Trust και το TE-FOOD, δεν φτάνει σε πολύ υψηλή απόδοση, διότι παραμένει περιορισμένο σε κλίμακα και real-time εφαρμογή. Το VeChain αξιοποιεί συσκευές IoT για την παρακολούθηση των προϊόντων σε πραγματικό χρόνο, αυξάνοντας έτσι την διαφάνεια στην διακίνηση, όμως η συγκεντρωτική αρχιτεκτονική (centralized governance) του περιορίζει τη δυναμική του. Το TradeLens, με απόδοση στην ναυτιλιακή, προσφέρει εκτεταμένη ιχνηλασιμότητα φορτίων μέσω ψηφιακών εγγράφων και κοινής πρόσβασης σε δεδομένα, αλλά δεν κατόρθωσε να εδραιωθεί ευρέως στην αγορά, λόγω των προκλήσεων διαλειτουργικότητας και πολυπλοκότητας του οικοσυστήματος της εφοδιαστικής (τελωνεία-λιμάνια-μεταφορές). Τέλος, το έργο MediLedger αν και βρίσκεται πιο χαμηλά στην απόδοση σε σχέση με τα προηγούμενα έργα, δεν παύει να διαθέτει ουσιαστικές δυνατότητες ιχνηλασιμότητας στο πεδίο των φαρμάκων.

4.4.4.2 Διαφάνεια και Αυθεντικότητα

Η διαφάνεια και η αυθεντικότητα αποτελούν κρίσιμες διαστάσεις στην εφοδιαστική αλυσίδα, ιδιαίτερα σε κλάδους όπως είναι η φαρμακευτική, τα τρόφιμα και τα πολυτελή προϊόντα. Το IBM Food Trust, το VeChain, το Provenance και το MediLedger συγκεντρώνουν πολύ υψηλές βαθμολογίες, καθώς καταγράφουν δεδομένα με αξιοπιστία και επιτρέπουν την επαλήθευση και γνησιότητα των δεδομένων από τον χρήστη. Το VeChain, για παράδειγμα, χρησιμοποιεί τεχνολογίες RFID/QR για τη μοναδική ταυτοποίηση των προϊόντων, ενώ το Provenance δημιουργεί ID προφίλ για να προβάλλεται με διαφάνεια η προέλευση και η διαδρομή του κάθε αγαθού. Το IBM Food Trust από την άλλη επιτρέπει την ψηφιοποίηση κρίσιμων εγγράφων, προσφέροντας έγκυρη πιστοποίηση προέλευσης και κατάστασης του προϊόντος. Το MediLedger έχει επίσης υψηλή βαθμολογία αυθεντικότητας, διότι εφαρμόζει αυστηρές πρακτικές πιστοποίησης στην φαρμακευτική νομοθεσία (DSCSA). Συμπερασματικά, η βαθμολογία (5), δίνεται σε έργα που ενσωματώνουν τόσο την τεχνολογική επαλήθευση των προϊόντων, όσο και την ανοικτή προσβάσιμη καταγραφή πληροφοριών προς τα εμπλεκόμενα μέρη. Αντίθετα, τα έργα TradeLens & TE-FOOD που έλαβαν (4) συνεχίζουν να παρέχουν διαφάνεια, όμως η εφαρμογή τους διαθέτει ορισμένους περιορισμούς, όπως η εστίαση σε συγκεκριμένα τμήματα της εφοδιαστικής αλυσίδας (άρα δεν μπορεί να υποστηριχθεί πλήρη αλλά ανεπτυγμένη διαφάνεια). Αυτή η διαφοροποίηση, όπως παρουσιάζεται και στα έργα στην Ενότητα 4.3, αιτιολογεί την μεταβολή ανάμεσα στις υψηλές και τις πιο υψηλές επιδόσεις στο συγκεκριμένο κριτήριο.

4.4.4.3 Ασφάλεια και Ακεραιότητα

Η ασφάλεια είναι ένας άλλος τομέας όπου διαπρέπουν πλατφόρμες εστιασμένες στις επιχειρήσεις και τα ευαίσθητα δεδομένα. Το MediLedger, αξιολογείται με την υψηλότερη βαθμολογία (5), καθώς βασίζεται στην ιδιωτική (permissioned) πλατφόρμα Quorum και είναι σχεδιασμένο για να καλύπτει αυστηρές απαιτήσεις συμμόρφωσης προς την φαρμακευτική νομοθεσία των ΗΠΑ, ενσωματώνοντας παράλληλα ενισχυμένη κρυπτογράφηση και αυστηρούς μηχανισμούς διαχείρισης πρόσβασης. Στο υψηλό επίπεδο (4) κατατάσσονται τα έργα IBM Food Trust, TradeLens και VeChain. Το πρώτο αξιοποιείται ήδη από μεγάλους λιανοέμπορους (π.χ. Walmart) και σε περιβάλλοντα που δίνουν μεγάλη έμφαση στη προστασία δεδομένων· το δεύτερο αφορά τη ναυτιλιακή και την ψηφιοποίηση των εγγράφων και βασίζεται σε permissioned blockchain, άρα υπάρχει περιορισμός στη διαχείριση των δεδομένων, που μειώνει τον κίνδυνο παραποίησης των εγγράφων· ενώ το τρίτο έργο, αν και είναι χτισμένο σε δημόσιο δίκτυο, διαθέτει κοινοπρακτική αρχιτεκτονική με μηχανισμούς κεντρικού governance για την επαλήθευση και τη διαχείριση των κόμβων, γεγονός που ενισχύει την ασφάλεια. Αντίθετα, τα TE-FOOD και Provenance, βασίζονται σε δημόσια blockchain. Ωστόσο, αξιοποιώντας τη χρήση πρόσθετων μηχανισμών, όπως το QR/RFID για το TE-FOOD και “digital passports” για το Provenance, προσφέρουν ένα ικανοποιητικό επίπεδο ασφάλειας πέρα από τις φυσικές δυνατότητες της blockchain. Αυτός είναι και ο λόγος της χαμηλής βαθμολογίας τους (3).

4.4.4.4 Κλιμακωσιμότητα και Απόδοση

Σχετικά με την κλιμακωσιμότητά, το έργο TradeLens λόγω της αρχιτεκτονικής του που βασίζεται στο HyperLedger Fabric, αξιοποιεί permissioned σχεδίαση και επιδεικνύει την ικανότητα υποστήριξης χιλιάδων συναλλαγών και συμμετεχόντων σε πραγματικό χρόνο με χαμηλή καθυστέρηση, καθιστώντας το κατάλληλο για την ανάπτυξη μεγάλης κλίμακας. Σχεδιάστηκε εξ αρχής ώστε να υποστηρίζει διεθνή ναυτιλιακή κλίμακα, κάτι που διαφέρει αρκετά από τα ελεγχόμενα περιβάλλοντα λιανικής, για αυτό και κατέχει την υψηλότερη απόδοση (5). Σε αντίθεση, το IBM Food Trust, αν και βασίζεται και αυτό στη πλατφόρμα HyperLedger Fabric, επειδή λειτουργεί σε ελεγχόμενα περιβάλλοντα λιανεμπορίου, περιορίζεται σημαντικά ο αριθμός των συμμετεχόντων σε σχέση με την ναυτιλία. Επιπλέον, σε περιβάλλοντα με μεγάλη αύξηση μελών, η απόδοση ενδέχεται να επιβαρυνθεί από τις απαιτήσεις των πολιτικών επικύρωσης και να αυξηθεί η χρονική καθυστέρηση (latency). Αν και δεν έχει σχεδιαστεί για παγκόσμια χρήση, διατηρεί καλή σταθερότητα για αυτό και κατέχει τη βαθμολογία (4). Το MediLedger, από την άλλη, προσφέρει υψηλή απόδοση (4) έναντι των δημόσιων blockchain, καθώς η ιδιωτική υποδομή του Quorum το καθιστά πιο ευέλικτο σε συνθήκες μεγάλου όγκου συναλλαγών, αν και η εφαρμογή του είναι εστιασμένη στη φαρμακευτική αλυσίδα εφοδιασμού και όχι σε παγκόσμια κλίμακα. Αντίστοιχα οι εφαρμογές TE-FOOD και Provenance, που λειτουργούν πάνω στο Ethereum, περιορίζονται από την ταχύτητα των συναλλαγών λόγω της φύσης του δικτύου και τα κόστη λόγω των τελών (gas fees). Όμως, παρά τους περιορισμούς, η απόδοση παραμένει σε σταθερά επίπεδα και μειώνεται ελεγχόμενα — οι συναλλαγές δεν απορρίπτονται, αλλά τοποθετούνται σε ουρά αναμονής — σε συνθήκες μεγάλης κλίμακας. Τέλος, το VeChain με το ανεξάρτητο (VeChainThor) blockchain και τον επιχειρηματικό του σχεδιασμό, το οποίο συνδυάζει δημόσιο με κοινοπρακτικό δίκτυο, ενισχύουν την απόδοση και τη σταθερότητα. Παρά το πλεονέκτημα του όμως, παρουσιάζει περιορισμούς λόγω της συγκεντρωτικής αρχιτεκτονικής ενός μοντέλου διακυβέρνησης όπου η επαλήθευση των συναλλαγών γίνεται από έναν προκαθορισμένο αριθμό εγκεκριμένων κόμβων. Αυτό σημαίνει ότι για να επεκταθεί σε παγκόσμια κλίμακα, θα πρέπει να αυξηθεί και ο αριθμός των κόμβων (authority nodes), γεγονός που μπορεί να οδηγήσει σε γραμμική αύξηση της καθυστέρησης (latency). Αυτό επηρεάζει την πλήρη κλιμακωσιμότητα του συστήματος, οδηγώντας το έτσι σε μέτρια βαθμολόγηση (3).

4.4.4.5 Ενσωμάτωση

Ωστόσο, η ευκολία της ενσωμάτωσης εξακολουθεί να προκαλεί τις περισσότερες πλατφόρμες, ιδιαίτερα σε βιομηχανίες όπου τα παλαιού τύπου συστήματα ή οι αναλογικές διαδικασίες εξακολουθούν να επικρατούν. Το TradeLens, παρά την υψηλή λειτουργικότητά του, αντιμετωπίζει δυσκολίες στην απρόσκοπτη ενσωμάτωση με την υπάρχουσα υποδομή λόγω των τεχνικών απαιτήσεων καθώς και της ανάγκης υποστήριξης και διασυνδέσεων με τελωνειακά, λιμενικά και κρατικά συστήματα. Το MediLedger, λόγω της εξειδίκευσης στο φαρμακευτικό τομέα και των απαιτήσεων συμμόρφωσης με πρότυπα, παρουσιάζει παρόμοιες προκλήσεις, ιδίως στην ενσωμάτωση με παλαιότερα πληροφοριακά συστήματα υγείας. Και τα δύο έργα παρουσιάζουν ικανοποιητική ενσωμάτωση, αλλά οι τεχνικές απαιτήσεις τους περιορίζουν την εφαρμογή τους για αυτό και έχουν βαθμολογία (3). Αντίθετα, τα έργα TE-

FOOD και VeChain διευκολύνουν την υιοθέτησή τους λόγω της προσαρμοστικής τεχνολογίας τους, όπως barcodes, RFID, κ.α., με αποτέλεσμα να επιφέρουν μεγαλύτερη ευελιξία και λιγότερες απαιτήσεις σε τεχνικό επίπεδο. Το έργο Provenance, ξεχωρίζει καθώς επιτρέπει την εφαρμογή του χωρίς την χρήση βαριών τεχνικών υποδομών καθώς χρησιμοποιεί ψηφιακά εργαλεία με έμφαση στην απλότητα και την προσβασιμότητα από τους καταναλωτές και τις επιχειρήσεις χωρίς να απαιτείται τρομερή εξειδίκευση. Τέλος, το IBM Food Trust, αν και η ενσωμάτωση του σε οργανισμούς είναι μεν απαιτητική και χρειάζεται εξειδικευμένη τεχνική υποστήριξη, αξιολογείται θετικά, καθώς στηρίζεται στην εκτενή χρήση APIs και συμβατότητα με πρότυπα, διευκολύνοντας τη διασύνδεση με συστήματα ERP και τεχνολογίες IoT σε επιχειρησιακό επίπεδο.

4.4.4.6 Κόστος - Αποτελεσματικότητα

Η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας είναι ένα ιδιαίτερα σημαντικό κριτήριο για την επιλογή μιας λύσης blockchain καθώς επηρεάζει άμεσα την βιωσιμότητα της επένδυσης. Το έργο TE-FOOD επειδή χρησιμοποιεί δημόσιο δίκτυο και προκαθορισμένα εργαλεία ιχνηλασιμότητας (RFID, QR, κ.α.) επωφελείται από ένα ελαφρύ μοντέλο ανάπτυξης με σχετικά χαμηλό κόστος, καθιστώντας το ιδανικό για αναδυόμενες αγορές και εφαρμογές σε πολλαπλούς κλάδους της εφοδιαστικής αλυσίδας, πετυχαίνοντας βαθμολογία (5). Αντίθετα, το Provenance παρέχει εύχρηστη και προσβάσιμη πλατφόρμα στους καταναλωτές του για τη δημιουργία IDs στα αγαθά, χωρίς την προϋπόθεση τεχνικών απαιτήσεων. Ωστόσο, παραμένει προσανατολισμένο σε συγκεκριμένους τομείς (π.χ. βιώσιμα προϊόντα), γεγονός που περιορίζει την ευρεία αξιοποίηση και τα οφέλη της επένδυσης. Για το λόγο αυτό, αν και το κόστος είναι χαμηλό, η βαθμολογία είναι (4). Από την άλλη μεριά, το VeChain ενσωματώνει εργαλεία QR και NFC tags, όμως η αρχιτεκτονική του απαιτεί συγκεκριμένες ρυθμίσεις για επιχειρηματική χρήση, λόγω του περιορισμένου αριθμού κόμβων, του αυξημένου λειτουργικού κόστους και της ανάγκης δημιουργίας υποδομών, για αυτό και λαμβάνει βαθμολογία (3). Το IBM Food Trust απαιτεί τεχνική υποστήριξη και ενσωμάτωση με υφιστάμενα συστήματα ERP, με αποτέλεσμα η διαδικασία να κοστολογείται ακριβά, ιδίως για μικρούς οργανισμούς. Ωστόσο, σε μεγάλες επιχειρήσεις το υψηλό κόστος αντισταθμίζεται από μετρήσιμα οφέλη και (οριακά) θετικό ROI, γεγονός που δικαιολογεί τη τιμή (3). Το TradeLens, αποτελείται από υψηλό κόστος αρχικής ένταξης και σημαντικές τεχνικές απαιτήσεις διότι χρειάζονται μεγάλες επενδύσεις σε αναβαθμίσεις πληροφοριακών συστημάτων για συνδέσεις με τελωνεία, λιμάνια και άλλες αρχές. Συνεπώς, αποδεικνύεται αρκετά δαπανηρό έργο με αβέβαιο ROI, παρότι παρέχει λειτουργικά οφέλη, και για αυτό παίρνει την τιμή (2). Το MediLedger, που κατατάσσεται στην ίδια βαθμίδα (2), προϋποθέτει συμμόρφωση με αυστηρές νομικές προδιαγραφές, πρότυπα εφαρμογής και τη χρήση υποδομών υψηλής υπολογιστής ισχύος για ευρείας κλίμακας δίκτυα. Αν και η τιμή των 2 προαναφερόμενων έργων είναι χαμηλή λόγω υψηλού κόστους, δεν υποδηλώνει μη βιωσιμότητα της επένδυσης, κάτι που θα μπορούσε να δικαιολογήσει ακόμα χαμηλότερη τιμή.

4.4.5 Βασικά Συμπεράσματα

Τα κοινά πλεονεκτήματα ήταν εμφανή σε όλα τα συστήματα που αναλύθηκαν. Το κυριότερο μεταξύ αυτών είναι η δυνατότητα παροχής από άκρο σε άκρο ορατότητα κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής του προϊόντος. Με τη δημιουργία μιας ψηφιακής καταγραφής για κάθε συναλλαγή, η blockchain επιτρέπει μεγαλύτερη υπευθυνότητα και λειτουργική διορατικότητα. Η αμετάβλητη αποθήκευση δεδομένων αποτρέπει την αναδρομική απάτη ή το λάθος, ενισχύοντας τις δυνατότητες ελέγχου. Επιπλέον, η αποκεντρωμένη φύση της blockchain ενισχύει την εμπιστοσύνη των ενδιαφερομένων, ειδικά στις αλυσίδες εφοδιασμού όπου οι συμμετέχοντες ενδέχεται να μην γνωρίζουν ή να μην εμπιστεύονται πλήρως ο ένας τον άλλον (Naidu et al., 2018).

Αντίθετα, η συγκριτική ανάλυση αποκάλυψε επίσης κοινές αδυναμίες. Ένα βασικό μέλημα ή ζήτημα είναι η πολυπλοκότητα της ολοκλήρωσης. Πολλοί οργανισμοί εξακολουθούν να βασίζονται σε κατακερματισμένα ή ξεπερασμένα συστήματα πληροφορικής που δεν είναι άμεσα συμβατά με τη blockchain. Ως αποτέλεσμα, απαιτείται σημαντικός χρόνος, κόστος και τεχνική προσπάθεια για να καταστούν αυτά τα συστήματα διαλειτουργικά. Μεγάλη είναι και η πιθανότητα τα συστήματα αυτά να χρειαστούν ανταλλακτικά λόγω λειτουργικής/χρονικής φθοράς (ή λόγω εξάντλησης διαθέσιμων πόρων) ή ακόμα και ολική αποκατάσταση για την σωστή λειτουργία τους (Bocek et al., 2017).

Ένα άλλο εμπόδιο είναι η ενσωμάτωση μικρομεσαίων ενδιαφερομένων, όπως οι αγρότες ή οι ανεξάρτητοι προμηθευτές, οι οποίοι συχνά στερούνται ψηφιακού γραμματισμού ή πρόσβασης στην απαραίτητη υποδομή. Οι απαιτήσεις ενέργειας και υποδομών, ιδιαίτερα για τις δημόσιες αλυσίδες μπλοκ, παρουσιάζουν επίσης έναν περιορισμό, αν και οι πρόσφατες εξελίξεις στις λύσεις απόδειξης συμμετοχής (Proof of Stake, PoS) και επιπέδου δύο (Layer 2), προσφέρουν πιο βιώσιμες εναλλακτικές λύσεις. Το PoS μειώνει την κατανάλωση ενέργειας καθώς δεν απαιτείται εξόρυξη (mining), ενώ επιτρέπει την διατήρηση της αποκέντρωσης και ασφάλειας. Αυτό ενισχύει σημαντικά το λειτουργικό κόστος.

Τέλος, η έλλειψη τυποποίησης σε μορφές δεδομένων, πρωτόκολλα συναλλαγών και έξυπνα συμβόλαια εμποδίζει τη διαλειτουργικότητα μεταξύ συστημάτων blockchain και μειώνει τα κέρδη αποτελεσματικότητας. Η διαλειτουργικότητα βοηθάει πολύ στην ανταλλαγή των πληροφοριών αλλά και της συνεργασίας μεταξύ διαφορετικών πλατφορμών και εταιριών σε μια εφοδιαστική αλυσίδα. Παραδείγματος χάρη, ένα σύστημα καταγραφής προέλευσης προϊόντων σε Ethereum, δεν μπορεί με εύκολο τρόπο να διασυνδεθεί με ένα άλλο σύστημα που λειτουργεί με HyperLedger Fabric. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ασυνέχεια στη ροή των πληροφοριών αλλά και τυχόν καθυστερήσεις κατά τη διαδικασία της επαλήθευσης (Rizwan et al., 2022).

Από αυτό το συγκριτικό τοπίο, προκύπτουν αρκετές στρατηγικές ιδέες. Ο στοχευμένος σχεδιασμός αυξάνει σημαντικά την απόδοση της επένδυσης. Λύσεις που εστιάζουν σε ένα συγκεκριμένο σημείο πόνου ή βιομηχανία — όπως η πρόληψη παραποίησης/απομίμησης ή η ευαίσθητη στη θερμοκρασία εφοδιαστική — τείνουν να είναι πιο επιτυχημένες και ευκολότερες στην κλίμακα, αλλά με κόστος στην διαλειτουργικότητα. Επιπλέον, η ενσωμάτωση της blockchain με συμπληρωματικές τεχνολογίες, όπως το IoT και η TN, πολλαπλασιάζει την αξία του (Sunny et al., 2020). Για παράδειγμα, το Modum.io και το TradeLens χρησιμοποιούν αισθητήρες IoT για τη συλλογή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο,

ενώ τα εργαλεία TN βοηθούν στην επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων σε IoT περιβάλλοντα, στην προγνωστική συντήρηση και την πρόβλεψη ζήτησης.

Μια ισορροπημένη προσέγγιση μεταξύ των δημόσιων και των επιτρεπόμενων (permissioned) blockchain είναι επίσης απαραίτητη (Hammi et al., 2023). Ενώ οι δημόσιες αλυσίδες μπλοκ προσφέρουν απaráμιλλη διαφάνεια, οι περιορισμοί κλιμακωσιμότητας και απορρήτου τους καθιστούν τις αδειοδοτημένες αλυσίδες μπλοκ ή τις κοινοπρακτικές blockchain πιο βιώσιμες για τις επιχειρήσεις. Παράλληλα, τα υβριδικά μοντέλα blockchain αποτελούν μια μέση λύση, διότι προσφέρουν επιλεκτικές πληροφορίες για λόγους διαφάνειας, ενώ άλλες πληροφορίες — πιο ευαίσθητες — κρατούνται σε ελεγχόμενο περιβάλλον. Ένα τέτοιο παράδειγμα είναι το μοντέλο Hybrid Peer-to-Peer Physical Distribution (HP3D), το οποίο μπορεί και συνδυάζει ιδιωτικά και δημόσια υπο-καθολικά για να επιτύχει την ισορροπία μεταξύ διαφάνειας και απορρήτου (Li et al., 2018). Έτσι επιτυγχάνεται ένας συνδυασμός πλεονεκτημάτων από δημόσια και ιδιωτικά/επιτρεπόμενα συστήματα.

Τέλος, οι πολιτικές και οι εκπαιδευτικές πρωτοβουλίες διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο. Οι κυβερνήσεις και οι βιομηχανικοί φορείς πρέπει να παρέχουν ρυθμιστική υποστήριξη και πόρους κατάρτισης για να καταστεί δυνατή η ευρύτερη υιοθέτηση, ιδίως μεταξύ των μικρότερων παραγόντων (Ziegler & Uli, 2021).

Συμπερασματικά, τα έργα καλύπτουν διάφορους κλάδους, συμπεριλαμβανομένων των τροφίμων, των φαρμακευτικών προϊόντων, του λιανικού εμπορίου πολυτελείας, της εφοδιαστικής και της βιωσιμότητας, παρέχοντας μια ολιστική εικόνα της προσαρμοστικότητας της τεχνολογίας blockchain σε διαφορετικά πεδία εφαρμογής. Αν και δεν υπάρχει ενιαία λύση, τα πιο επιτυχημένα έργα είναι εκείνα που ευθυγραμμίζουν τον τεχνικό σχεδιασμό με τις συγκεκριμένες ανάγκες μιας βιομηχανίας, ενσωματώνουν συμπληρωματικές τεχνολογίες και λαμβάνουν υπόψη το πλήρες οικοσύστημα των ενδιαφερόμενων μερών. Με συνεχή καινοτομία, τυποποίηση και υποστήριξη για υιοθέτηση χωρίς αποκλεισμούς, η blockchain είναι σε καλή θέση για να επαναπροσδιορίσει την εμπιστοσύνη, την αποτελεσματικότητα και την ανθεκτικότητα στις παγκόσμιες αλυσίδες εφοδιασμού (Henninger & Mashatan, 2021).

5ο Κεφάλαιο – Προκλήσεις

Το κεφάλαιο αυτό αναλύει τις βασικές προκλήσεις που εμποδίζουν την ευρεία υιοθέτηση της τεχνολογίας blockchain στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας. Επισημαίνονται τεχνικά εμπόδια, όπως η κλιμακωσιμότητα, η διαλειτουργικότητα και η ενσωμάτωση με υφιστάμενα — παλαιότερα — συστήματα, καθώς και οργανωτικές προκλήσεις, όπως η έλλειψη εμπειρογνομosύνης και η πολυπλοκότητα της διακυβέρνησης. Συζητούνται επίσης οικονομικοί περιορισμοί, νομικές αβεβαιότητες και κανονιστικά ζητήματα, όπως η συμμόρφωση με τον Γενικό Κανονισμό Προστασίας Δεδομένων (ΓΚΠΔ). Επιπλέον, το κεφάλαιο αυτό εξετάζει περιβαλλοντικές ανησυχίες, περιορισμούς στις υποδομές σε περιοχές χαμηλού εισοδήματος και ηθικές επιπτώσεις, όπως η μετατόπιση θέσεων εργασίας και ο ψηφιακός αποκλεισμός. Συνολικά, τονίζεται ότι, παρά τα μετασχηματιστικά οφέλη της blockchain, η επιτυχής υλοποίηση και εφαρμογή της απαιτεί την υπέρβαση ενός σύνθετου πλέγματος διασυνδεδεμένων τεχνολογικών, οργανωτικών και κοινωνικών εμποδίων.

Πέρα από την καταγραφή των προκλήσεων, το κεφάλαιο προτείνει κατευθύνσεις για μελλοντική έρευνα, εστιάζοντας σε καινοτόμες λύσεις, επιτρέποντας την ενίσχυση της κλιμακωσιμότητας και της διαλειτουργικότητας, τη βελτίωση του πλαισίου διακυβέρνησης, την εκπαίδευση και ευαισθητοποίηση των χρηστών, καθώς και την επίλυση των νομικών και κανονιστικών αβεβαιοτήτων.

Η ανάλυση οργανώνεται σε εννέα (9) υποενότητες, καθεμία εκ των οποίων εξετάζει μια διαφορετική πρόκληση: (1) κλιμακωσιμότητα και απόδοση, (2) διαλειτουργικότητα και ενσωμάτωση με υφιστάμενα συστήματα, (3) ιδιωτικότητα και διαφάνεια δεδομένων, (4) έλλειψη εξειδικευμένου προσωπικού, (5) οικονομικό κόστος και επένδυση, (6) εμπόδια συμμόρφωσης, (7) ψηφιακή ισότητα, (8) ζητήματα ποιότητας και αξιοπιστίας δεδομένων και τέλος (9) προβλήματα βιωσιμότητας. Επιπλέον, στον παρακάτω Πίνακα 4 (Ενότητα 5.1), παρουσιάζεται συγκεντρωτικά η σύνοψη όλων των προκλήσεων.

5.1 Παρουσίαση και Ανάλυση Προκλήσεων

Στην παρούσα ενότητα, παρουσιάζεται περιληπτικά ένας συγκεντρωτικός πίνακας που συνοψίζει τις βασικές προκλήσεις οι οποίες δυσκολεύουν την υιοθέτηση της τεχνολογίας blockchain στην διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας. Συγκεκριμένα, στον Πίνακα 4 καταγράφεται για κάθε πρόκληση μια σύντομη περιγραφή, ο αντίστοιχος τύπος της (τεχνική, οργανωτική, οικονομική, κανονιστική, κοινωνική ή νομική) καθώς και οι βασικές κατευθύνσεις αντιμετώπισής της που προκύπτουν από την βιβλιογραφία. Στις υπό ενότητες που ακολουθούν, οι προκλήσεις αυτές αναλύονται εκτενέστερα, παρέχοντας μια ολοκληρωμένη επισκόπηση των εμποδίων της blockchain που αναδύονται στην εφοδιαστική αλυσίδα και διερευνώνται οι επιπτώσεις τους για μελλοντική ανάπτυξη και έρευνα.

Πίνακας 4: Επισκόπηση προκλήσεων στην υιοθέτηση της blockchain στην εφοδιαστική αλυσίδα.

Πρόκληση	Περιγραφή	Τύπος	Κατευθύνσεις Αντιμετώπισης
Κλιμακωσιμότητα και απόδοση	Περιορισμένη δυνατότητα επεξεργασίας μεγάλου όγκου συναλλαγών σε πραγματικό χρόνο, ιδίως σε δημόσια blockchain	Τεχνική	Εναλλακτικοί μηχανισμοί συναίνεσης (PoS, BFT), off-chain τεχνικές & sidechains, sharding, υβριδικές blockchain
Διαλειτουργικότητα και ενσωμάτωση με υφιστάμενα συστήματα	Αδυναμία επικοινωνίας μεταξύ διαφορετικών blockchain πλατφορμών και διασύνδεσης με legacy ERP ή βάσεις δεδομένων	Τεχνική	Middleware εργαλεία, προσαρμοσμένα APIs, ανάπτυξη καθολικών πρωτοκόλλων και προτύπων διαλειτουργικότητας, σταδιακή ενσωμάτωση
Ιδιωτικότητα και διαφάνεια δεδομένων	Δυσκολία εξισορρόπησης μεταξύ εμπιστευτικότητας και ανάγκης για διαφάνεια	Τεχνική	Υβριδικές blockchain, Zero-Knowledge Proofs (ZKPs), κρυπτογράφηση, ψευδωνυμοποίηση
Έλλειψη εξειδικευμένου ανθρώπινου δυναμικού	Περιορισμένος αριθμός επαγγελματιών με εξειδικευμένη εμπειρία σε blockchain και SCM	Οργανωτική	Εκπαίδευση & πιστοποίηση, συνεργασίες ακαδημαϊκών-βιομηχανίας, διαχείριση οργανωτικών αλλαγών, φιλικές διεπαφές, πιλοτικά έργα
Οικονομικό κόστος και επένδυση	Αυξημένα έξοδα στην προσπάθεια ανάπτυξης και εφαρμογής νέων τεχνολογιών	Οργανωτική/ Οικονομική	Μοντέλα κόστους-οφέλους, εναλλακτικοί χρηματοδοτικοί μηχανισμοί, συνδυασμός blockchain με cloud, ευέλικτες κλιμακούμενες λύσεις
Εμπόδια συμμόρφωσης	Ασάφεια νομικών πλαισίων και κανονιστικών διαφοροποιήσεων ανά χώρα και κλάδο	Νομική/ Κανονιστική	Διεθνή πρότυπα (ISO/TC 307, GS1), ρυθμιστικά sandboxes, τεχνικές ανωνυμοποίησης, off-chain αποθήκευση, ZKPs,

			Compliance/Privacy by design
Ψηφιακή ισότητα	Κίνδυνος αποκλεισμού μικρότερων οργανισμών ή κοινοτήτων λόγω περιορισμένης ψηφιακής υποδομής/πρόσβασης	Κοινωνική	Blockchain-as-a-Service λύσεις, εκπαίδευση & κατάρτιση, κίνητρα/πολιτικές υποστήριξης, ευέλικτα & προσαρμοστικά μοντέλα blockchain, διαλειτουργικότητα & φιλικές διεπαφές
Ποιότητα & αξιοπιστία δεδομένων	Τα δεδομένα που καταγράφονται ενδέχεται να είναι αλλοιωμένα λόγω ανθρώπινων ή τεχνικών λαθών	Τεχνική/Οργανωτική	Ανάπτυξη cross-checking μηχανισμών, χρήση TN/ML τεχνολογιών, ανθεκτικές IoT συσκευές, σημασιολογική ανίχνευση ανωμαλιών, ανάπτυξη πλαισίων διακυβέρνησης
Βιωσιμότητα	Υψηλή κατανάλωση ενέργειας, κόστος πράσινων τεχνολογιών, συμμόρφωση ρυθμιστικών πλαισίων και κοινωνικές επιπτώσεις από την αυτοματοποίηση	Τεχνική/Οικονομική/Κοινωνική/Κανονιστική	Εναλλακτικοί μηχανισμοί συναίνεσης, βέλτιστες τεχνικές (sharding, offchain, sidechains), χρήση TN και IoT τεχνολογιών, επενδύσεις σε ΑΠΕ

5.1.1 Κλιμακωσιμότητα και Απόδοση

Τα δίκτυα blockchain — ειδικά τα δημόσια — υποφέρουν από περιορισμούς κλιμακωσιμότητας λόγω των (βαριών υπολογιστικά) μηχανισμών συναίνεσης που χρησιμοποιούνται. Για παράδειγμα, στο Bitcoin και το Ethereum, η επεξεργασία συναλλαγών είναι σχετικά αργή σε σύγκριση με τις παραδοσιακές κεντρικές βάσεις δεδομένων. Στις αλυσίδες εφοδιασμού, δεδομένου του μεγάλου όγκου δοσοληψιών που επιτελούνται σε πολλαπλές οντότητες, τυχόν καθυστερήσεις μπορεί να αποτελέσουν κρίσιμο σημείο συμφόρησης. Η αδυναμία διατήρησης της υψηλής απόδοσης σε επιθυμητά επίπεδα μπορεί να επιφέρει σοβαρές συνέπειες, όπως είναι η μείωση της εμπιστοσύνης των χρηστών, τυχόν καθυστερήσεις στην εφοδιαστική διαδικασία, την αύξηση του κόστους λειτουργίας και τελικά την περιορισμένη υιοθέτηση της τεχνολογίας σε ευρεία κλίμακα.

Για την αντιμετώπιση αυτής της πρόκλησης, οι κατευθύνσεις έρευνας περιλαμβάνουν:

- *Εναλλακτικούς μηχανισμούς συναίνεσης που απαιτούν λιγότερους υπολογιστικούς πόρους, όπως Proof-of-Stake ή Byzantine Fault Tolerance πρωτοκόλλων.*

- Τεχνικές *off-chain* ή *sidechains*, που επιτρέπουν την εκτέλεση μεγάλου όγκου συναλλαγών εκτός της κύριας αλυσίδας, μειώνοντας σημαντικά το υπολογιστικό φορτίο του δικτύου και ενισχύοντας τη συνολική απόδοση.
- Οι βελτιώσεις στον σχεδιασμό των blockchain τεχνολογιών, όπως η τεχνική *sharding*, συμβάλλουν σημαντικά στην ενίσχυση της κλιμακωσιμότητας των συστημάτων αλλά και στην απόδοση τους. Το *sharding*, έχει την ιδιότητα να διαχωρίζει το δίκτυο σε μικρότερα τμήματα (*shards*), τα οποία με σειρά τους, επεξεργάζονται παράλληλα διαφορετικές υποομάδες συναλλαγών. Με αυτό τον τρόπο, ελαχιστοποιείται ο συνολικός φόρτος εργασίας ανά κόμβο και επιταχύνεται η λειτουργία του δικτύου, επιτρέποντας την ταχύτερη και πιο αποδοτική επεξεργασία συναλλαγών (Zamani et al., 2018).
- Υιοθέτηση υβριδικών μοντέλων *blockchain* που συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των δημόσιων και ιδιωτικών αλυσίδων, επιτυγχάνοντας βελτιστοποίηση της απόδοσης και της ασφάλειας.

Παρά τις προόδους, πολλές από αυτές τις τεχνικές βρίσκονται ακόμη υπό ανάπτυξη ή πειραματισμό και η εφαρμογή τους σε πραγματικά περιβάλλοντα SCM απαιτεί περαιτέρω έρευνα και προσαρμογή.

5.1.2 Διαλειτουργικότητα και Ενσωμάτωση με Υφιστάμενα Συστήματα

Οι αλυσίδες εφοδιασμού περιλαμβάνουν πολλαπλά ενδιαφερόμενα μέρη που συχνά χρησιμοποιούν διαφορετικά πληροφοριακά συστήματα, πλατφόρμες και πρότυπα. Επομένως, η ενσωμάτωση της τεχνολογίας blockchain σε ετερογενή περιβάλλοντα πληροφορικής θέτει δύο βασικές προκλήσεις: (α) τη διαλειτουργικότητα μεταξύ διαφορετικών blockchain πλατφορμών και (β) την ενσωμάτωση των blockchain λύσεων με υφιστάμενα (*legacy*) συστήματα διαχείρισης εφοδιαστικής αλυσίδας.

A. Διαλειτουργικότητα Μεταξύ Blockchain Πλατφορμών

Οι σημερινές πλατφόρμες blockchain, όπως το Hyperledger Fabric ή το Ethereum, δεν είναι καθολικά συμβατές μεταξύ τους, γεγονός που καθιστά δύσκολη την κοινή χρήση δεδομένων μεταξύ συστημάτων σε οργανισμούς. Επιπλέον, η έλλειψη κοινών προτύπων δεδομένων και διεπαφών προγραμματισμού εφαρμογών (*Application Programming Interface*, *APIs*), οδηγεί τα οικοσυστήματα στην απομόνωση και εμποδίζεται η απρόσκοπτη ανταλλαγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο. Αυτή η μη λειτουργική διαδικασία δυσχεραίνει τη συνεργασία των οργανισμών που συμμετέχουν σε διαφορετικά δίκτυα, επιτείνοντας έτσι τον κίνδυνο του κατακερματισμού.

Η ανάπτυξη καθολικών πρωτοκόλλων και προτύπων διαλειτουργικότητας αποτελεί κρίσιμο βήμα για την ενίσχυση της συνεργασίας μεταξύ διαφορετικών τεχνολογικών συστημάτων και πλατφορμών. Η καθιέρωση κοινών προτύπων θα επιτρέψει την ομαλή επικοινωνία και συνεργασία, διασφαλίζοντας ότι τα συστήματα μπορούν να ανταλλάσσουν πληροφορίες με συνέπεια και αξιοπιστία.

Παράλληλα, η δημιουργία *middleware λύσεων*, δηλαδή ενδιάμεσου λογισμικού (ή αλλιώς μεσισμικού) που γεφυρώνει διαφορετικά συστήματα, συμβάλλει στην ενοποίηση

δεδομένων και λειτουργιών. Επιπλέον, η εστίαση ερευνών σε *προσαρμοσμένες διεπαφές APIs*, ικανών να ανταποκρίνονται στις ανάγκες συγκεκριμένων βιομηχανιών (π.χ. φαρμακευτική, αγροδιατροφή ή αυτοκινητοβιομηχανία), θα μπορούσε να επιτρέψει τη δημιουργία εξειδικευμένων εργαλείων και λειτουργιών ενισχύοντας την απόδοση.

Μέσω τέτοιων εργαλείων και λύσεων οι επιχειρήσεις και οι οργανισμοί μπορούν να διαχειρίζονται αποτελεσματικά τις πολυπλοκότητες και να εξορθολογήσουν τις διαδικασίες τους, αξιοποιώντας δεδομένα από πολλαπλές πηγές με ενιαίο και αποτελεσματικό τρόπο. Συγχρόνως, η χρήση στοχευμένων διεπαφών, που χαρακτηρίζονται ως τεχνικές λύσεις διαλειτουργικότητας, προσδοκάτε ότι θα διευκολύνει την ομαλή ενσωμάτωση των blockchain πλατφορμών σε υπάρχοντα πληροφοριακά συστήματα (ERP και WMS), όπως θα δούμε παρακάτω και στη πρόκληση Β. Με αυτό το τρόπο, προωθείται εξίσου και η καινοτομία μεταξύ των επιχειρήσεων ενός κλάδου.

Στο πλαίσιο της blockchain, η υιοθέτηση ανοικτών προτύπων και η ανάπτυξη ευέλικτων εργαλείων (δηλ. πρωτοκόλλων, APIs & middleware) ενσωμάτωσης είναι καίριας σημασίας για την αύξηση της αποδοτικότητας. Μέσα από αυτές τις προσεγγίσεις, τα δίκτυα blockchain καθώς και τα υφιστάμενα συστήματα SCM μπορούν να συνυπάρχουν και να ανταλλάσσουν δεδομένα χωρίς τριβές, δημιουργώντας ένα πιο ενιαίο και αποδοτικό οικοσύστημα. Η διαλειτουργικότητα, εκτός από τη βελτίωση της ασφάλειας και της διαφάνειας, ενισχύει την αξία των blockchain εφαρμογών και ανοίγει τον δρόμο για νέες καινοτόμες χρήσεις σε ένα ευρύ φάσμα τομέων.

Β. Ενσωμάτωση με Υφιστάμενα (Legacy) Συστήματα SCM

Πολλές επιχειρήσεις και οργανισμοί εξακολουθούν να βασίζονται σε παραδοσιακά συστήματα εφοδιαστικής αλυσίδας όπως, ERP ή WMS που δεν είναι εγγενώς συμβατά για τη συνεργασία με τη τεχνολογία blockchain. Η ενσωμάτωση της blockchain με αυτά τα συστήματα απαιτεί εκτεταμένες προσαρμογές, ανασχεδιασμό διαδικασιών και επενδύσεις σε νέες τεχνολογίες, κάτι που μπορεί να οδηγήσει στην αύξηση του κόστους και του χρόνου υιοθέτησης. Ταυτόχρονα, έγκειται ο κίνδυνος να δημιουργηθούν λειτουργικές διαταραχές, καθώς τα παλαιότερα συστήματα δεν μπορούν να ανταπεξέλθουν στις απαιτήσεις ταχύτητας και ασφάλειας που εισάγει η blockchain.

Η ανάπτυξη *εύχρηστων middleware*⁴⁷ εργαλείων — σε αντίθεση με την πρόκληση που το middleware εμφανίζεται ως γενική χρήση για τη “γεφύρωση” διαφορετικών blockchain πλατφορμών — που επιτρέπουν την απρόσκοπτη σύνδεση των συστημάτων blockchain με τα υπάρχοντα ERP συστήματα είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την ευρεία διάδοση της τεχνολογίας. Αυτά τα εργαλεία, διευκολύνοντας τη ροή των δεδομένων και την ενοποίηση των πληροφοριών, χωρίς την ανάγκη πλήρους αντικατάστασης των legacy υποδομών (Hassan et al., 2024). Ένα παράδειγμα τέτοιας λύσης αποτελεί η πλατφόρμα Kaleido⁴⁸, η οποία παρέχει middleware υπηρεσίες για την εύκολη σύνδεση blockchain δικτύων με εταιρικά συστήματα, όπως SAP και Oracle ERP, υποστηρίζοντας την ενσωμάτωση και αυτοματοποίηση επιχειρηματικών διαδικασιών. Μέσω της χρήσης API και συνδετικών μονάδων (connector

⁴⁷ **Middleware:** Είναι ένα “λογισμικό-γέφυρα” που επιτρέπει σε διαφορετικά προγράμματα που είναι φτιαγμένα με διαφορετικές τεχνολογίες ή σε διαφορετικές πλατφόρμες, να συνεργάζονται μεταξύ τους. Π.χ. μπορεί να διασυνδέει την blockchain με τις υπάρχουσες βάσεις δεδομένων ή επιχειρησιακές εφαρμογές.

⁴⁸ Kaleido

modules), η Kaleido επιτρέπει στις επιχειρήσεις να δημιουργούν blockchain-based εφαρμογές που επικοινωνούν άμεσα με τα παραδοσιακά τους συστήματα, επιταχύνοντας έτσι την υιοθέτηση της τεχνολογίας (Campos et al., 2025).

Έτσι, οι επιχειρήσεις μπορούν να εκμεταλλευτούν τα πλεονεκτήματα της blockchain με τρόπο οικονομικά βιώσιμο, χωρίς να διαταράσσεται η καθημερινή τους λειτουργία.

5.1.3 Ιδιωτικότητα και Διαφάνεια Δεδομένων

Ενώ η διαφάνεια της blockchain είναι ευεργετική για την ιχνηλασιμότητα των δεδομένων, εγείρονται σοβαρές ανησυχίες σχετικά με την εμπιστευτικότητα τους. Σε ανταγωνιστικά περιβάλλοντα εφοδιαστικής αλυσίδας, οι επιχειρήσεις συχνά διστάζουν να εκθέσουν ευαίσθητες πληροφορίες, όπως τιμολόγηση, όγκο ή στρατηγικές προμήθειας, καθώς οι αποκάλυψη τους ενδέχεται να υπονομεύσει την ανταγωνιστική τους θέση. Επιπλέον, οι εφοδιαστικές αλυσίδες απαρτίζονται από πολλαπλές ανεξάρτητες οντότητες, με διαφορετικές προτεραιότητες και επίπεδα εμπιστοσύνης. Η επίτευξη συναίνεσης ως προς τα πρότυπα των δεδομένων, τα πρωτόκολλα διακυβέρνησης και τις επιλογές πλατφορμών αποδεικνύεται μια ιδιαίτερα δύσκολη περίπτωση καθώς απαιτεί ισορροπία μεταξύ διαφάνειας και προστασίας των επιχειρησιακών συμφερόντων.

Παρόλο που τα blockchain με άδεια (permissioned blockchains) προσφέρουν καλύτερο έλεγχο πρόσβασης και περιορισμό της ορατότητας ανάλογα με το ρόλο του κάθε συμμετέχοντα σε σχέση με τα δημόσια, η επίτευξη μιας λειτουργικής ισορροπίας μεταξύ διαφάνειας και εμπιστευτικότητας παραμένει μια τεχνική και στρατηγική πρόκληση. Οι λόγοι για τους οποίους μπορεί να συμβαίνει αυτό περιλαμβάνουν τον κίνδυνο του συγκεντρωτισμού, τους πιθανούς περιορισμούς στην καινοτομία και την ασφάλεια, την πολυπλοκότητα της υλοποίησης σε τεχνικά θέματα εφαρμογής και τα οργανωτικά και ρυθμιστικά πλαίσια.

Όσον αφορά τον κίνδυνο του συγκεντρωτισμού, αναφέρεται στην περίπτωση που η διαχείριση της blockchain ανατεθεί σε μια κεντρική οντότητα ή σε μια μικρή ομάδα επικυρωτών, οπότε υφίσταται το ενδεχόμενο/ρίσκο να μη ληφθούν υπόψη τα συμφέροντα όλων των ενδιαφερομένων. Ο περιορισμός στην καινοτομία αφορά την αυστηρή πρόσβαση και τον έλεγχο στα permissioned blockchains, όπου μπορεί να περιορίσουν την ανάπτυξη νέων εφαρμογών. Εξάλλου, η απαίτηση για έγκριση οποιαδήποτε αλλαγής στο δίκτυο θα μπορούσε να επιφέρει επιβράδυνση στις εξελίξεις (Zhang et al., 2022).

Τεχνικά, η υλοποίηση προηγμένων μηχανισμών ελέγχου πρόσβασης (π.χ. πολυεπίπεδη κρυπτογράφηση ή επιλεκτική αποκάλυψη (selective disclosure)), αυξάνει την πολυπλοκότητα του συστήματος οδηγώντας συχνά και στην μείωση της απόδοσης. Σε οργανωτικό επίπεδο, υπάρχει δυσκολία στο να οριστεί με σαφήνεια ποια δεδομένα πρέπει να είναι ορατά, σε ποιον, πότε και υπό ποιες προϋποθέσεις. Η ανάγκη συμφωνίας και εμπιστοσύνης μεταξύ των ανταγωνιστών ή ανεξάρτητων εταίρων, καθιστά τη διαδικασία ακόμα πιο περίπλοκη. Τέλος, η απαίτηση για την προστασία ευαίσθητων προσωπικών δεδομένων ή εμπορικά ευαίσθητων πληροφοριών έρχεται σε αντίθεση με τη θεμελιώδη αρχή της διαφανούς και αμετάβλητης καταγραφής (immutable ledger), προσθέτοντας ένα επιπλέον επίπεδο ρυθμιστικής πολυπλοκότητας στην υλοποίηση τέτοιων τεχνολογικών λύσεων.

Μια προσέγγιση λοιπόν που κερδίζει έδαφος είναι η χρήση *υβριδικών blockchain*, τα οποία συνδυάζουν τα πλεονεκτήματα των δημόσιων και ιδιωτικών αλυσίδων, επιδιώκοντας να

εξισορροπήσουν τη διαφάνεια με την προστασία των δεδομένων. Στα υβριδικά συστήματα, κρίσιμες ή ευαίσθητες πληροφορίες μπορούν να αποθηκεύονται σε ιδιωτικά ελεγχόμενα τμήματα του δικτύου, προστατεύοντας την εμπιστευτικότητα και περιορίζοντας την προσβασιμότητα μόνο σε εξουσιοδοτημένα μέρη. Αντίθετα, βασικά στοιχεία επαλήθευσης, χρονικά σφραγισμένες εγγραφές ή αποδεικτικά δεδομένα μπορούν να καταχωρηθούν στη δημόσια αλυσίδα, προσφέροντας καλύτερη ισορροπία μεταξύ διαφάνειας και ακεραιότητας. Αυτή η αρχιτεκτονική διαχωρισμού (δημόσιων και ιδιωτικών δεδομένων σε αντίστοιχα δημόσια και ιδιωτική μέρη της blockchain), αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη κατεύθυνση καθώς επιτρέπει την καλύτερη διαχείριση κινδύνων ασφαλείας και ενισχύει την αποδοτικότητα, καθιστώντας έτσι αυτή τη προσέγγιση ιδιαίτερα ελκυστική για επιχειρηματικές εφαρμογές που έχουν ως απαίτηση υψηλά πρότυπα ιδιωτικότητας και διαφάνειας.

Ωστόσο, οι υβριδικές blockchain αντιμετωπίζουν προκλήσεις, όπως η πολυπλοκότητα στη διαχείριση πρόσβασης, η ανάγκη για ισχυρούς μηχανισμούς συγχρονισμού και ασφάλειας μεταξύ των επιμέρους τμημάτων, καθώς και ζητήματα διαλειτουργικότητας. Επιπλέον, η ανάπτυξη και η υιοθέτηση τους απαιτεί εξειδικευμένες γνώσεις και ενδέχεται να αυξήσει το κόστος. Επομένως, παρότι τα υβριδικά μοντέλα προσφέρουν υποσχόμενες λύσεις, απαιτούνται περαιτέρω έρευνα και βελτίωση, προκειμένου να καταστούν πρακτικά εφαρμόσιμα σε εκτεταμένη χρήση εντός των εφοδιαστικών συστημάτων.

Αξίζει να σημειωθεί ότι η εφαρμογή *τεχνικών αποδείξεων μηδενικής γνώσης (Zero-Knowledge Proofs, ZKPs)* προσφέρει μία ελκυστική λύση στο δίλημμα μεταξύ διαφάνειας και ιδιωτικότητας στις αλυσίδες εφοδιασμού. Μέσω προηγμένων κρυπτογραφικών μεθόδων, οι ZKPs επιτρέπουν την επικύρωση συναλλαγών ή συνθηκών χωρίς την ανάγκη αποκάλυψης των υποκείμενων δεδομένων. Αυτό επιτρέπει, θεωρητικά, σε ένα δημόσιο blockchain να προσφέρει παρόμοιο επίπεδο ιδιωτικότητας με ένα ιδιωτικό (permissioned) σύστημα, διατηρώντας παράλληλα την αποκέντρωση και τη διαφάνεια της υποδομής του. Τέτοιες τεχνικές υλοποιούνται σε λύσεις, όπως τα zk-SNARKs⁴⁹ ή zk-Rollups⁵⁰, με εφαρμογές σε δημόσια δίκτυα, όπως το Ethereum και το Zcash⁵¹ (Sasson et al., 2014).

Ωστόσο, η υλοποίηση ZKP τεχνικών ενέχει σημαντικές προκλήσεις. Τεχνικά, η δημιουργία και η επαλήθευση αποδείξεων ZKP είναι υπολογιστικά απαιτητική και χρειάζεται ειδικές υποδομές, γεγονός που περιορίζει την απόδοση (scalability) του συστήματος. Επιπλέον, οργανωτικά και στρατηγικά, η διαχείριση δικαιωμάτων πρόσβασης και η ρύθμιση της επιλεκτικότητας στη δημοσιοποίηση δεδομένων απαιτεί προσεκτική σχεδίαση και συμφωνία μεταξύ των μερών. Σε αντίθεση, τα ιδιωτικά blockchain βασίζονται σε εγγενή περιορισμό της πρόσβασης και εφαρμόζονται κυρίως σε συνεργατικά περιβάλλοντα, όπου οι συμμετέχοντες είναι προκαθορισμένοι και υπάρχει αυξημένος έλεγχος στη ροή και την ορατότητα των πληροφοριών. Συνεπώς, αν και οι ZKPs επιτρέπουν τη σταδιακή σύγκλιση

⁴⁹ **Zero-Knowledge Succinct Non-Interactive Argument of Knowledge:** Είναι μια κρυπτογραφική μέθοδος που επιτρέπει την επαλήθευση ότι μια πληροφορία είναι αληθής χωρίς να αποκαλύπτεται το περιεχόμενό της. Χρησιμοποιείται για την προστασία της ιδιωτικότητας στη blockchain, όπως το Zcash.

⁵⁰ Είναι μια τεχνολογία η οποία συνδυάζει πολλές συναλλαγές μαζί εκτός αλυσίδας και τις υποβάλλει στη blockchain μέσω ενός κρυπτογραφικού αποδεικτικού (proof). Έτσι, μειώνεται το κόστος, αυξάνεται η ταχύτητα και διατηρείται η ασφάλεια του δικτύου αλλά και η αποκέντρωση.

⁵¹ [Zcash blockchain](#)

δημόσιων και ιδιωτικών αρχιτεκτονικών, οι δύο προσεγγίσεις εξακολουθούν να διαφέρουν ουσιωδώς ως προς τη διακυβέρνηση, την κλίμακα και τον σκοπό εφαρμογής (Diro et al., 2024).

Επιπροσθέτως, η *χρήση κρυπτογράφησης και ψευδωνυμοποίησης* περιορίζει την ταυτοποίηση και την παρακολούθηση των ατόμων στο δίκτυο, μειώνοντας τον κίνδυνο παραβιάσεων και καταχρήσεων. Η ενσωμάτωση αυτών των τεχνικών βελτιώνει την εμπιστοσύνη των χρηστών και τη συμμόρφωση με ρυθμιστικά πλαίσια.

Συνολικά, η ενσωμάτωση προηγμένων κρυπτογραφικών μεθόδων που επιτρέπουν επιλεκτική αποκάλυψη δεδομένων αυξάνει την ιδιωτικότητα χωρίς να θυσιάζεται η διαφάνεια, καθιστώντας τη blockchain πιο αποδοτική και προσαρμοσμένη στις σύγχρονες απαιτήσεις.

5.1.4 Έλλειψη Εξειδικευμένου Ανθρώπινου Δυναμικού

Καθώς η blockchain αποτελεί έναν σχετικά νέο και εξειδικευμένο τομέα στον κόσμο της τεχνολογίας, παρατηρείται έλλειψη εμπειριστατωμένων επαγγελματιών με τις απαιτούμενες δεξιότητες για τον σχεδιασμό, την υλοποίηση και τη συντήρηση λύσεων διαχείρισης εφοδιαστικής αλυσίδας που βασίζονται σε αυτή την τεχνολογία. Το χάσμα ταλέντου εκτείνεται σε κρίσιμους τομείς, όπως η ανάπτυξη blockchain, η κρυπτογραφία, η κυβερνοασφάλεια και η ανάλυση/διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας. Η έλλειψη εμπειρογνωμοσύνης μπορεί να καθυστερήσει τα έργα, να αυξήσει το κόστος υλοποίησης και λειτουργίας, και να οδηγήσει σε μεγαλύτερη εξάρτηση από εξωτερικούς συμβούλους, γεγονός που επιβαρύνει περαιτέρω τον προϋπολογισμό και ενδέχεται να επηρεάσει την ποιότητα και την ασφάλεια των λύσεων.

Επιπλέον, η υιοθέτηση της blockchain απαιτεί σημαντικές αλλαγές και στον τρόπο με τον οποίο οι εργαζόμενοι ακολουθούν διαδικασίες, μοιράζονται δεδομένα και προσαρμόζονται σε νέα μοντέλα διακυβέρνησης. Συχνά, εργαζόμενοι και διευθυντικά στελέχη εκφράζουν αντίσταση λόγω αβεβαιότητας ή φόβου απώλειας ελέγχου. Αυτή η αντίσταση είναι ιδιαίτερα έντονη σε παραδοσιακές βιομηχανίες ή σε μικρομεσαίες επιχειρήσεις (Small and Medium-sized Enterprises, SMEs) με περιορισμένη ψηφιακή ωριμότητα.

Η *προώθηση της εκπαίδευσης* αποτελεί θεμέλιο για την ευρεία και αποδοτική υιοθέτηση της τεχνολογίας blockchain. Η δημιουργία *εξειδικευμένων εκπαιδευτικών προγραμμάτων και πιστοποιήσεων* συμβάλλει στην ανάπτυξη ενός έμπειρου και καταρτισμένου ανθρώπινου δυναμικού, ικανό να υποστηρίξει και να εξελίξει τα blockchain συστήματα. Μέσω οργανωμένων μαθημάτων, εργαστηρίων και πρακτικής άσκησης, οι χρήστες και οι επαγγελματίες αποκτούν τις απαραίτητες γνώσεις και δεξιότητες για να εκμεταλλευτούν πλήρως τις δυνατότητες της τεχνολογίας.

Παράλληλα, η *ενθάρρυνση συνεργασιών μεταξύ ακαδημαϊκών ιδρυμάτων και βιομηχανίας* δημιουργεί ένα οικοσύστημα γνώσης και καινοτομίας, όπου η έρευνα συνδέεται άμεσα με τις πρακτικές ανάγκες της αγοράς. Μέσα από αυτές τις συνεργασίες διαμορφώνεται το κατάλληλο ανθρώπινο δυναμικό, εξοπλισμένο με τις απαραίτητες δεξιότητες για τη χρήση και την εφαρμογή της blockchain στην εφοδιαστική αλυσίδα, καθώς και σε άλλους δυνητικούς τομείς. Συνολικά, η επένδυση στην εκπαίδευση, επιτρέπει σε νέους χρήστες και οργανισμούς να υιοθετήσουν και να αξιοποιήσουν αποδοτικά τη blockchain.

Τέλος, η σωστή *διαχείριση της οργανωτικής αλλαγής* παίζει καθοριστικό ρόλο στην επιτυχή ενσωμάτωση της blockchain. Η *εφαρμογή πιλοτικών έργων, η σαφής επικοινωνία των*

ωφελειών και η ενεργή εμπλοκή και εκπαίδευση των χρηστών μέσω κατάρτισης και υποστήριξης μπορούν να ενισχύσουν την αποδοχή και να μειώσουν τον επιχειρησιακό κίνδυνο, δημιουργώντας ένα θετικό περιβάλλον αλλαγής. Η ανάπτυξη *φιλικών προς τον χρήστη διεπαφών*, ενισχύει ακόμη περισσότερο αυτή τη διαδικασία, διευκολύνοντας την μετάβαση και καθιστώντας τη blockchain πιο αποδοτική και λειτουργική.

5.1.5 Οικονομικό Κόστος και Επένδυση

Η υλοποίηση της τεχνολογίας blockchain συνοδεύεται από σημαντικά αρχικά κόστη, όπως η αναβάθμιση υποδομών, η ενσωμάτωση με υφιστάμενα συστήματα, η εκπαίδευση προσωπικού και ο επανασχεδιασμός επιχειρησιακών διαδικασιών. Επιπλέον, τα έμμεσα κόστη — μεταξύ των οποίων περιλαμβάνονται καθυστερήσεις υλοποίησης, αλλαγές στην οργανωτική δομή για την υποστήριξη νέων διαδικασιών και προβλήματα μετεγκατάστασης δεδομένων — ενδέχεται να υπερβαίνουν τα αρχικά οφέλη, ιδίως σε οργανισμούς που ήδη λειτουργούν με πλήρως υφιστάμενα κεντρικά συστήματα. Το (συνολικό) κόστος αυτό μπορεί να καταστεί αποτρεπτικό ιδίως για τις μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις, οι οποίες δύναται να μην διαθέτουν το απαιτούμενο κεφάλαιο για την επένδυση σε πειραματικές ή μακροπρόθεσμες τεχνολογικές λύσεις. Επιπροσθέτως, η απόδοση της επένδυσης (Return on Investment, ROI) δεν είναι πάντα άμεση ή εγγυημένη, γεγονός που ενισχύσει τον δισταγμό των ενδιαφερόμενων μερών. Παράλληλα, τα μοντέλα διακυβέρνησης θα πρέπει να ορίζουν με σαφήνεια κρίσιμες παραμέτρους, όπως η διαχείριση πρόσβασης στα δεδομένα, η επίλυση διαφορών και ο χειρισμός μελλοντικών αναβαθμίσεων.

Μια από τις βασικές προκλήσεις για την ευρεία υιοθέτηση της τεχνολογίας blockchain είναι, συνεπώς, η οικονομική βιωσιμότητα των εφαρμογών της. Η *ανάπτυξη κατάλληλων οικονομικών μοντέλων* που ποσοτικοποιούν τα οφέλη και το κόστος σε μακροπρόθεσμο ορίζοντα αποτελεί σημαντική κατεύθυνση έρευνας. Τέτοια μοντέλα επιτρέπουν τις επιχειρήσεις και τους επενδυτές να κατανοήσουν καλύτερα την αποδοτικότητα των επενδύσεών τους, λαμβάνοντας υπόψη τόσο άμεσα όσο και έμμεσα τα σχετικά οφέλη, όπως η αυξημένη διαφάνεια, η ενίσχυση της ασφάλειας και η μείωση των λειτουργικών δαπανών.

Προς αντιμετώπιση των οικονομικών αυτών περιορισμών, η *διερεύνηση εναλλακτικών χρηματοδοτικών μηχανισμών*, όπως επιδοτήσεις, συνεργατικά σχήματα και κοινοπραξίες, μπορεί να μειώσει σημαντικά το αρχικό κόστος υλοποίησης και λειτουργίας των blockchain λύσεων προσφέροντας έτσι σημαντικές προοπτικές. Μέσω συλλογικών προσπάθειών, οι συμμετέχοντες μπορούν να μοιραστούν πόρους, τεχνογνωσία και υποδομές, διαμορφώνοντας ένα πιο βιώσιμο και ανταγωνιστικό περιβάλλον.

Προς την συγκεκριμένη κατεύθυνση, μία αξιόπιστη λύση είναι ο *συνδυασμός της τεχνολογίας blockchain με το υπολογιστικό νέφος (cloud computing)*. Η κλιμακωσιμότητα, η προσαρμοστικότητα, η σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας και η αξιοπιστία αποτελούν μερικά από τα βασικά πλεονεκτήματα του νέφους. Το υπολογιστικό νέφος αναδεικνύεται ως μια οικονομική και ευέλικτη λύση, καθώς προσφέρει υπηρεσίες blockchain κατά παραγγελία (on-demand) με χρέωση βάσει πραγματικής χρήσης (pay-as-you-go), μειώνοντας σημαντικά τις απαιτήσεις για αρχικές κεφαλαιουχικές επενδύσεις. Με αυτόν τον τρόπο, οι οργανισμοί επιβαρύνονται κυρίως με λειτουργικά έξοδα, επιτυγχάνοντας ταχύτερη απόσβεση και μεγαλύτερη προσαρμοστικότητα στις μεταβαλλόμενες ανάγκες. Έτσι, μπορούν να αναπτύξουν

λύσεις αιχμής που είναι ασφαλείς, διαφανείς, παραγωγικές και οικονομικά βιώσιμες, αξιοποιώντας τα ισχυρά χαρακτηριστικά και των δύο τεχνολογιών. Ο συνδυασμός της blockchain και του υπολογιστικού νέφους ανοίγει το δρόμο για προηγμένες εφαρμογές, όπως η βελτιστοποιημένη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Παραδείγματα τέτοιων υπηρεσιών είναι το Amazon Managed Blockchain⁵², που υποστηρίζει τη δημιουργία και διαχείριση δικτύων βασισμένων σε δημοφιλείς πλατφόρμες, όπως το Hyperledger Fabric και το Ethereum, καθώς και το Quorum Blockchain Service⁵³ στο Microsoft Azure, που παρέχει ολοκληρωμένες λύσεις για ανάπτυξη, διαχείριση και παρακολούθηση blockchain εφαρμογών στο νέφος.

Ωστόσο, για την επιτυχή ενσωμάτωση των λύσεων υπολογιστικού νέφους που βασίζονται σε blockchain, τα αρμόδια στελέχη των επιχειρήσεων οφείλουν να προγραμματίσουν εγκαίρως και να επενδύσουν στην απαραίτητη τεχνογνωσία. Ο συνδυασμός αυτών προσφέρει στις εταιρείες μία σημαντική ευκαιρία: την προσαρμογή τους στις ταχείες και απρόβλεπτες μεταβολές που χαρακτηρίζουν τον σύγχρονο επιχειρηματικό κόσμο (Rashmi et al., 2023).

Τέλος, ο σχεδιασμός ελέκτων και κλιμακούμενων λύσεων επιτρέπει στις επιχειρήσεις να προσαρμόζουν τις blockchain πλατφόρμες ανάλογα με τις ανάγκες και την πορεία ανάπτυξής τους. Η στοχευμένη αυτή προσαρμοστικότητα διασφαλίζει την βέλτιστη χρήση πόρων και αποφεύγει περιττές δαπάνες, συμβάλλοντας έτσι σε πιο αποδοτικές, προσιτές και βιώσιμες blockchain εφαρμογές στην εφοδιαστική αλυσίδα.

5.1.6 Εμπόδια Συμμόρφωσης

Η blockchain λειτουργεί σε ένα κατακερματισμένο νομικό περιβάλλον. Τα ρυθμιστικά πλαίσια για συναλλαγές που βασίζονται σε αυτήν, την αποθήκευση δεδομένων και τα έξυπνα συμβόλαια ποικίλλουν μεταξύ χωρών και δικαιοδοσιών. Σε πολλές περιοχές, εξακολουθεί να μην υπάρχει νομική αναγνώριση των αρχείων blockchain ή των ψηφιακών υπογραφών. Αυτή η αβεβαιότητα περιπλέκει τις διασυννοριακές αλυσίδες εφοδιασμού και αυξάνει τον κίνδυνο μη συμμόρφωσης.

Επειδή οι κόμβοι blockchain ενδέχεται να είναι διανεμημένοι παγκοσμίως, ο προσδιορισμός του πού αποθηκεύονται τα δεδομένα και ποια δικαιοδοσία έχει εξουσία (πάνω σε αυτά) μπορεί να είναι περίπλοκος. Η πολυπλοκότητα αυτή δημιουργεί σημαντικές νομικές προκλήσεις, ειδικά όταν πρόκειται για ευαίσθητα δεδομένα, όπως ιατρικά αρχεία, προσωπικές πληροφορίες καταναλωτών ή δεδομένα δημοσίων συμβάσεων. Η αδυναμία τήρησης με τις απαιτήσεις κυριαρχίας δεδομένων θα μπορούσε να οδηγήσει σε παραβάσεις κανονισμών/νόμων και στην επιβολή οικονομικών κυρώσεων, ιδίως στην περίπτωση όπου τα δεδομένα αποθηκεύονται σε μη επιτρεπόμενα μέρη/τοποθεσίες.

Η αμετάβλητη φύση της blockchain που δεν επιτρέπει την τροποποίηση ή την διαγραφή δεδομένων, απαιτεί πρόσθετους μηχανισμούς εναρμόνισης, όπως η αποθήκευση εκτός αλυσίδας, οι αποδείξεις μηδενικής γνώσης και οι τεχνικές ανωνυμοποίησης. Επιπροσθέτως, το υψηλό

⁵² [Amazon Managed Blockchain](#)

⁵³ **Quorum Blockchain Service:** Η υπηρεσία Quorum Blockchain Service στο Azure αποτελεί τη διαχειριζόμενη πλατφόρμα blockchain Quorum που προσφέρεται από την [ConsenSys](#), ως διάδοχη λύση μετά την απόσυρση της αρχικής υπηρεσίας Azure Blockchain Service της Microsoft, η οποία επίσης βασιζόταν στο Quorum.

ενεργειακό αποτύπωμα ορισμένων blockchain δικτύων, όπως οι μηχανισμοί συναίνεσης PoW — Bitcoin — εγείρει περιβαλλοντικές ανησυχίες, ιδιαίτερα στο πλαίσιο των κριτηρίων Environmental, Social, Governance (ESG) (Ενότητα 5.1.9). Η περιβαλλοντική διάσταση αποκτά ειδική σημασία για τις εταιρείες, διότι η χρήση ενεργοβόρων τεχνολογιών μπορεί να οδηγήσει σε νομοθετικές πιέσεις ή/και σε αυστηρότερη εποπτεία, καθώς και σε μη συμμόρφωση με περιβαλλοντικές κανονιστικές απαιτήσεις (Wu & Tran, 2018).

Η απουσία σαφών νομικών πλαισίων και οι διαφοροποιήσεις κανονισμών ανά κλάδο και χώρα, δημιουργούν σημαντικά προβλήματα για τη blockchain στις εφοδιαστικές αλυσίδες (Kumar et al., 2025). Στη φαρμακευτική βιομηχανία, ο ομοσπονδιακός νόμος των Ηνωμένων Πολιτειών (DSCSA) απαιτεί από τις επιχειρήσεις την πλήρη ιχνηλασιμότητα φαρμάκων σε όλα τα στάδια της αλυσίδας, δημιουργώντας πιέσεις για την υιοθέτηση λύσεων (Cheong, 2025). Επίσης, στον τομέα τροφίμων ο νόμος (Food Safety Modernization Act, FSMA) στις ΗΠΑ επιβάλλει αυστηρή παρακολούθηση και έλεγχο στην εφοδιαστική ροή. Παράλληλα, οι απαιτήσεις για διασυνοριακές συναλλαγές (cross-border) σε διεθνές εμπόριο, όπως οι κανονισμοί των τελωνείων και η διαφοροποίηση των νομοθετικών πλαισίων σε ΕΕ, ΗΠΑ και Ασία, ενισχύουν ακόμα περισσότερο την κανονιστική αβεβαιότητα (Zhuk, 2025). Οι διαφοροποιήσεις αυτές, σε συνδυασμό με την απουσία συμφωνίας διεθνών προτύπων, καθιστούν την κανονιστική συμμόρφωση ένα από τα μεγαλύτερα εμπόδια για την εφαρμογή της τεχνολογίας blockchain στις εφοδιαστικές αλυσίδες.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση του συγκεκριμένου ζητήματος και των πτυχών του, παρέχεται στην συνέχεια ένα σύνολο από ερευνητικές κατευθύνσεις που θα μπορούσαν να ακολουθηθούν για την αντιμετώπισή του.

Αποθήκευση εκτός Αλυσίδας (Off-Chain Storage)

Η αποθήκευση ευαίσθητων ή τροποποιήσιμων δεδομένων εκτός της αλυσίδας blockchain επιτρέπει την εύκολη διαγραφή ή τροποποίησή τους, διευκολύνοντας τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς, όπως ο ΓΚΠΔ. Η blockchain αποθηκεύει και διατηρεί μόνο τα αποδεικτικά στοιχεία ή τις καταγραφές (proofs, hashes), μειώνοντας τον όγκο των δεδομένων που υπόκεινται σε ρυθμιστικούς περιορισμούς. Παρόλο που αυτή η τεχνική προσέγγιση θεωρείται ώριμη και ήδη χρησιμοποιείται σε ορισμένες εφαρμογές, απαιτεί την ύπαρξη αξιόπιστων και ασφαλών εξωτερικών υποδομών, γεγονός που προσθέτει κόστος και πολυπλοκότητα στη συνολική διαχείριση του συστήματος. Επιπλέον, θα πρέπει να υπάρχει έλεγχος πού ακριβώς αποθηκεύονται τα ευαίσθητα/προσωπικά δεδομένα σε αυτές τις εξωτερικές υποδομές.

Αποδείξεις Μηδενικής Γνώσης (Zero Knowledge Proofs, ZKP)

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη πρόκληση (δείτε Ενότητα 5.1.3), οι αποδείξεις μηδενικής γνώσης επιτρέπουν την επικύρωση δεδομένων χωρίς την αποκάλυψη των ίδιων των δεδομένων. Η τεχνική αυτή ενισχύει την προστασία της ιδιωτικότητας και μπορεί να συμβάλει στη συμμόρφωση με τον ΓΚΠΔ.

Τεχνικές Ανωνυμοποίησης (Anonymization Techniques)

Τεχνικές, όπως η ψευδωνυμοποίηση και η κρυπτογράφηση, εφαρμόζονται για τον περιορισμό της δυνατότητας ανίχνευσης και ταυτοποίησης ατόμων σε δεδομένα που

αποθηκεύονται στη blockchain, αυξάνοντας έτσι την προστασία της ιδιωτικότητας. Παρότι συμβάλλουν στην μείωση του κινδύνου αποκάλυψης ταυτότητας, δεν διασφαλίζουν πλήρη συμμόρφωση με τον ΓΚΠΔ, ιδιαίτερα σε ό,τι αφορά το "δικαίωμα στη λήθη". Η παραπάνω υβριδικές προσεγγίσεις που αναφέρθηκαν (ZKP, Off-Chain), θα μπορούσαν να ενισχύσουν την προστασία της ιδιωτικότητας και την συμμόρφωση με τον κανονισμό.

Κανονιστική Συμμόρφωση (Regulatory Compliance)

Μια από τις βασικές κατευθύνσεις για την επίλυση του ζητήματος της κανονιστικής συμμόρφωσης είναι η *υιοθέτηση διεθνών προτύπων και μηχανισμών τυποποίησης*, που θα διασφαλίζουν μια κοινή “διάλεκτο” για την ανταλλαγή και αποθήκευση δεδομένων. Το *ISO/TC 307*⁵⁴ και τα *πρότυπα ιχνηλασιμότητας GS1*⁵⁵ επιδιώκουν να υλοποιήσουν αυτές τις πρακτικές σε παγκόσμια κλίμακα, μειώνοντας τα προβλήματα διαλειτουργικότητας και συμμόρφωσης. Επιπλέον, η δημιουργία *ρυθμιστικών sandboxes* παρέχει ασφαλή περιβάλλοντα δοκιμών για blockchain εφαρμογές, επιτρέποντας στις επιχειρήσεις να πειραματίζονται και να προσαρμόζουν λύσεις πριν από την πλήρη εφαρμογή τους, μειώνοντας τον κίνδυνο παραβίασης υφιστάμενων κανονισμών. Τέλος, οι αρχές του *Compliance by Design* (συμμόρφωση από την σχεδίαση) (συμμόρφωση όχι μόνο με το ΓΚΠΔ αλλά και το DSCSA και FSMA) και του *Privacy by Design* (ιδιωτικότητα από την σχεδίαση) (ειδικότερα για το ΓΔΚΠ) — δηλαδή η εξαρχής ενσωμάτωση κανονιστικών απαιτήσεων στον σχεδιασμό των συστημάτων blockchain (πρωτόκολλα και έξυπνα συμβόλαια) — μπορούν να συμβάλλουν ουσιαστικά στην ασφαλή και βιώσιμη ενσωμάτωση της blockchain στις εφοδιαστικές αλυσίδες (Abdul & Saleem, 2024; Cheong, 2025).

5.1.7 Δυσκολίες Ψηφιακής Ισότητας

Η αξιοποίηση της τεχνολογίας blockchain μπορεί να ευνοήσει οργανισμούς με υπάρχουσα ψηφιακή υποδομή, ωστόσο ενέχεται ο κίνδυνος να αφήσει πίσω μικρότερους παίκτες ή κοινότητες που δεν έχουν τα μέσα συμμετοχής. Αν αυτό το ζήτημα δεν αντιμετωπιστεί εγκαίρως μπορεί να επιδεινώσει τις υφιστάμενες ανισότητες στην εφοδιαστική αλυσίδα, συγκεντρώνοντας περαιτέρω δύναμη και αξία στα χέρια κυρίαρχων εταιρειών ή γεωγραφικών περιοχών.

Παράλληλα, η αξιοποίηση των blockchain κόμβων προϋποθέτει σταθερό τεχνολογικό εξοπλισμό και συνεχή συνδεσιμότητα στο διαδίκτυο. Σε περιοχές χαμηλού εισοδήματος ή σε απομακρυσμένες τοποθεσίες της εφοδιαστικής αλυσίδας, η τεχνολογική υποδομή ενδέχεται να είναι ελλιπής ή μη βιώσιμη, γεγονός που εκτείνει τη ψηφιακή ανισότητα ή ακόμη και τον αποκλεισμό. Ως συνέπεια, η δυνατότητα συμμετοχής μικρότερων προμηθευτών στο δίκτυο περιορίζεται δραστικά, ενισχύοντας φαινόμενα περιθωριοποίησης και ανισομερούς πρόσβασης.

Προτεινόμενες κατευθύνσεις για την αντιμετώπιση του φαινομένου αυτού είναι οι εξής:

⁵⁴ ISO TC 307

⁵⁵ Πρότυπα GS1

- **Ανάπτυξη προσβάσιμων και οικονομικών λύσεων:** Η αξιοποίηση τεχνολογιών νέφους και λύσεων blockchain ως υπηρεσία (Blockchain-as-a-Service, BaaS) επιτρέπει σε μικρότερους οργανισμούς να αποκτήσουν πρόσβαση σε προηγμένες υποδομές χωρίς την ανάγκη σημαντικών αρχικών επενδύσεων. Με αυτό το τρόπο, μειώνονται τα εμπόδια εισόδου στο χώρο και ενισχύεται η ισότιμη συμμετοχή.
- **Εκπαίδευση και κατάρτιση:** Η δημιουργία νέων προγραμμάτων ψηφιακής εκπαίδευσης και τεχνικής υποστήριξης για μικρούς προμηθευτές και τοπικές κοινότητες θα μπορούσε να βοηθήσει ουσιαστικά στην καλλιέργεια νέων δεξιοτήτων για την ενεργή συμμετοχή τους στο ψηφιακό οικοσύστημα.
- **Κίνητρα και πολιτικές υποστήριξης:** Δημιουργία δημόσιων ή ιδιωτικών πρωτοβουλιών που υποστηρίζουν την ένταξη μικρότερων επιχειρήσεων, όπως επιδοτήσεις ή συνεργατικά σχήματα.
- **Ευέλικτα και προσαρμοστικά blockchain μοντέλα:** Σχεδιασμός λύσεων που λαμβάνουν υπόψη διαφορετικά επίπεδα τεχνολογικής ετοιμότητας και επιτρέπουν την σταδιακή ένταξη και συμμετοχή διαφορετικών συμμετεχόντων (οργανισμοί/εταιρείες).
- **Διαλειτουργικότητα & χρήση διεπαφών:** Η ανάπτυξη διαλειτουργικών και φιλικών προς το χρήστη διεπαφών ενισχύει την ευελιξία των συστημάτων, καθώς με τον τρόπο αυτό διευκολύνεται η αξιοποίηση τους από επιχειρήσεις με περιορισμένη τεχνογνωσία και μειώνονται τα εμπόδια εισόδου στην τεχνολογία.

Με αυτές τις προσεγγίσεις, το ψηφιακό χάσμα θα μπορούσε να μειωθεί και να διασφαλιστεί μια πιο ισότιμη και βιώσιμη υιοθέτηση της τεχνολογίας blockchain σε όλες τις βαθμίδες της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Οι εφοδιαστικές αλυσίδες παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές ανά κλάδο, τόσο ως προς τις απαιτήσεις ακρίβειας και ιχνηλασιμότητας των δεδομένων, όσο και ως προς τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς. Για παράδειγμα, η φαρμακευτική βιομηχανία θέτει αυστηρά κριτήρια επικύρωσης και ελέγχου, ενώ η βιομηχανία της μόδας εστιάζει στην επαλήθευση αυθεντικότητας και την καταπολέμηση της παραποίησης. Αυτή η ποικιλομορφία καθιστά την οριζόντια τυποποίηση των blockchain λύσεων μια πρόκληση, καθώς η απόλυτη ενοποίηση μπορεί να περιορίσει την εξειδίκευση που απαιτούν διαφορετικοί κλάδοι στο χώρο.

Παρόλα αυτά, η εξέλιξη προς ευέλικτα και κλαδικά προσαρμοσμένα πρότυπα ανοίγει τον δρόμο για ευρύτερη υιοθέτηση και διαλειτουργικότητα, διασφαλίζοντας παράλληλα ότι διατηρείται η αναγκαία προσαρμοστικότητα και εξειδίκευση. Βέβαια, καθώς η blockchain αυτοματοποιεί τις λειτουργίες εμπιστοσύνης και αυξάνει την αποτελεσματικότητα, μπορεί να μειώσει την ανάγκη για διοικητικούς ρόλους, όπως ελεγκτές, μεσάζοντες και συντονιστές επιμελητείας (logistics). Αυτό εγείρει ηθικές ανησυχίες σχετικά με την μείωση θέσεων εργασίας, ειδικά σε εύλωτες αγορές εργασίας. Οι εταιρείες θα πρέπει να επαναξιολογήσουν το κοινωνικό αντίκτυπο που θα μπορούσε να επιφέρει η υιοθέτηση τέτοιων τεχνολογιών στο μέλλον.

5.1.8 Ζητήματα Ποιότητας και Αξιοπιστίας Δεδομένων

Η αξιοπιστία των δεδομένων, κυρίως ως προς την ορθότητα τους, αποτελεί βασική προϋπόθεση για την επιτυχή εφαρμογή της τεχνολογίας blockchain στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας. Παρόλο που η blockchain παρέχει ασφάλεια μέσω της ακεραιότητας και της αμεταβλητότητας των αρχείων (tamper-proof ledger), δεν εγγυάται την ποιότητα των δεδομένων που εισάγονται και αποθηκεύονται σε αυτή. Έτσι, το γνωστό πρόβλημα “garbage in, garbage out”⁵⁶ προκύπτει να γίνεται ένα κρίσιμο ζήτημα διότι, εάν εισαχθούν λανθασμένες ή παραποιημένες πληροφορίες, αυτές θα παραμείνουν μόνιμα αποτυπωμένες, υποσκάπτοντας την αξιοπιστία της ιχνηλασιμότητας και της διαφάνειας σε όλο το μήκος του εφοδιαστικού δικτύου (Francisco & Swanson, 2018).

Βασικοί παράγοντες που ενδέχεται να προκαλέσουν σφάλματα ή να περιορίσουν την ορθότητα των πληροφοριών που τροφοδοτούν τα συστήματα blockchain στις εφοδιαστικές αλυσίδες περιλαμβάνουν:

- **Ανθρώπινα λάθη:** Σε πολλές περιπτώσεις, τα δεδομένα καταχωρούνται κυρίως από εργαζομένους, οδηγώντας σε πιθανές παραλείψεις ή ανακρίβειες. Ένα λανθασμένο δεδομένο, όπως ένα barcode ή μια ανακριβής καταγραφή παραλαβής, μπορεί να προκαλέσει παραποίηση του αποθέματος και να επηρεάσει τις αποφάσεις σε downstream επίπεδο⁵⁷ (Hackius & Petersen, 2017).
- **Αναξιόπιστοι IoT αισθητήρες:** Οι συσκευές που παρακολουθούν και καταγράφουν διάφορα δεδομένα, όπως θερμοκρασία, υγρασία ή τοποθεσία, λόγω της φθοράς τους, ευαλωτότητας ή κυβερνοεπίθεσης, μπορεί να παράγουν εσφαλμένα αποτελέσματα δεδομένων. Σε αυτή τη περίπτωση, η blockchain θα αποθηκεύσει αυτές τις πληροφορίες χωρίς να είναι πραγματικές, βλάπτοντας με τον τρόπο αυτό τη διαφάνεια (Kamilaris et al., 2019).
- **Εσκεμμένη παραποίηση δεδομένων:** Υπάρχει και η πιθανότητα ορισμένοι προμηθευτές ή ενδιάμεσοι να εισάγουν σκόπιμα ψευδείς πληροφορίες για λόγους όπως η απόκρυψη τυχόν προβλημάτων (π.χ. αλλοιωμένα προϊόντα τροφίμων ή φαρμάκων). Μόλις οι πληροφορίες αυτές καταγραφούν στη blockchain, η αμετάβλητη φύση του συστήματός της, καθιστά εξαιρετικά δύσκολη οποιαδήποτε διόρθωση ενισχύοντας τον κίνδυνο της παραπληροφόρησης (Tian, 2016).
- **Έλλειψη μηχανισμών επικύρωσης και διασταύρωσης:** Σε πολλά περιβάλλοντα εφοδιαστικών αλυσίδων, είναι δυνατό να μην υπάρχουν αξιόπιστα συστήματα για cross-checking⁵⁸ των εισερχόμενων δεδομένων, γεγονός που αυξάνει τον κίνδυνο να πραγματοποιηθεί η εισαγωγή ανακριβών πληροφοριών (Biswas & Gupta, 2019).

⁵⁶ **Garbage in, Garbage out (GIGO):** Προέρχεται από την επιστήμη των υπολογιστών και υποδηλώνει ότι αν τα δεδομένα ή οι πληροφορίες που εισάγονται σε ένα σύστημα είναι λανθασμένα ή ελλιπή, τότε και τα αποτελέσματα που θα παραχθούν θα είναι εξίσου λανθασμένα ή μη χρήσιμα.

⁵⁷ Τα στάδια που βρίσκονται πιο κοντά στον τελικό πελάτη, δηλαδή από τον παραγωγό ή τον διανομέα προς τον λιανο έμπορα και τον τελικό καταναλωτή.

⁵⁸ Διασταύρωση ή επαλήθευση δεδομένων από περισσότερες της μίας πηγές, ώστε να διασφαλιστεί η ακρίβεια και η αξιοπιστία των πληροφοριών.

Οι παραπάνω παράγοντες, ψευδής ιχνηλασιμότητα, απώλεια εμπιστοσύνης, καθυστερήσεις στη λήψη αποφάσεων και οι επιχειρησιακοί κίνδυνοι μπορούν να προκαλέσουν ακόμη και ανεπανόρθωτες ζημιές στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, τόσο από την πλευρά των καταναλωτών όσο και των ρυθμιστικών αρχών.

Για την αντιμετώπιση της αξιοπιστίας των δεδομένων, η βιβλιογραφία υποδεικνύει μια σειρά από οργανωτικές και τεχνολογικές κατευθύνσεις. Μια πρώτη προσέγγιση είναι η αξιοπιστία των IoT συσκευών καθώς φανερώνεται ως ένας κρίσιμος παράγοντας. Η *ανάπτυξη πιο ανθεκτικών αισθητήρων*, σε συνδυασμό με *νέες τεχνικές κρυπτογράφησης* που προστατεύουν την ακεραιότητα της μετάδοσης των δεδομένων, μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στην αποτροπή αλλοίωσης ή παραποίησης των πληροφοριών. Παράλληλα, η ενσωμάτωση τους σε πολλαπλά και διαφορετικά σημεία της εφοδιαστικής αλυσίδας, καθώς και η *χρήση cross-checking μηχανισμών* με εξωτερικά ERP, θα μπορούσαν να μειώσουν τα λάθη κατά την εισαγωγή (Kamilaris et al., 2019; Tian, 2016).

Επίσης, μια άλλη μορφή επίλυσης του προβλήματος είναι η *αξιοποίηση σύγχρονων τεχνολογιών*, όπως η Τεχνητή Νοημοσύνη και η Μηχανική Μάθηση. Οι τεχνολογίες αυτές επιτρέπουν την ανάλυση μεγάλου όγκου δεδομένων και τον εντοπισμό ανωμαλιών ή ύποπτων μοτίβων σε πραγματικό χρόνο, πριν την οριστική καταγραφή τους στη blockchain. Τεχνικές ML έχουν ήδη τεθεί σε εφαρμογή για την ανίχνευση πλαστών προϊόντων στην αλυσίδα εφοδιασμού φαρμάκων (Gupta et al., 2022). Παράλληλα, σε πειραματικά περιβάλλοντα αγροδιατροφικών αλυσίδων blockchain, εκτελέστηκαν μοντέλα ημι-επιβλεπόμενης μάθησης (semi-supervised learning) που ενσωματώνουν Deep AutoEncoder (DAE)⁵⁹ και Multilayer Perceptron (MLP)⁶⁰ αρχιτεκτονικές στην προσπάθεια ανίχνευσης ανωμαλιών. Το πείραμα αυτό κατάφερε να επιτύχει ακρίβεια έως και 96,5% και βελτίωση του F1-score⁶¹ κατά 33,1% στην αναγνώριση νέων επιθέσεων σε blockchain supply chains (Son et al., 2024).

Επιπλέον, πέρα από τις μεθόδους TN/ML που αναφέρθηκαν, έχουν συσταθεί και *σημασιολογικές κατευθύνσεις*, όπως η *χρήση κανόνων γλώσσας* (Semantic Web Rule Language, SWRL) που χρησιμοποιείται για την ανίχνευση ανωμαλιών σε blockchain-enabled supply chains. Η μέθοδος αυτή είναι αρκετά χρήσιμη καθώς μπορεί να αναγνωρίζει μη κανονικές συναλλαγές και ασυνέπεια στα δεδομένα χωρίς την ανθρώπινη παρέμβαση, προσθέτοντας έτσι ένα ακόμα επίπεδο αξιοπιστίας (Musa & Bouras, 2022). Ο συνδυασμός, επομένως, blockchain με TN, ML και σημασιολογικά εργαλεία ανίχνευσης ενισχύουν την εμπιστοσύνη των συστημάτων, καθώς εξασφαλίζετε μεγαλύτερη εγκυρότητα και έλεγχος της πληροφορίας, αυξάνοντας έτσι τον έλεγχο της ιχνηλασιμότητας και μειώνοντας τον κίνδυνο της παραποίησης, συμβάλλοντας στη διαφάνεια και αποτελεσματικότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας (Nanaji et al., 2025).

Τέλος, η οργανωτική διάσταση δεν πρέπει να υποτιμάται για την επιτυχία της εφαρμογής της τεχνολογίας. Ο σχεδιασμός και η υλοποίηση *κατάλληλων πλαισίων διακυβέρνησης* είναι ιδιαίτερα σημαντική καθώς προτρέπουν στην ακριβή εισαγωγή

⁵⁹ **DAE:** Είναι ένα τύπος νευρωνικού δικτύου που αποτελείται από δύο μέρη (α) encoder (β) decoder. Ο στόχος είναι να αναγνωρίζει την κανονική μορφή των δεδομένων ούτως ώστε εάν τα δεδομένα είναι ανώμαλα/λανθασμένα, να τα εντοπίζει ως anomalies.

⁶⁰ **MLP:** Είναι ένα κλασικό νευρωνικό δίκτυο με πολλαπλά στρώματα (layers). Χρησιμοποιείται για επιβλεπόμενη μάθηση, δηλαδή χρειάζεται training data με ταμπέλες. Μπορεί να κατηγοριοποιήσει αν μια εγγραφή είναι normal ή anomalies (labels).

⁶¹ **F1-score:** Είναι ένας μετρικό δείκτης που συνδυάζει άλλα δύο σημαντικά metrics (α) ακρίβεια (precision) και (β) ευαισθησία (recall).

δεδομένων από όλα τα μέρη της αλυσίδας. Μέσω μηχανισμών ελέγχου και υπευθυνότητας, μπορεί να διασφαλιστεί ότι οι συμμετέχοντες της εφοδιαστικής αλυσίδας — μεταφορείς, παραγωγοί, διανομείς, λιανέμποροι — συνδράμουν πιστά στην παροχή αξιόπιστων δεδομένων (Hackius & Petersen, 2017). Αυτή η ακρίβεια, αποτελεί θεμέλιο για την ορθή λειτουργία των blockchain συστημάτων ιχνηλασιμότητας και διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Συνολικά, η ποιότητα των δεδομένων αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την σωστή λειτουργία των εφοδιαστικών αλυσίδων. Παρότι η τεχνολογία blockchain εγγυάται την αμετάβλητη αποθήκευση, η πραγματική αξία της εξαρτάται σίγουρα από την αξιοπιστία των πληροφοριών που καταγράφονται σε αυτή. Η επένδυση σε αξιόπιστες υποδομές, η εκμετάλλευση σύγχρονων τεχνολογιών, οι μηχανισμοί επικύρωσης και η κατάλληλη διακυβέρνηση είναι αναγκαίες προϋποθέσεις για την ανάπτυξη αξιόπιστων blockchain εφαρμογών στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας.

5.1.9 Προβλήματα Βιωσιμότητας

Η έννοια της βιωσιμότητας στην εφαρμογή της τεχνολογίας blockchain στις εφοδιαστικές αλυσίδες δεν περιορίζεται μονάχα στο περιβαλλοντικό αποτύπωμα, αλλά εκτείνεται και σε άλλες διαστάσεις, όπως για παράδειγμα την οικονομική, κοινωνική και κανονιστική, συγκεκριμένα σε στόχους βιώσιμης ανάπτυξης (Sustainable Development Goals, SDGs). Παρότι η blockchain ενισχύει τη διαφάνεια, την ιχνηλασιμότητα και την υπευθυνότητα, η εφαρμογή της σε διάφορους κλάδους απαιτεί σημαντικούς πόρους και επενδύσεις, γεγονός που μπορεί να δημιουργήσει ανισότητες, ιδίως σε μικρές επιχειρήσεις ή σε αναδυόμενες οικονομίες με περιορισμένη τεχνολογική υποδομή. Επιπλέον, όπως αναφέρθηκε στην Ενότητα 5.1.6, το ζήτημα της συμμόρφωσης με τα κριτήρια ESG καθιστά τη βιωσιμότητα μια πολυδιάστατη πρόκληση για τις επιχειρήσεις και τους οργανισμούς που δραστηριοποιούνται σε διεθνείς εφοδιαστικές αλυσίδες. Η βιωσιμότητα έχει εξελιχθεί σε ένα ουσιώδες στοιχείο των σύγχρονων οργανισμών και επιχειρήσεων. Στόχος της είναι η μείωση των εκπομπών άνθρακα στο περιβάλλον, η προαγωγή της κοινωνικής ευθύνης και η επίτευξη κανονιστικής συμμόρφωσης. Για να επιτευχθούν οι στόχοι αυτοί, απαιτείται μια ολιστική προσέγγιση στις λειτουργίες τους (Cheong, 2025).

Ένας από τους βασικούς παράγοντες που αποδυναμώνουν τη βιωσιμότητα της τεχνολογίας blockchain είναι η υψηλή κατανάλωση ενέργειας, κυρίως στα δημόσια δίκτυα που βασίζονται σε μηχανισμούς συναίνεσης όπως το PoW. Η κατανάλωση που απαιτεί αυτός ο μηχανισμός δεν οφείλεται σε αναποτελεσματικότητα, αλλά αποτελεί σχεδιαστική επιλογή ασφαλείας καθώς η ενέργεια λειτουργεί για την αποτροπή επιθέσεων. Ενώ διάφορα έργα στις εφοδιαστικές αλυσίδες εκτελούνται σε permissioned blockchain με πιο αποδοτικούς αλγορίθμους, το ενεργειακό αποτύπωμα συνεχίζει να διεγείρει περιβαλλοντικές ανησυχίες και κανονιστικές πιέσεις (Sedlmeir et al., 2020). Παράλληλα, ενώ δημιουργούνται ανησυχίες γύρω από την ενέργεια, το υψηλό κόστος υλοποίησης πράσινων τεχνολογιών, οι διαφοροποιήσεις σε ρυθμιστικά πλαίσια, αλλά και οι κοινωνικές επιπτώσεις, όπως η μείωση της ανάγκης για διοικητικούς ή ενδιάμεσους ρόλους — υπάρχει η πιθανότητα οι υπάλληλοι να χάνουν την θέση εργασίας τους λόγω της αυτοματοποίησης (π.χ. αυτόματη ιχνηλασιμότητα ή ψηφιοποίηση των logistics) — τείνουν να περιπλέκουν ακόμα περισσότερο την κατάσταση της βιωσιμότητας (Abdul & Saleem, 2024; Cheong, 2025).

Για την αντιμετώπιση λοιπόν αυτών των προκλήσεων, η βιβλιογραφία προτείνει διάφορες εναλλακτικές μεθόδους ή τεχνικές και στρατηγικές που μπορούν να ενισχύσουν τη βιωσιμότητα.

Υπό το πλαίσιο των μηχανισμών συναίνεσης, η έρευνα εστιάζει σε *εναλλακτικούς μηχανισμούς* που απαιτούν σημαντικά λιγότερη ενέργεια σε σχέση με το παραδοσιακό Proof-of-Work. Παραδείγματα τέτοιων τεχνολογιών περιλαμβάνουν:

- **Proof-of-Stake (PoS):** Ενότητα [2.2.5](#)
- **Delegated Proof-of-Stake (DPoS):** Ενότητα [2.2.5](#)
- **Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT) και παραλλαγές του:** Ενότητα [2.2.5](#)
- **Hybrid Mechanism:** Ενότητα [2.2.4](#)

Αυτού του είδους οι μηχανισμοί, καθώς και οι υιοθέτηση *άλλων αποδοτικών τεχνικών*, όπως το *sharding*, *sidechains* και οι *off-chain* συναλλαγές, περιορίζουν την πολυπλοκότητα των λειτουργιών και μπορούν να συμβάλλουν σε περαιτέρω εξοικονόμηση ενέργειας — στοιχείο που αποτελεί κρίσιμη προϋπόθεση για τη βιωσιμότητα στις εφοδιαστικές αλυσίδες (Sedlmeir et al., 2020).

Όσον αφορά την περιβαλλοντική διάσταση, οι εταιρείες που έχουν ενσωματώσει στην στρατηγική τους στόχους βιωσιμότητας, είναι ιδιαίτερα σημαντικό να ακολουθήσουν το *πλαίσιο των κριτηρίων ESG*. Η χρήση τεχνολογιών με υψηλή κατανάλωση ενέργειας μπορεί να προκαλέσει αυξημένο ρυθμιστικό έλεγχο ή νομοθετικές παρεμβάσεις, ενώ παράλληλα αυξάνεται ο κίνδυνος μη συμμόρφωσης με τις ισχύουσες περιβαλλοντικές προδιαγραφές.

Παρά τις ανησυχίες όμως, η ίδια η τεχνολογία blockchain, έχει την δυνατότητα να συμβάλει θετικά στη βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης, ιδιαίτερα στον τομέα των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας (Α.Π.Ε.). Χάρη στην ικανότητα της να καταγράφει και να αποθηκεύει ενεργειακά δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, παρέχει στους επενδυτές χρήσιμες πληροφορίες για τον σχεδιασμό των μελλοντικών τους κινήσεων. Αυτό αποκτά ιδιαίτερη σημασία για τις Α.Π.Ε., καθώς η παραγωγή της ενέργειας εξαρτάται από τις καιρικές συνθήκες και παρουσιάζει έντονες διακυμάνσεις σε συγκεκριμένες ώρες.

Οι φορείς εκμετάλλευσης των ενεργειακών δικτύων μπορούν, μέσω της τεχνολογίας blockchain, να παρακολουθούν κρίσιμες παραμέτρους, όπως η παραγωγή και η κατανάλωση ενέργειας, και κατ' επέκταση να προβλέψουν τις ενδεχόμενες κρίσεις στην προσφορά και στη ζήτηση. Η δυνατότητα αυτή δε βελτιώνει μόνο τα συστήματα των Α.Π.Ε., αλλά συντελεί στην εξάλειψη της σπατάλης ενέργειας που είναι σημαντική σε λειτουργίες εφοδιαστικών αλυσίδων. Οι πληροφορίες που παράγονται σε πραγματικό χρόνο, συντελούν στην λήψη ορθών αποφάσεων συμβάλλοντας έτσι στην καλύτερη πορεία δράσης σχετικά με τη ροή και διανομή της ηλεκτρικής ενέργειας (Wu & Tran, 2018).

Συνεπώς, η επιλογή τεχνολογιών blockchain με χαμηλό ενεργειακό αποτύπωμα δεν αποτελεί απλά θέμα βελτίωσης της αποδοτικότητας, αλλά απαραίτητη προϋπόθεση για τη διασφάλιση της επιχειρηματικής βιωσιμότητας και της συμμόρφωσης με το διαρκώς μεταβαλλόμενο κανονιστικό πλαίσιο. Οι τεχνολογίες αυτές μαζί με την ικανότητα της blockchain να βοηθά στην βελτίωση της ενεργειακής απόδοσης μπορούν να μειώσουν

σημαντικά το ενεργειακό αποτύπωμα και σπατάλη, οδηγώντας σε ενεργειακά αποδοτικά και πράσινα ψηφιακά περιβάλλοντα.

Η ολοκληρωμένη σύζευξη της *blockchain* με τεχνολογίες όπως το *IoT* και της *TN* μπορεί να προσφέρει βελτιστοποιημένες λύσεις για τη βιωσιμότητα των εφοδιαστικών αλυσίδων, καθώς επιτρέπει την καταγραφή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο (π.χ. θερμοκρασία, υγρασία) και την αξιοποίησή τους για προβλέψεις, γεγονός που συνεισφέρει στη μείωση της σπατάλης πόρων καθ' όλη τη διάρκεια της εφοδιαστικής ροής. Αυτό κατορθώνεται με τη χρήση των αισθητήρων *IoT* που μπορούν να τροφοδοτούν ένα καθολικό ιχνηλασιμότητας σε *blockchain*, βελτιώνοντας τη διαφάνεια και υποστηρίζοντας με αυτό το τρόπο πρακτικές πράσινης εφοδιαστικής (*Green SCM*) (Soori et al., 2024). Πάνω σε αυτά τα δεδομένα, τα μοντέλα *TN* (δρομολόγησης, αποθεμάτων, ζήτησης, συντήρησης, κ.α.) αναλύουν τις καταγραφές και βελτιστοποιούν εξίσου τη χρήση πόρων και ενέργειας, μειώνουν απορρίψεις και εκπομπές και ενισχύουν την ανθεκτικότητα και αποδοτικότητα του δικτύου. Επίσης, η αποθήκευση και οι ανταλλαγές των δεδομένων μέσω *blockchain* διευκολύνει ελέγχους, λογοδοσία και *ESG reporting*. Η ενσωμάτωση λοιπόν *AI-integrated technologies* σε *SCM* κατορθώνουν μια πορεία βιώσιμης εφοδιαστικής, με ευέλικτα μοντέλα, ενώ ο τριπλός συνδυασμός *Blockchain-IoT-TN* ενδέχεται να επιφέρουν μεγάλες αλλαγές στην επίτευξη των πράσινων στρατηγικών στόχων. Αυτός ο νεωτερισμός, επιτρέπει στις επιχειρήσεις να αντέξουν και να ανταπεξέλθουν στο ιδιαίτερα δυναμικό και απαιτητικό επιχειρησιακό εξελισσόμενο περιβάλλον (Dr. Kumar Aditya et al., 2024; Toorajipour et al., 2021; Qu & Kim, 2024).

Παρότι όμως οι νέες τεχνολογικές προσεγγίσεις παρουσιάζουν σημαντικές προοπτικές για την ανάπτυξη βιώσιμων λύσεων, πολλές εξ αυτών εξακολουθούν να βρίσκονται ακόμη σε στάδιο εξέλιξης και δεν έχουν υιοθετηθεί ευρέως σε βιομηχανική κλίμακα. Επιπλέον, η επιλογή της κατάλληλης τεχνολογίας εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις ανάγκες και τα χαρακτηριστικά κάθε εφαρμογής, γεγονός που καθιστά απαραίτητη τη συνεχή έρευνα, αξιολόγηση και προσαρμογή.

Κοιτάζοντας το μέλλον, τα ευρήματα της ανάλυσης ανέδειξαν αδυναμίες και προκλήσεις που ανοίγουν νέα μονοπάτια για μελλοντικές έρευνες. Πρώτον, υπάρχει ανάγκη για μεγαλύτερη εμπειρική αξιολόγηση του μακροπρόθεσμου αντίκτυπου της *blockchain* στην απόδοση της εφοδιαστικής αλυσίδας, στην εξοικονόμηση κόστους και στην εμπιστοσύνη. Δεύτερον, η ανάπτυξη πρωτοκόλλων διαλειτουργικότητας μεταξύ αλυσίδων θα μπορούσε να επιτρέψει σε διαφορετικά δίκτυα *blockchain* να μοιράζονται δεδομένα με ασφάλεια, βελτιώνοντας την κλιμακωσιμότητα και τη ροή πληροφοριών. Τρίτον, απαιτούνται προσπάθειες τυποποίησης σε ολόκληρη τη βιομηχανία για την ευθυγράμμιση της ορολογίας, των πρωτοκόλλων και των πλαισίων συμμόρφωσης. Τέλος, καθώς οι περιβαλλοντικές ανησυχίες αποκτούν προβολή, η αυστηρή αξιολόγηση του οικολογικού αποτυπώματος της *blockchain* είναι ζωτικής σημασίας.

6ο Κεφάλαιο – Συμπεράσματα

6.1 Σύνοψη

Στη σημερινή παγκοσμιοποιημένη οικονομία, η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας διαδραματίζει ζωτικό ρόλο στη διασφάλιση της ομαλής και αποτελεσματικής διακίνησης αγαθών, υπηρεσιών και πληροφοριών, από την προμήθεια πρώτων υλών έως την τελική παράδοση στους καταναλωτές. Ωστόσο, οι συμβατικές αλυσίδες εφοδιασμού συχνά μαστιίζονται από μια σειρά επίμονων προβλημάτων, όπως η περιορισμένη διαφάνεια, τα κατακερματισμένα συστήματα δεδομένων, η απάτη, οι αναποτελεσματικές ροές εργασίας και η αδύναμη ιχνηλασιμότητα. Καθώς οι οργανισμοί και οι βιομηχανίες στρέφονται όλο και περισσότερο στον ψηφιακό μετασχηματισμό για να αντιμετωπίσουν αυτές τις ανεπάρκειες, η τεχνολογία blockchain έχει αναδειχθεί ως ένα πολλά υποσχόμενο εργαλείο για τη βελτιστοποίηση των λειτουργιών και της απόδοσης της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Η blockchain είναι μια αποκεντρωμένη και κατανεμημένη τεχνολογία καθολικού που επιτρέπει την ασφαλή, διαφανή και απαραβίαστη καταγραφή συναλλαγών σε ένα δίκτυο συμμετεχόντων. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές κεντρικές βάσεις δεδομένων, η blockchain διασφαλίζει ότι μόλις καταγραφούν οι πληροφορίες, δεν μπορούν να τροποποιηθούν χωρίς συναίνεση, εδραιώνοντας έτσι την εμπιστοσύνη και την ακεραιότητα των δεδομένων μεταξύ των ενδιαφερόμενων μερών — ιδιαίτερα πολύτιμη σε αλυσίδες εφοδιασμού που περιλαμβάνουν πολλούς ανεξάρτητους παράγοντες που ενδέχεται να μην εμπιστεύονται πλήρως ο ένας τον άλλον.

Αυτή η διατριβή διερευνά την ενσωμάτωση της blockchain στα συστήματα της εφοδιαστικής αλυσίδας, εξετάζοντας τις τρέχουσες εφαρμογές της, αξιολογώντας τα οφέλη και τους περιορισμούς και εντοπίζοντας τις κύριες προκλήσεις που εμποδίζουν την ευρύτερη εφαρμογή της. Ο πρωταρχικός στόχος της διατριβής είναι να εξετάσει πώς χρησιμοποιείται σήμερα η blockchain στην SCM και να αξιολογήσει την αποτελεσματικότητά της στην επίλυση υφιστάμενων ανεπαρειών. Επιδιώκει να απαντήσει σε διάφορα βασικά ερωτήματα, όπως: Ποιες είναι οι θεμελιώδεις δυνατότητες της blockchain που εφαρμόζονται στις αλυσίδες εφοδιασμού; Πώς έχει εφαρμοστεί η blockchain σε πρακτικά, πραγματικά σενάρια SCM; Ποια είναι τα κύρια πλεονεκτήματα και μειονεκτήματα της ενσωμάτωσης της blockchain στις αλυσίδες εφοδιασμού;

Για την απάντηση αυτών των ερωτημάτων, η μελέτη ξεκινά με μια εννοιολογική επισκόπηση της τεχνολογίας blockchain και της διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας, προχωρώντας στη συνέχεια σε εις βάθος ανάλυση διαφορετικών μοντέλων εφαρμογής της blockchain στη διαχείριση εφοδιαστικών αλυσίδων. Χρησιμοποιήθηκε μια συστηματική μεθοδολογία ανασκόπησης της βιβλιογραφίας, βασιζόμενη σε ακαδημαϊκά άρθρα, βιβλία και συνέδρια, που προέρχονταν από αξιόπιστες βάσεις δεδομένων. Αυτές οι πηγές φιλτραρίστηκαν χρησιμοποιώντας συγκεκριμένα κριτήρια ένταξης, αποκλεισμού και ποιότητας για να διασφαλιστεί η συνάφεια, η εγκυρότητα, η ενημερότητα και η ποιότητα των επιλεγμένων πηγών. Η επιλεγμένη βιβλιογραφία κατηγοριοποιήθηκε ανά τύπο blockchain — δημόσιο,

ιδιωτικό ή κοινοπραξία — καθώς και ανά βιομηχανικό τομέα, συμπεριλαμβανομένων των τροφίμων, των φαρμακευτικών προϊόντων, του λιανικού εμπορίου και της εφοδιαστικής.

Η ανασκόπηση ταξινόμησε επίσης περιπτώσεις χρήσης της τεχνολογίας blockchain στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, σύμφωνα με τις βασικές τους λειτουργίες ή σκοπούς, όπως η ιχνηλασιμότητα, η επαλήθευση αυθεντικότητας και η διαχείριση κινδύνου. Πέρα από την ποιοτική ανάλυση, η διατριβή περιλαμβάνει επίσης συγκριτική αξιολόγηση των δυνατών και αδύνατων σημείων διαφορετικών πλατφορμών και τεχνολογικών πλαισίων blockchain που χρησιμοποιούνται στο πλαίσιο της διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Τα ευρήματα της μελέτης αποκαλύπτουν ότι η blockchain συμβάλλει σημαντικά στην SCM σε πολλούς τομείς. Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα είναι η ιχνηλασιμότητα. Η blockchain επιτρέπει την παρακολούθηση των προϊόντων σε πραγματικό χρόνο σε κάθε στάδιο της εφοδιαστικής αλυσίδας, από την προέλευση έως τον τελικό καταναλωτή. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό σε τομείς, όπως η γεωργία, τα φαρμακευτικά προϊόντα και τα είδη πολυτελείας, όπου η αυθεντικότητα, η ποιότητα και η ασφάλεια των προϊόντων είναι απαραίτητες.

Ένα άλλο κρίσιμο πλεονέκτημα είναι η διαφάνεια και η ακεραιότητα των δεδομένων. Η ακλόνητη φύση της διασφαλίζει ότι τα αρχεία δεν μπορούν να παραποιηθούν μετά τη δημιουργία τους, μειώνοντας έτσι την πιθανότητα απάτης ή σφάλματος. Επιπλέον, επιτρέπει τη χρήση έξυπνων συμβολαίων — αυτοεκτελούμενων συμφωνιών με προκαθορισμένες συνθήκες — τα οποία αυτοματοποιούν πολλές πτυχές των λειτουργιών της εφοδιαστικής αλυσίδας, μειώνοντας την ανάγκη για μεσάζοντες, ελαχιστοποιώντας τις καθυστερήσεις και εξαλείφοντας το ανθρώπινο λάθος.

Η blockchain προωθεί επίσης τη συνεργασία σε όλη την εφοδιαστική αλυσίδα, προσφέροντας ένα κοινόχρηστο, απαραβίαστο περιβάλλον δεδομένων. Αυτή η κοινή ορατότητα διευκολύνει τον πιο συγχρονισμένο σχεδιασμό και τη λήψη αποφάσεων μεταξύ κατασκευαστών, προμηθευτών, παρόχων επιμελητείας (logistics) και λιανοπωλητών. Επιπροσθέτως, η τεχνολογία μπορεί να υποστηρίξει πρωτοβουλίες βιωσιμότητας επαληθεύοντας τη συμμόρφωση με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς, πιστοποιώντας την ηθική προμήθεια και καταγράφοντας το αποτύπωμα άνθρακα, επιτρέποντας στις εταιρείες να ευθυγραμμίσουν τις δραστηριότητές τους με τους παγκόσμιους στόχους βιωσιμότητας και τις προσδοκίες των καταναλωτών.

Παρά τα συναρπαστικά αυτά οφέλη, η διατριβή εντοπίζει και αρκετές προκλήσεις που περιορίζουν επί του παρόντος την ευρεία υιοθέτηση της blockchain στις αλυσίδες εφοδιασμού. Από τεχνικής άποψης, η κλιμακωσιμότητα παραμένει ένα σημαντικό ζήτημα, ειδικά στα δημόσια blockchain όπου οι ταχύτητες επεξεργασίας συναλλαγών ενδέχεται να μην ανταποκρίνονται στις απαιτήσεις μεγάλου όγκου (συναλλαγών) των αλυσίδων εφοδιασμού.

Η ενσωμάτωση με τα υπάρχοντα παλαιότερα συστήματα είναι επίσης προβληματική, απαιτώντας σημαντικό χρόνο, προσπάθεια και επενδύσεις για την ευθυγράμμιση των νέων πλατφορμών blockchain με τα παραδοσιακά συστήματα ERP και βάσεων δεδομένων. Η διαλειτουργικότητα αποτελεί επίσης κρίσιμη πρόκληση, καθώς οι περισσότερες λύσεις blockchain λειτουργούν σε απομονωμένα περιβάλλοντα χωρίς τυποποιημένα πρωτόκολλα, γεγονός που δυσχεραίνει την επικοινωνία και την ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ διαφορετικών πλατφορμών blockchain.

Η οργανωτική αντίσταση επιβραδύνει περαιτέρω την υιοθέτηση. Πολλές εταιρείες διστάζουν να αναθεωρήσουν τις υπάρχουσες διαδικασίες ή να μοιραστούν ευαίσθητα δεδομένα σε ένα κοινόχρηστο δίκτυο. Υπάρχει επίσης ένα αξιοσημείωτο χάσμα δεξιοτήτων, με έλλειψη επαγγελματιών που διαθέτουν τόσο τεχνική εμπειρογνωμοσύνη blockchain όσο και γνώσεις στον τομέα της αλυσίδας εφοδιασμού. Από οικονομικής άποψης, το αρχικό κόστος εφαρμογής της blockchain — συμπεριλαμβανομένων των υποδομών, της εκπαίδευσης και του επανασχεδιασμού των ροών εργασίας — μπορεί να είναι υψηλό, ειδικά για τις μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις. Η έλλειψη σαφούς απόδοσης της επένδυσης ή απτών βραχυπρόθεσμων οφελών συχνά οδηγεί σε σκεπτικισμό ή δισταγμό.

Οι νομικές και κανονιστικές αβεβαιότητες ενέχουν επίσης κινδύνους. Διαφορετικές δικαιοδοσίες έχουν διαφορετικές ερμηνείες σχετικά με την ιδιοκτησία δεδομένων, τις ψηφιακές ταυτότητες και την εκτελεστικότητα των συμβάσεων στο πλαίσιο της blockchain. Επιπλέον, η αναλλοίωτη φύση της blockchain έρχεται σε αντίθεση με τις απαιτήσεις της νομοθεσίας περί απορρήτου, όπως ο Γενικός Κανονισμός για την Προστασία Δεδομένων (ΓΚΠΔ), ο οποίος παρέχει στα άτομα το “δικαίωμα στη λήθη” — μια ασυμβατότητα που περιπλέκει τη συμμόρφωση. Προκύπτουν επίσης περιβαλλοντικές ανησυχίες, ιδίως με τα blockchain που χρησιμοποιούν μηχανισμούς συναίνεσης απόδειξης εργασίας, οι οποίοι καταναλώνουν σημαντική ενέργεια και έρχονται σε σύγκρουση με τις προσπάθειες εταιρικής βιωσιμότητας.

Επιπλέον, η κατακερματισμένη και πολύπλοκη φύση των παγκόσμιων αλυσίδων εφοδιασμού προσθέτει ένα ακόμη επίπεδο δυσκολίας. Κάθε κλάδος έχει τις δικές του συγκεκριμένες ανάγκες, πρότυπα και επίπεδα ψηφιακής ωριμότητας, πράγμα που σημαίνει ότι καμία ενιαία λύση blockchain δεν μπορεί εύκολα να καλύψει όλους τους τομείς. Ως εκ τούτου, οι λύσεις απαιτούν εξατομίκευση και προσαρμογή σε κάθε επιχειρησιακό πλαίσιο, γεγονός που δυσχεραίνει τη δημιουργία ενιαίων προτύπων (τυποποίηση) και καθιστά δυσκολότερη την κλιμάκωση των εφαρμογών σε ευρύτερο επίπεδο, καθώς κάθε νέα εφαρμογή συνεπάγεται πρόσθετο σχεδιασμό και υλοποίηση.

Η τεχνολογία blockchain έχει τη δυνατότητα να φέρει επανάσταση στη διαχείριση της αλυσίδας εφοδιασμού αντιμετωπίζοντας μακροχρόνιες ανεπάρκειες και προωθώντας την εμπιστοσύνη, τη διαφάνεια και τον αυτοματισμό. Ωστόσο, η υλοποίηση αυτού του δυναμικού εξαρτάται από την υπέρβαση σημαντικών προκλήσεων.

Για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων η μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να εστιάσει σε τέσσερις βασικούς άξονες:

1. Την ανάπτυξη τεχνικών λύσεων για την ενίσχυση της διαλειτουργικότητας μεταξύ διαφορετικών blockchain πλατφορμών και συστημάτων SCM, μέσω κοινών προτύπων και πρωτοκόλλων ανταλλαγής δεδομένων.
2. Την μελέτη υβριδικών μοντέλων δημόσιων και ιδιωτικών blockchain που μπορούν να συνδυάζουν ασφάλεια με ταχύτητα και οικονομία κλίμακας.
3. Την διαμόρφωση ρυθμιστικών πλαισίων και μοντέλων διακυβέρνησης που προάγουν τη διαφάνεια χωρίς να παραβιάζουν την ιδιωτικότητα και τα εμπορικά απόρρητα.
4. Την διερεύνηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και την ανάπτυξη βιώσιμων αρχιτεκτονικών, όπως πιο ενεργειακοί αποδοτικοί αλγόριθμοι συναίνεσης.

5. Την αξιοποίηση σύγχρονων τεχνολογιών, όπως η Τεχνητή Νοημοσύνη, το Διαδίκτυο των Πραγμάτων και η Μηχανική Μάθηση, για την έγκαιρη ανίχνευση ανωμαλιών, την βελτίωση ποιότητας των πληροφοριών και την καλύτερη ανίχνευση της ιχνηλασιμότητας σε blockchain-based συστήματα εφοδιαστικής αλυσίδας.

Οι κατευθύνσεις αυτές είναι καθοριστικές για την αξιοποίηση του πλήρους δυναμικού της blockchain στην εφοδιαστική αλυσίδα, διότι οι δυνατότητες της εξυπηρετούν σε υψηλό βαθμό τις απαιτήσεις των βιομηχανιών, σε όλο το φάσμα των logistics.

Ενδεικτικά, ήδη κάποιες Αμερικανικές εταιρείες, όπως η IBM και η Walmart έχουν επικυρώσει την συνεργασία τους με ορίζοντα τη νέα τεχνολογία, ξεκινώντας συνεργατικά τη δράση Blockchain Food Safety Alliance στην Κίνα. Το σχέδιο αποσκοπεί την επιτάχυνση της διαδικασίας του ελέγχου, προκειμένου να πιστοποιείται με μεγαλύτερη ευκολία η ασφάλεια των τροφίμων (Lin, 2022).

Αντίστοιχα, οι εταιρείες κολοσσοί, όπως η Google, αναπτύσσει ένα ιδιόκτητο μοντέλο blockchain για την υποστήριξη του τομέα του υπολογιστικού νέφους. Τα στελέχη της μητρικής εταιρείας Alphabet δουλεύουν ταυτόχρονα πάνω σε ένα ειδικά σχεδιασμένο καταναμημένο λογιστικό κατάλογο (distributed ledger), όπου θα είναι εφικτό να αξιοποιηθεί από τρίτους για την αποθήκευση των δεδομένων (Deshmukh & Thameem 2024).

Συμπερασματικά, παρατηρείται ότι η τεχνολογία blockchain χρησιμοποιείται όλο και περισσότερο σε ποικίλους τομείς, μεταξύ των οποίων και η εφοδιαστική αλυσίδα, γεγονός που την καθιστά μια από τις πιο υποσχόμενες τεχνολογικές λύσεις για τη μελλοντική διασφάλιση της ανθεκτικότητας και της αξιοπιστίας των συστημάτων. Με προσεγμένο σχεδιασμό και βιώσιμη καινοτομία, η blockchain θα μπορούσε να γίνει ο ακρογωνιαίος λίθος της επόμενης γενιάς ανθεκτικών και έξυπνων αλυσίδων εφοδιασμού.

6.2 Προσωπική Εκτίμηση

Η διπλωματική εργασία ήταν μια πολύτιμη και μεταμορφωτική εμπειρία, τόσο ακαδημαϊκά όσο και προσωπικά. Όταν ξεκίνησα την έρευνά μου σχετικά με τις εφαρμογές blockchain στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, είχα μια βασική κατανόηση του θέματος, αλλά καθώς εμβάθυνα στη βιβλιογραφία, τις τεχνολογίες και τις περιπτώσεις χρήσης στον πραγματικό κόσμο, η γνώση και η εκτίμησή μου για το θέμα αυξήθηκαν σημαντικά. Με ενθουσίασε ιδιαίτερα η δυνατότητα της blockchain να αντιμετωπίσει κρίσιμες ανεπάρκειες στις σύγχρονες αλυσίδες εφοδιασμού, όπως η έλλειψη διαφάνειας, ο κατακερματισμός δεδομένων και η περιορισμένη ιχνηλασιμότητα.

Μία από τις μεγαλύτερες προκλήσεις που αντιμετώπισα κατά τη διάρκεια της έρευνας ήταν η διεπιστημονική φύση του θέματος. Η blockchain περιλαμβάνει σύνθετες τεχνικές έννοιες, ενώ η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας εκτείνεται σε οικονομικές, υλικοτεχνικές και οργανωτικές διαστάσεις. Η γεφύρωση αυτών των δύο πεδίων απαιτούσε να βγω από τη ζώνη άνεσής μου και να εξοικειωθώ τόσο με την τεχνική ορολογία (π.χ. μηχανισμοί συναίνεσης, έξυπνα συμβόλαια) όσο και με τα επιχειρηματικά πλαίσια. Επιπλέον, για την κατανόηση των εφαρμογών της τεχνολογίας blockchain σε τομείς, όπως η εφοδιαστική

αλυσίδα, η ασφάλεια τροφίμων και ο φαρμακευτικός κλάδος, αξιοποιήθηκε υλικό από επιστημονικές δημοσιεύσεις, διαδικτυακές πηγές και μελέτες περιπτώσεων.

Μια άλλη πρόκληση ήταν η διαχείριση του όγκου των διαθέσιμων πληροφοριών. Η blockchain είναι ένας ταχέως εξελισσόμενος τομέας και έπρεπε να είμαι επιλεκτικός στην επιλογή αξιόπιστων και σχετικών πηγών. Μέσω αυτής της διαδικασίας, βελτίωσα την ικανότητά μου να αξιολογώ κριτικά την έρευνα, να φιλτράρω ποιοτική βιβλιογραφία και να συνθέτω μεγάλες ποσότητες πληροφοριών — δεξιότητες που θα μεταφέρω σε μελλοντικά ακαδημαϊκά και επαγγελματικά μου έργα.

Πέρα από τις θεωρητικές γνώσεις, αυτή η διατριβή με βοήθησε να αναπτύξω μια σειρά από σημαντικές δεξιότητες, όπως ο σχεδιασμός έργων, η ακαδημαϊκή γραφή, η αναφορά και η αναλυτική σκέψη. Έμαθα επίσης πώς να διεξάγω μια συστηματική ανασκόπηση της βιβλιογραφίας, να κατηγοριοποιώ σύνθετες πληροφορίες και να επικοινωνώ με σαφήνεια τα ευρήματα. Αυτές οι δεξιότητες εφαρμόζονται άμεσα σε πραγματικά επιχειρηματικά περιβάλλοντα, ειδικά σε ρόλους που αφορούν την αξιολόγηση τεχνολογίας, τη βελτίωση διαδικασιών ή τον στρατηγικό σχεδιασμό.

Προσωπικά, πλέον αντιλαμβάνομαι τη blockchain όχι μόνο ως μια τεχνολογική τάση, αλλά και ως έναν δυνητικό παράγοντα ενίσχυσης της εμπιστοσύνης και της συνεργασίας στο παγκόσμιο εμπόριο. Ενώ παραμένω συγκρατημένα αισιόδοξος — πλήρως συνειδητοποιημένος των προκλήσεων και των περιορισμών — πιστεύω ότι μπορεί να αναδιαμορφώσει σημαντικά τον τρόπο με τον οποίο οι εταιρείες λειτουργούν και αλληλοεπιδρούν εντός των αλυσίδων εφοδιασμού τους. Απέκτησα επίσης μεγαλύτερη εκτίμηση για τη σημασία της ηθικής ανάπτυξης της τεχνολογίας, ειδικά όταν εξέτασα ζητήματα, όπως το απόρρητο των δεδομένων, η ψηφιακή ένταξη και η περιβαλλοντική βιωσιμότητα.

Τέλος, αυτό το έργο μου ενίσχυσε το ενδιαφέρον για τη χρήση της τεχνολογίας όχι μόνο για την αποτελεσματικότητα της, αλλά και για την διαφάνεια, την λογοδοσία και το κοινωνικό αντίκτυπο.

7ο Κεφάλαιο – Βιβλιογραφία

- [1]. Abdul, M., & Saleem, S. (2024). Navigating Blockchain's Twin Challenges: Scalability and Regulatory Compliance. *Blockchains*, 2(3), 265–298. <https://doi.org/10.3390/blockchains2030013>
- [2]. Aditya, Dr. K., Chakraborty, Dr. S., Dahire, A., Kumari, A., & Milanova, Dr. M. (2024). Integrating Blockchain, IoT, and AI in Supply Chain Management. *Apress EBooks*, 237–264. https://doi.org/10.1007/979-8-8688-0315-4_9
- [3]. Agarwal, U., Rishiwal, V., Tanwar, S., Chaudhary, R., Sharma, G., Bokoro, P. N., & Sharma, R. (2022). Blockchain Technology for Secure Supply Chain Management: A Comprehensive Review. *IEEE Access*, 10(1), 85493–85517. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3194319>
- [4]. Agrawal, P., & Narain, R. (2018). Digital supply chain management: An Overview. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 455(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899x/455/1/012074>
- [5]. Al-Farsi, S., Rathore, M. M., & Bakiras, S. (2021). Security of Blockchain-Based Supply Chain Management Systems: Challenges and Opportunities. *Applied Sciences*, 11(12), 5585. <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/12/5585>
- [6]. Alam, S., Shuaib, M., Khan, W. Z., Garg, S., Kaddoum, G., Hossain, M. S., & Zikria, Y. B. (2021). Blockchain-based Initiatives: Current state and challenges. *Computer Networks*, 198, 108395. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108395>
- [7]. Almadani, M. S., Alotaibi, S., Alsobhi, H., Hussain, O. K., & Hussain, F. K. (2023). Blockchain-based multi-factor authentication: A systematic literature review. *Internet of Things*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.iot.2023.100844>
- [8]. Almutairi, K., Hosseini Dehshiri, S. J., Hosseini Dehshiri, S. S., Hoa, A. X., Arockia Dhanraj, J., Mostafaeipour, A., Issakhov, A., & Techato, K. (2022). Blockchain Technology Application Challenges in Renewable Energy Supply Chain Management. *Environmental Science and Pollution Research*. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-18311-7>
- [9]. Azevedo, P., Gomes, J., & Romão, M. (2023). Supply chain traceability using blockchain. *Operations Management Research*, 16, 1359–1381. <https://doi.org/10.1007/s12063-023-00359-y>
- [10]. Androulaki, E., Manevich, Y., Muralidharan, S., Murthy, C., Nguyen, B., Sethi, M., Singh, G., Smith, K., Sorniotti, A., Stathakopoulou, C., Vukolić, M., Barger, A., Cocco, S. W., Yellick, J., Bortnikov, V., Cachin, C., Christidis, K., De Caro, A., Enyeart, D., & Ferris, C. (2018). Hyperledger fabric: A Distributed Operating System for Permissioned Blockchains. *Proceedings of the Thirteenth EuroSys Conference on - EuroSys '18*. <https://doi.org/10.1145/3190508.3190538>
- [11]. Antonucci, F., Figorilli, S., Costa, C., Pallottino, F., Raso, L., & Menesatti, P. (2019). A review on blockchain applications in the agri-food sector. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 99(14), 6129–6138. <https://doi.org/10.1002/jsfa.9912>

- [12]. Avantaggiato, M., & Gallo, P. (2019, June 1). Challenges and Opportunities using MultiChain for Real Estate. IEEE Xplore. <https://doi.org/10.1109/BlackSeaCom.2019.8812780>
- [13]. Azzi, R., Chamoun, R. K., & Sokhn, M. (2019). The power of a blockchain-based supply chain. Computers & Industrial Engineering, 135(1), 582–592. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.06.042>
- [14]. Balaji, K. C., Gopal, P., & Rashmi, S. (2021). Continuous improvement in just in time manufacturing (jit), a systematic literature review . International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology, 6(2), 77–94. https://www.researchgate.net/profile/Rashmi-Srinivasaiah/publication/353885703_CONTINUOUS_IMPROVEMENT_IN_JUST_IN_TIME_MANUFACTURING_JIT_A_SYSTEMATIC_LITERATURE_REVIEW/links/611673b91e95fe241acd3c21/CONTINUOUS-IMPROVEMENT-IN-JUST-IN-TIME-MANUFACTURING-JIT-A-SYSTEMATIC-LITERATURE-REVIEW.pdf
- [15]. Balcerzak, A. P., Nica, E., Rogalska, E., Poliak, M., Klieštík, T., & Sabie, O.-M. (2022). Blockchain Technology and Smart Contracts in Decentralized Governance Systems. Administrative Sciences, 12(3). <https://doi.org/10.3390/admsci12030096>
- [16]. Bamakan, S. M. H., Motavali, A., & Bondarti, A. B. (2020). A survey of blockchain consensus algorithms performance evaluation criteria. Expert Systems with Applications, 154(1). <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113385>
- [17]. Bazel, M. A., Mohammed, F., & Ahmed, M. (2021, August 1). Blockchain Technology in Healthcare Big Data Management: Benefits, Applications and Challenges. IEEE Xplore. <https://doi.org/10.1109/eSmarTA52612.2021.9515747>
- [18]. Belotti, M., Bozic, N., Pujolle, G., & Secci, S. (2019). A Vademecum on Blockchain Technologies: When, Which, and How. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 21(4), 3796–3838. <https://doi.org/10.1109/comst.2019.2928178>
- [19]. Ben-Daya, M., Hassini, E., & Bahrour, Z. (2019). Internet of things and supply chain management: a literature review. International Journal of Production Research, 57(15-16), 4719–4742. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1402140>
- [20]. Beske, P., Land, A., & Seuring, S. (2014). Sustainable Supply Chain Management Practices and Dynamic Capabilities in the Food industry: a Critical Analysis of the Literature. International Journal of Production Economics, 152, 131–143. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2013.12.026>
- [21]. Biswas, B., & Gupta, R. (2019). Analysis of barriers to implement blockchain in industry and service sectors. Computers & Industrial Engineering, 136, 225–241. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.07.005>
- [22]. Blossy, G., Eisenhardt, J., & Hahn, G. (2019). Blockchain Technology in Supply Chain Management: An Application Perspective. Hawaii International Conference on System Sciences 2019 (HICSS-52). https://aisel.aisnet.org/hicss-52/os/impact_of_blockchain/6/
- [23]. Bocek, T., Rodrigues, B. B., Strasser, T., & Stiller, B. (2017, May 1). Blockchains everywhere - a use-case of blockchains in the pharma supply-chain. IEEE Xplore. <https://doi.org/10.23919/INM.2017.7987376>

- [24]. Bonnet, S., & Teuteberg, F. (2022). Impact of blockchain and distributed ledger technology for the management, protection, enforcement and monetization of intellectual property: a systematic literature review. *Information Systems and E-Business Management*. <https://doi.org/10.1007/s10257-022-00579-y>
- [25]. Bortolini, M., Faccio, M., Galizia, F. G., & Gamberi, M. (2021). Push/Pull Parts Production Policy Optimization in the ATO Environment. *Applied Sciences*, 11(14). <https://doi.org/10.3390/app11146570>
- [26]. Cagigas, D., Clifton, J., Diaz-Fuentes, D., & Fernandez-Gutierrez, M. (2021). Blockchain for Public Services: A Systematic Literature Review. *IEEE Access*, 9, 13904–13921. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3052019>
- [27]. Campante, M. I., Goncalves, C. T., & Jose, M. (2024). Business Intelligence Tools to Improve Business Strategy. *Smart Innovation, Systems and Technologies*, 251–268. https://doi.org/10.1007/978-981-99-9758-9_20
- [28]. Campos, L. T., Peguero, J. A., Guerra, L., Gordon, G. S., Azeemuddin, N., Koontz, M. Z., Pan, A., Svedman, C., Chung, W.-Y., Tucker, V., McAneny, B. L., & Fontaine, A. C. (2025). Kaleido registry: A multi-center registry platform with site staff and automation to enable accelerated clinical research and drug development at scale in community practices. *Journal of Clinical Oncology*, 43(16), 11020–11022. https://doi.org/10.1200/jco.2025.43.16_suppl.11020
- [29]. 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(36), 55–81. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2018.11.006>
- [30]. Chakrabarti, A., & Chaudhuri, A. K. (2017). Blockchain and its Scope in Retail. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 4(7), 3053–3057. <https://www.irjet.net/archives/V4/i7/IRJET-V4I7616.pdf>
- [31]. Chang, Y., Iakovou, E., & Shi, W. (2020). Blockchain in global supply chains and cross border trade: a critical synthesis of the state-of-the-art, challenges and opportunities. *International Journal of Production Research*, 58(7), 1–18. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1651946>
- [32]. Charles, V., Emrouznejad, A., & Gherman, T. (2023). A critical analysis of the integration of blockchain and artificial intelligence for supply chain. *Annals of Operations Research*, 327. <https://doi.org/10.1007/s10479-023-05169-w>
- [33]. Chauhan, A., Malviya, O. P., Verma, M., & Mor, T. S. (2018). Blockchain and Scalability. 2018 IEEE International Conference on Software Quality, Reliability and Security Companion (QRS-C). <https://doi.org/10.1109/qrs-c.2018.00034>
- [34]. Chauhan, C., & Singh, A. (2019). A review of Industry 4.0 in supply chain management studies. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(5), 863–886. Emerald. <https://doi.org/10.1108/jmtm-04-2018-0105>
- [35]. Chen, C.-J. (2019). Developing a Model for Supply Chain Agility and Innovativeness to Enhance Firms' Competitive Advantage. *Management Decision*, 57(7), 1511–1534. <https://doi.org/10.1108/md-12-2017-1236>
- [36]. Cheong, B. C. (2025). Leveraging blockchain for enhanced transparency and traceability in sustainable supply chains. *Discover Analytics*, 3(1). <https://doi.org/10.1007/s44257-025-00032-7>

- [37]. Chen, Y., Lu, Y., Bulysheva, L., & Kataev, M. Yu. (2022). Applications of Blockchain in Industry 4.0: a Review. *Information Systems Frontiers*.
<https://doi.org/10.1007/s10796-022-10248-7>
- [38]. Cole, R., Stevenson, M., & Aitken, J. (2019). Blockchain technology: Implications for Operations and Supply Chain Management. *Supply Chain Management: An International Journal*, 24(4), 469–483. <https://doi.org/10.1108/SCM-09-2018-0309>
- [39]. Cui, P., Dixon, J., Guin, U., & Dimase, D. (2019). A Blockchain-Based Framework for Supply Chain Provenance. *IEEE Access*, 7, 157113–157125.
<https://doi.org/10.1109/access.2019.2949951>
- [40]. Daneshvar, M., & Gargeya, V. B. (2019). Information systems for supply chain management: a systematic literature analysis. *International Journal of Production Research*, 57(15-16), 5318–5339. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1570376>
- [41]. Dashkevich, N., Counsell, S., & Destefanis, G. (2020). Blockchain Application for Central Banks: A Systematic Mapping Study. *IEEE Access*, 8, 139918–139952.
<https://doi.org/10.1109/access.2020.3012295>
- [42]. Datta, P. P. (2016). Enhancing competitive advantage by constructing supply chains to achieve superior performance. *Production Planning & Control*, 1–18.
<https://doi.org/10.1080/09537287.2016.1231854>
- [43]. Deshmukh, G., & Thameem Nizamudeen, S.M. (2024). Introduction: Decentralized Business in the Web3 Era. In *Decentralized Business: A Guide to Transforming Business Strategies with Distributed Ledger Technologies* (pp. 1-15). Berkeley, CA: Apress.
https://doi.org/10.1007/979-8-8688-0953-8_1
- [44]. Devi, S., & Voola, P. (2023). Blockchain Open Source Tools: Ethereum and Hyperledger Fabric. *IEEE Xplore*. <https://doi.org/10.1109/iceconf57129.2023.10084256>
- [45]. Dietrich, F., Ge, Y., Turgut, A., Louw, L., & Palm, D. (2021). Review and analysis of blockchain projects in supply chain management. *Procedia Computer Science*, 180, 724–733. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.01.295>
- [46]. Diro, A., Zhou, L., Saini, A., Kaiser, S., & Hiep, P. C. (2024). Leveraging zero knowledge proofs for blockchain-based identity sharing: A survey of advancements, challenges and opportunities. *Journal of Information Security and Applications*, 80.
<https://doi.org/10.1016/j.jisa.2023.103678>
- [47]. Dos Santos, S., Singh, J., Thulasiram, R. K., Kamali, S., Sirico, L., & Loud, L. (2022, June 1). A New Era of Blockchain-Powered Decentralized Finance (DeFi) - A Review. *IEEE Xplore*. <https://doi.org/10.1109/COMPSAC54236.2022.00203>
- [48]. Dr. Kumar Aditya, Dr. Subhadeep Chakraborty, Akash Dahire, Kumari, A., & Dr. Mariofanna Milanova. (2024). Integrating Blockchain, IoT, and AI in Supply Chain Management. Apress EBooks, 237–264. https://doi.org/10.1007/979-8-8688-0315-4_9
- [49]. Duarte, S., & Cruz-Machado, V. (2017). Exploring Linkages Between Lean and Green Supply Chain and the Industry 4.0. *Proceedings of the Eleventh International Conference on Management Science and Engineering Management*, 1242–1252.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-59280-0_103
- [50]. Dujak, D., & Sajter, D. (2018). Blockchain Applications in Supply Chain. *SMART Supply Network*, 21–46. https://doi.org/10.1007/978-3-319-91668-2_2

- [51]. Dutta, P., Choi, T.-M., Somani, S., & Butala, R. (2020). Blockchain Technology in Supply Chain operations: Applications, Challenges and Research Opportunities. *Transportation Research. Part E, Logistics and Transportation Review*, 142(1), 102067. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2020.102067>
- [52]. Efanov, D., & Roschin, P. (2018). The All-Pervasiveness of the Blockchain Technology. *Procedia Computer Science*, 123, 116–121. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.01.019>
- [53]. Elbahri, F. M., Ismael Al-Sanjary, O., Ali, M. A. M., Ali Naif, Z., Ibrahim, O. A., & Mohammed, M. N. (2019). Difference Comparison of SAP, Oracle, and Microsoft Solutions Based on Cloud ERP Systems: A Review. 2019 IEEE 15th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA). <https://doi.org/10.1109/cspa.2019.8695976>
- [54]. Elgazzar, S., Tipi, N., & Jones, G. (2019). Key characteristics for designing a supply chain performance measurement system. *International Journal of Productivity and Performance Management*, 68(2), 296–318. <https://doi.org/10.1108/ijppm-04-2018-0147>
- [55]. Esmailian, B., Sarkis, J., Lewis, K., & Behdad, S. (2020). Blockchain for the future of sustainable supply chain management in Industry 4.0. *Resources, Conservation and Recycling*, 163(0921-3449). <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921344920303815>
- [56]. Famous, M. S., Sayed, S., Mazumder, R., Khan, R. T., Kaiser, M. S., Hossain, M. S., Andersson, K., & Khondoker, R. (2025). Secure and Efficient Drug Supply Chain Management System: Leveraging Polymorphic Encryption, Blockchain, and Cloud Storage Integration. *Cyber Security and Applications*. <https://doi.org/10.1016/j.csa.2025.100103>
- [57]. Fauziah, Z., Latifah, H., Omar, X., Khoirunisa, A., & Millah, S. (2020). Application of Blockchain Technology in Smart Contracts: A Systematic Literature Review. *Aptisi Transactions on Technopreneurship (ATT)*, 2(2), 160–166. <https://doi.org/10.34306/att.v2i2.97>
- [58]. Fernandez-Carames, T. M., & Fraga-Lamas, P. (2019). A Review on the Application of Blockchain to the Next Generation of Cybersecure Industry 4.0 Smart Factories. *IEEE Access*, 7, 45201–45218. <https://doi.org/10.1109/access.2019.2908780>
- [59]. Francesco Maesa, D., Mori, P., & Ricci, L. (2019). A blockchain based approach for the definition of auditable Access Control systems. *Computers & Security*, 84, 93–119. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2019.03.016>
- [60]. 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>
- [61]. Foschini, L., Gavagna, A., Martuscelli, G., & Montanari, R. (2020, June). Hyperledger Fabric Blockchain: Chaincode Performance Analysis. *IEEE Xplore*. <https://doi.org/10.1109/ICC40277.2020.9149080>
- [62]. Galvez, J. F., Mejuto, J. C., & Simal-Gandara, J. (2018). Future challenges on the use of blockchain for food traceability analysis. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 107(107), 222–232. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2018.08.011>

- [63]. Gangwar, R. R., & Rupain, R. (2024). Blockchain Technology: Revolutionizing Agriculture. *International Journal of Agriculture Sciences*, 16(1), 12916–12922. https://www.researchgate.net/profile/Ruchi_Gangwar/publication/384289918_BLOCKCHAIN_TECHNOLOGY_REVOLUTIONIZING_AGRICULTURE/links/670629b02031942fe725bb5d/BLOCKCHAIN-TECHNOLOGY-REVOLUTIONIZING-AGRICULTURE.pdf
- [64]. Gartner. (2025). Supply Chain Analytics for CSCOs | Gartner. Gartner. <https://www.gartner.com/en/articles/supply-chain-analytics>
- [65]. Giannakis, M., Spanaki, K., & Dubey, R. (2019). A cloud-based supply chain management system: effects on supply chain responsiveness. *Journal of Enterprise Information Management*, 32(4), 585–607. <https://doi.org/10.1108/jeim-05-2018-0106>
- [66]. Gligor, D., Gligor, N., Holcomb, M., & Bozkurt, S. (2019). Distinguishing between the concepts of supply chain agility and resilience. *The International Journal of Logistics Management*, 30(2), 467–487. <https://doi.org/10.1108/ijlm-10-2017-0259>
- [67]. Gohil, D., & Thakker, S. V. (2021). Blockchain-integrated technologies for solving supply chain challenges. *Modern Supply Chain Research and Applications*, 3(2), 78–97. <https://doi.org/10.1108/mscra-10-2020-0028>
- [68]. Golosova, J., & Romanovs, A. (2018). The Advantages and Disadvantages of the Blockchain Technology. *IEEE 6th Workshop on Advances in Information, Electronic and Electrical Engineering (AIEEE)*, 1(1). <https://doi.org/10.1109/aieee.2018.8592253>
- [69]. Gómez Paredes, F. J., Godinho Filho, M., Thürer, M., Fernandes, N. O., & Jabbour, C. J. C. (2020). Factors for choosing production control systems in make-to-order shops: a systematic literature review. *Journal of Intelligent Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s10845-020-01673-z>
- [70]. Grieves, M. (2006, January 1). *Product Lifecycle Management: Driving the Next Generation of Lean Thinking*. McGraw-Hill. https://www.researchgate.net/publication/247267862_Product_Lifecycle_Management_Driving_the_Next_Generation_of_Lean_Thinking
- [71]. Greco, M., Petkus, M., & Haensler, A. (2018, August 29). MediLedger Documentation. <https://app.readthedocs.org/projects/mediledger/downloads/pdf/latest/>
- [72]. Gunasekaran, A., Subramanian, N., & Papadopoulos, T. (2017). Information technology for competitive advantage within logistics and supply chains: A review. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 99, 14–33. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.12.008>
- [73]. Guo, H., & Yu, X. (2022). A Survey on Blockchain Technology and its security. *Blockchain: Research and Applications*, 3(2). <https://doi.org/10.1016/j.bcra.2022.100067>
- [74]. Guo, M., Kong, X. T. R., Chan, H. K., & Thadani, D. R. (2023). Integrated inventory control and scheduling decision framework for packaging and products on a reusable transport item sharing platform. *International Journal of Production Research*, 61(13), 4575–4591. <https://doi.org/10.1080/00207543.2023.2187243>
- [75]. Gurtu, A., & Johny, J. (2019). Potential of blockchain technology in supply chain management: a literature review. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 49(9), 881–900. <https://doi.org/10.1108/ijpdml-11-2018-0371>

- [76]. Gupta, A. K., Awatade, G. V., Padole, S. S., & Choudhari, Y. S. (2022). Digital Supply Chain Management Using AI, ML and Blockchain. *Innovative Supply Chain Management via Digitalization and Artificial Intelligence*, 1–19.
https://doi.org/10.1007/978-981-19-0240-6_1
- [77]. Habib, G., Sharma, S., Ibrahim, S., Ahmad, I., Qureshi, S., & Ishfaq, M. (2022). Blockchain Technology: Benefits, Challenges, Applications, and Integration of Blockchain Technology with Cloud Computing. *Future Internet*, 14(11). MDPI.
<https://doi.org/10.3390/fi14110341>
- [78]. Hackius, N., & Petersen, M. (2017). Blockchain in logistics and supply chain : trick or treat? *Proceedings of the Hamburg International Conference of Logistics (HICL)*, 23(1), 3–18. <https://doi.org/10.15480/882.1444>
- [79]. Hammi, B., Zeadally, S., & Nebhen, J. (2023). Security threats, countermeasures, and Challenges of Digital Supply Chains. *ACM Computing Surveys*, 55(14s).
<https://doi.org/10.1145/3588999>
- [80]. Hao, Y., Li, Y., Dong, X., Fang, L., & Chen, P. (2018, June 1). Performance Analysis of Consensus Algorithm in Private Blockchain. *IEEE Xplore*.
<https://doi.org/10.1109/IVS.2018.8500557>
- [81]. Hassan, S. A. Z., Elakhdar, B. E., Saied, W. M., & Hassan, D. G. (2024). Leveraging new Technologies for Building a Comprehensive Smart MIS: Integrating ERP, Blockchain, IoT, Context-awareness, and Cloud Computing. *2024 6th International Conference on Computing and Informatics (ICCI)*, 459–465.
<https://doi.org/10.1109/icci61671.2024.10485102>
- [82]. Hastig, G. M., & Sodhi, M. S. (2020). Blockchain for Supply Chain Traceability: Business Requirements and Critical Success Factors. *Production and Operations Management*, 29(4), 935–954. <https://doi.org/10.1111/poms.13147>
- [83]. Hellani, H., Samhat, A. E., Chamoun, M., Ghor, H. E., & Serhrouchni, A. (2018, November 1). On BlockChain Technology: Overview of Bitcoin and Future Insights. *IEEE Xplore*. <https://doi.org/10.1109/IMCET.2018.8603029>
- [84]. Helmold, M. (2020). *Lean Management and Kaizen*. In *Management for Professionals*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-46981-8>
- [85]. Henninger, A., & Mashatan, A. (2021). Distributed Interoperable Records: The Key to Better Supply Chain Management. *Computers*, 10(7), 89.
<https://doi.org/10.3390/computers10070089>
- [86]. Hewa, T. M., Hu, Y., Liyanage, M., Kanhare, S., & Ylianttila, M. (2021). Survey on Blockchain based Smart Contracts: Technical Aspects and Future Research. *IEEE Access*, 9, 1–1. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3068178>
- [87]. Joo, J., & Han, Y. (2021). An Evidence of Distributed Trust in Blockchain-Based Sustainable Food Supply Chain. *Sustainability*, 13(19), 10980.
<https://doi.org/10.3390/su131910980>
- [88]. Jovanovic, M., Kostic, N., Sebastian, I. M., & Sedej, T. (2022). Managing a blockchain-based platform ecosystem for industry-wide adoption: The case of TradeLens. *Technological Forecasting and Social Change*, 184.
<https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121981>

- [89]. Jensen, T., Hedman, J., & Henningsson, S. (2019). How TradeLens Delivers Business Value With Blockchain Technology. *MIS Quarterly Executive*, 18(4), 221–243. <https://doi.org/10.17705/2msqe.00018>
- [90]. Kain, R., & Verma, A. (2018). Logistics Management in Supply Chain – An Overview. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 3811–3816. sciencedirect. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.634>
- [91]. Kamble, S., Gunasekaran, A., & Dhone, N. C. (2020). Industry 4.0 and lean manufacturing practices for sustainable organisational performance in Indian manufacturing companies. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1–19. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1630772>
- [92]. Kamath, R. (2018). Food Traceability on Blockchain: Walmart’s Pork and Mango Pilots with IBM. *The Journal of the British Blockchain Association*, 1(1), 1–12. [https://doi.org/10.31585/jbba-1-1-\(10\)2018](https://doi.org/10.31585/jbba-1-1-(10)2018)
- [93]. Kamilaris, A., Fonts, A., & Prenafeta-Boldu, F. X. (2019, August 18). The Rise of Blockchain Technology in Agriculture and Food Supply Chains. ResearchGate. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.07391>
- [94]. Kaur, S., Chaturvedi, S., Sharma, A., & Kar, J. (2021). A Research Survey on Applications of Consensus Protocols in Blockchain. *Security and Communication Networks*, 2021, 1–22. <https://doi.org/10.1155/2021/6693731>
- [95]. Kawaguchi, N. (2019). Application of Blockchain to Supply Chain: Flexible Blockchain Technology. *Procedia Computer Science*, 164, 143–148. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.12.166>
- [96]. Khan, S. N., Loukil, F., Ghedira-Guegan, C., Benkhelifa, E., & Bani-Hani, A. (2021). Blockchain smart contracts: Applications, challenges, and future trends. *Peer-To-Peer Networking and Applications*, 14(1), 2901–2925. <https://doi.org/10.1007/s12083-021-01127-0>
- [97]. Khan, S., Amin, M. B., Azar, A. T., & Aslam, S. (2021). Towards Interoperable Blockchains: A Survey on the Role of Smart Contracts in Blockchain Interoperability. *IEEE Access*, 1–1. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3106384>
- [98]. Khetry, A. R., Patil, K. R., & Basavaraju, A. C. (2021). A Detailed Review on Blockchain and Its Applications. *SN Computer Science*, 2(1). <https://doi.org/10.1007/s42979-020-00366-x>
- [99]. Koberg, E., & Longoni, A. (2019). A systematic review of sustainable supply chain management in global supply chains. *Journal of Cleaner Production*, 207(1), 1084–1098. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.033>
- [100]. Kush, R. D., Warzel, D., Kush, M. A., Sherman, A., Navarro, E. A., Fitzmartin, R., Pétavy, F., Galvez, J., Becnel, L. B., Zhou, F. L., Harmon, N., Jauregui, B., Jackson, T., & Hudson, L. (2020). FAIR data sharing: The roles of common data elements and harmonization. *Journal of Biomedical Informatics*, 107, 103421. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2020.103421>
- [101]. Kumar, N., Kumar, K., Aeron, A., & Verre, F. (2025). Blockchain Technology in Supply Chain Management: Innovations, Applications, and Challenges. *Telematics and Informatics Reports*, 18, 100204. <https://doi.org/10.1016/j.teler.2025.100204>

- [102]. Koh, L., Dolgui, A., & Sarkis, J. (2020). Blockchain in transport and logistics – paradigms and transitions. *International Journal of Production Research*, 58(7), 2054–2062. <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/00207543.2020.1736428>
- [103]. Kwak, D.-W., Seo, Y.-J., & Mason, R. (2018). Investigating the relationship between supply chain innovation, risk management capabilities and competitive advantage in global supply chains. *International Journal of Operations & Production Management*, 38(1), 2–21. <https://doi.org/10.1108/ijopm-06-2015-0390>
- [104]. Laroia, C., Saxena, D., & Komalavalli, C. (2020, January 1). Chapter 9 - Applications of Blockchain Technology (S. Krishnan, V. E. Balas, E. G. Julie, Y. H. Robinson, S. Balaji, & R. Kumar, Eds.). ScienceDirect; Academic Press. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128198162000095>
- [105]. Lashkari, B., & Musilek, P. (2021). A Comprehensive Review of Blockchain Consensus Mechanisms. *IEEE Access*, 9, 43620–43652. <https://doi.org/10.1109/access.2021.3065880>
- [106]. Lin, C. F. (2022). Blockchainizing food law: promises and perils of incorporating distributed ledger technologies to food safety, traceability, and sustainability governance. In: *Food Safety and Technology Governance* (pp. 74-102). Routledge.
- [107]. Li, Z., Wu, H., King, B., Miled, Z. B., Wassick, J., & Tazelaar, J. (2018, June 1). A Hybrid Blockchain Ledger for Supply Chain Visibility. *IEEE Xplore*. <https://doi.org/10.1109/ISPD2018.2018.00025>
- [108]. Litke, A., Anagnostopoulos, D., & Varvarigou, T. (2019). Blockchains for Supply Chain Management: Architectural Elements and Challenges Towards a Global Scale Deployment. *Logistics*, 3(1). <https://doi.org/10.3390/logistics3010005>
- [109]. Liu, X., Li, L., Sun, R., Li, W., & Liu, T. (2023). Lightweight multi-departmental data sharing scheme based on consortium blockchain. *Peer-To-Peer Networking and Applications*, 16(5), 2399–2414. <https://doi.org/10.1007/s12083-023-01523-8>
- [110]. Magableh, G. M. (2021). Supply Chains and the COVID-19 Pandemic: A Comprehensive Framework. *European Management Review*, 18(3), 363–382. NCBI. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/emre.12449>
- [111]. Makridakis, S., & Christodoulou, K. (2019). Blockchain: Current Challenges and Future Prospects/Applications. *Future Internet*, 11(12). <https://doi.org/10.3390/fi11120258>
- [112]. Mavidis, A., & Folinas, D. (2022). From Public E-Procurement 3.0 to E-Procurement 4.0; A Critical Literature Review. *Sustainability*, 14(18). <https://doi.org/10.3390/su141811252>
- [113]. Mazzoni, M., Corradi, A., & Di Nicola, V. (2021). Performance evaluation of permissioned blockchains for financial applications: The ConsenSys Quorum case study. *Blockchain: Research and Applications*, 3(1), 100026. <https://doi.org/10.1016/j.bcr.2021.100026>
- [114]. Mellinger, C. D., & Hanson, T. A. (2021). Methodological considerations for survey research: Validity, reliability, and quantitative analysis. *Linguistica Antverpiensia, New Series – Themes in Translation Studies*, 19(1). <https://lans-tts.uantwerpen.be/index.php/LANS-TTS/article/view/549>

- [115]. Melissari, F., Papadakis, A., Chatzitheodorou, D., Tran, D., Schouteten, J., Athanasiou, G., & Zahariadis, T. (2024). Experiences Using Ethereum and Quorum Blockchain Smart Contracts in Dairy Production. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 13(1), 6–6. <https://doi.org/10.3390/jsan13010006>
- [116]. Melon, L., & Spruk, R. (2020). The impact of e-procurement on institutional quality. *Journal of Public Procurement*. <https://doi.org/10.1108/jopp-07-2019-0050>
- [117]. Miguel, H., González, G., Antonio, L., Moreno, G., Luisa, A., & Corralejo, G. (2021, December 1). Hybrid Push-Pull Systems: Classification, Optimal Methods and Uncertainty. *IEEE Xplore*. <https://doi.org/10.1109/CSCI54926.2021.00167>
- [118]. Mohan, C. (2019). State of Public and Private Blockchains. *Proceedings of the 2019 International Conference on Management of Data*. <https://doi.org/10.1145/3299869.3314116>
- [119]. Mrabti, N., Gargouri, M. A., Hamani, N., & Kermad, L. (2021). Towards a Sustainable Collaborative Distribution Network 4.0 with Blockchain Involvement. *Springer EBooks*, 629, 41–52. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85969-5_4
- [120]. Musa, A., Gunasekaran, A., Yusuf, Y., & Abdelazim, A. (2014). Embedded devices for supply chain applications: Towards hardware integration of disparate technologies. *Expert Systems with Applications*, 41(1), 137–155. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.07.017>
- [121]. Musa, T. A., & Bouras, A. (2022). Anomaly Detection in Blockchain-Enabled Supply Chain: An Ontological Approach. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 253–266. https://doi.org/10.1007/978-3-030-94335-6_18
- [122]. Naidu, V., Mudliar, K., Naik, A., & Bhavathankar, P. P. (2018). A Fully Observable Supply Chain Management System Using Block Chain and IOT. *2018 3rd International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*. <https://doi.org/10.1109/i2ct.2018.8529725>
- [123]. Nanaji, Dr. U., Rao, Dr. C. P. V. N. J. M., & Prasad, K. V. (2025, May). SECURE SUPPLY CHAIN MANAGEMENT USING BLOCKCHAIN AND ANOMALY DETECTION SYSTEM USING PYTHON, AI AND ML. *Eprajournals.com; EPRA International Journal of Research & Development (IJRD)*. <https://eprajournals.com/IJSR/article/16350/abstract>
- [124]. Nathan, J., & Jacobs, B. (2020). Blockchain consortium networks: Adding security and trust in financial services. *Journal of Corporate Accounting & Finance*, 31(2), 29–33. <https://doi.org/10.1002/jcaf.22428>
- [125]. O’Leary, D. E. (2017). Configuring blockchain architectures for transaction information in blockchain consortiums: The case of accounting and supply chain systems. *Intelligent Systems in Accounting, Finance and Management*, 24(4), 138–147. <https://doi.org/10.1002/isaf.1417>
- [126]. Ogunyankinnu, T., Onotole, E. F., Osunkanmibi, A. A., Adeoye, Y., & Pub, A. (2022). Blockchain and AI synergies for effective supply chain management. *International Journal of Multidisciplinary Research and Growth Evaluation*, 03(04), 569–580. <https://doi.org/10.54660/IJMRGE.2021.2.4-873-876>

- [127]. Ozmen, E., & Bora, N. (2023). Blockchain, IoT, and Artificial Intelligence Technologies for Supply Chain Management: Bibliometric Analysis. CRC Press EBooks, 19–41. <https://doi.org/10.1201/9781003264521-2>
- [128]. Panda, S. S., Mohanta, B. K., Satapathy, U., Jena, D., Gountia, D., & Patra, T. K. (2019, October 1). Study of Blockchain Based Decentralized Consensus Algorithms. IEEE Xplore. <https://doi.org/10.1109/TENCON.2019.8929439>
- [129]. Papachristodoulou, E., Koutsaki, M., & Kirkos, E. (2017). Business intelligence and SMEs: Bridging the gap. Journal of Intelligence Studies in Business, 7(1). search.ebscohost.com. <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&profile=ehost&scope=site&authtype=crawler&jrnl=2001015X&AN=122751343&h=YST5ewJOEwa2yQp40FjP1bzendlQQB02rtcIJmgcSneP6WMzkAWsFf8bOOQWJY9uEeDHwPEvmuf2ziv95JsIWA%3D%3D&url=c>
- [130]. Paul, P., Aithal, P. S., Saavedra, R., & Ghosh, S. (2021). Blockchain Technology and Its Types—A Short Review. International Journal of Applied Science and Engineering (IJASE) , 9(2). papers.ssrn.com. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4050933
- [131]. Pires Ribeiro, J., & Barbosa-Povoa, A. (2018). Supply Chain Resilience: Definitions and quantitative modelling approaches – A literature review. Computers & Industrial Engineering, 115(1), 109–122. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.11.006>
- [132]. Qi, J., & Guan, Y. (2022). Practical Byzantine fault tolerance consensus based on comprehensive reputation. Peer-To-Peer Networking and Applications. <https://doi.org/10.1007/s12083-022-01408-2>
- [133]. Moosavi, J., Naeni, L. M., Fathollahi-Fard, A. M., & Fiore, U. (2021). Blockchain in supply chain management: a review, bibliometric, and network analysis. Environmental Science and Pollution Research, 1(2). <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13094-3>
- [134]. Qu, C., & Kim, E. (2024). Reviewing the Roles of AI-Integrated Technologies in Sustainable Supply Chain Management: Research Propositions and a Framework for Future Directions. Sustainability, 16(14), 6186. <https://doi.org/10.3390/su16146186>
- [135]. Queiroz, M. M., Telles, R., & Bonilla, S. H. (2020). Blockchain and supply chain management integration: A systematic review of the literature. Supply Chain Management: An International Journal, 25(2), 241–254. <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/scm-03-2018-0143/full/html>
- [136]. Rahim, R., Patan, R., Manikandan, R., & Kumar, S. R. (2020). Introduction to Blockchain and Big Data. CRC Press EBooks, 1–23. <https://doi.org/10.1201/9780429352546-1>
- [137]. Ramadoss, R. (2022). Blockchain technology: An overview. IEEE Potentials, 41(6), 6–12. <https://doi.org/10.1109/mpot.2022.3208395>
- [138]. Rashmi, M., William, P., Yogeesh, N., & Girija, D.K. (2023). Blockchain-based cloud storage using secure and decentralised solution. In International Conference on Data Analytics and Insights (pp. 269-279). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-99-3878-0_23
- [139]. Ratta, P., Kaur, A., Sharma, S., Shabaz, M., & Dhiman, G. (2021). Application of Blockchain and Internet of Things in Healthcare and Medical Sector: Applications,

- Challenges, and Future Perspectives. *Journal of Food Quality*, 2021, 1–20.
<https://doi.org/10.1155/2021/7608296>
- [140]. Rejeb, A., Keogh, J. G., & Treiblmaier, H. (2019). Leveraging the Internet of Things and Blockchain Technology in Supply Chain Management. *Future Internet*, 11(7), 161.
<https://doi.org/10.3390/fi11070161>
- [141]. Rizwan, A., Karras, D. A., Kumar, J., Sánchez-Chero, M., Mogollón Taboada, M. M., & Altamirano, G. C. (2022). An Internet of Things (IoT) Based Block Chain Technology to Enhance the Quality of Supply Chain Management (SCM). *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, e9679050. <https://doi.org/10.1155/2022/9679050>
- [142]. Saad, N. A., Elgazzar, S., & Kac, S. M. (2022). Linking supply chain management practices to customer relationship management objectives: a proposed framework. *Verslas: Teorija Ir Praktika*, 23(1), 154–164. <https://www.cceol.com/search/article-detail?id=1057301>
- [143]. Saberi, S. (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>
- [144]. Salam, M. A., & Khan, S. A. (2018). Achieving supply chain excellence through supplier management. *Benchmarking: An International Journal*, 25(9), 4084–4102.
<https://doi.org/10.1108/bij-02-2018-0042>
- [145]. Sallam, K., Mohamed, M., & Mohamed, A. W. (2023). Internet of Things (IoT) in Supply Chain Management: Challenges, Opportunities, and Best Practices. *Sustainable Machine Intelligence Journal*, 2(2). <https://doi.org/10.61185/SMIJ.2023.22103>
- [146]. Salman, T., Jain, R., & Gupta, L. (2018). Probabilistic blockchains: A blockchain paradigm for collaborative decision-making. In 2018 9th IEEE Annual Ubiquitous Computing, Electronics & Mobile Communication Conference (UEMCON) (pp. 457–465). IEEE. <https://doi.org/10.1109/UEMCON.2018.8796512>
- [147]. Sapra, N., Shaikh, I., & Dash, A. (2023). Impact of Proof of Work (PoW)-Based Blockchain Applications on the Environment: A Systematic Review and Research Agenda. *Journal of Risk and Financial Management*, 16(4), 218–218.
<https://doi.org/10.3390/jrfm16040218>
- [148]. Saraf, C., & Sabadra, S. (2018, May 1). Blockchain platforms: A compendium. *IEEE Xplore*. <https://doi.org/10.1109/ICIRD.2018.8376323>
- [149]. Sarmah, S. S. (2018). Understanding Blockchain Technology. *Computer Science and Engineering*, 8(2), 23–29. <https://doi.org/10.5923/j.computer.20180802.02>
- [150]. Sarode, R. P., Poudel, M., Shrestha, S., & Bhalla, S. (2021). Blockchain for committing peer-to-peer transactions using distributed ledger technologies. *International Journal of Computational Science and Engineering*, 24(3), 215–219.
<https://doi.org/10.1504/ijcse.2021.115651>
- [151]. Sasson, E. B., Chiesa, A., Garman, C., Green, M., Miers, I., Tromer, E., & Virza, M. (2014). Zerocash: Decentralized Anonymous Payments from Bitcoin. 2014 IEEE Symposium on Security and Privacy. <https://doi.org/10.1109/sp.2014.36>
- [152]. Schinckus, C. (2021). Proof-of-work based blockchain technology and Anthropocene: An undermined situation? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111682>

- [153]. Schilhabel, S., Sankaranarayanan, B., Basu, C., Madan, M., Glennan, C., & McSherry, L. (2023). BLOCKCHAIN TECHNOLOGY IN THE FOOD SUPPLY CHAIN: INFLUENCES ON SUPPLIER RELATIONSHIPS AND OUTCOMES. *EBSCO*, 24(3), 321–332. https://doi.org/10.48009/3_iis_2023_127
- [154]. Sedlmeir, J., Buhl, H. U., Fridgen, G., & Keller, R. (2020). The Energy Consumption of Blockchain Technology: Beyond Myth. *Business & Information Systems Engineering*, 62(6), 599–608. <https://doi.org/10.1007/s12599-020-00656-x>
- [155]. She, Z. (2022). VeChain: A Renovation of Supply Chain Management --A Look into its Organisation, Current Activity, and Prospect. *Web of Proceedings*. <https://doi.org/10.25236/iceieis.2022.067>
- [156]. Shifferaw, Y., & Lemma, S. (2021). Limitations of proof of stake algorithm in blockchain: A review. *Zede Journal*, 39(1), 81–95. <https://www.ajol.info/index.php/zj/article/view/216947>
- [157]. Shrestha, R., Bajracharya, R., Shrestha, A. P., & Nam, S. Y. (2020). A new type of blockchain for secure message exchange in VANET. *Digital Communications and Networks*, 6(2), 177–186. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2019.04.003>
- [158]. Silvestre, B. S., Monteiro, M. S., Viana, F. L. E., & Sousa-Filho, J. M. (2018). Challenges for sustainable supply chain management: When stakeholder collaboration becomes conducive to corruption. *Journal of Cleaner Production*, 194(1), 766–776. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.127>
- [159]. Singh, A., Parizi, R. M., Zhang, Q., Choo, K.-K. R., & Dehghantanha, A. (2020). Blockchain smart contracts formalization: Approaches and challenges to address vulnerabilities. *Computers & Security*, 88. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2019.101654>
- [160]. Singh, G., & Wahid, N. A. (2014). Supply Chain Risk Management: A Review. *International Journal of Supply Chain Management*, 3(3), 59–63. https://dlwqtxts1xzle7.cloudfront.net/95424981/230744270-libre.pdf?1670489605=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DSupply_Chain_Risk_Management_A_Review.pdf&Expires=1743516865&Signature=BUINVpFxrFhmnDpysLs7wRS9qcNaG9Dhec~OLhUoeRFFNv7C92WUdIjOymhBmPao63Td6WhxsX18e945MszVfVTE32zfnEi3sJg6cb~gvgo588ld8KCGx1V6L51joX2HLjDDaK7PFCzjlfGftNu5vZx60li~Mkc7uF77d8OJYAeCNhZmBCcof70svFo3kJNnohqSuke9KorDK2dIcf5jqBsvoezqybh0D0qsEFTCbQeg4S~bFWePYDyQ-yMP5VuSLkH0nihMkT0N3m4skmuU8NiuLwaB5O7sDg37mhDDkloI-UxXuFm16MWVNRxVztuk8Nn6jMCNa5nIvzBmpy9uw__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- [161]. Singh, R. K., & Modgil, S. (2024). Adapting to disruption: the impact of agility, absorptive capacity and ambidexterity on supply chain resilience. *International Journal of Productivity and Performance Management*. <https://doi.org/10.1108/ijppm-01-2024-0057>
- [162]. Singh, R., & Vishwakarma, L. P. (2023). Application of Blockchain Technology in agri-food supply chains: Opportunities and challenges. *Blockchain in a Volatile-Uncertain-Complex-Ambiguous World*, 101–117. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-89963-5.00014-9>
- [163]. Sodhi, M. S., Seyedghorban, Z., Tahernejad, H., & Samson, D. (2022). Why emerging supply chain technologies initially disappoint: Blockchain, IoT, and AI.

- Production and Operations Management, 31(6).
<https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1111/poms.13694>
- [164]. Sodhi, M. S., Tang, C. S., & Willenson, E. T. (2021). Research opportunities in preparing supply chains of essential goods for future pandemics. *International Journal of Production Research*, 61(8), 1–16. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1884310>
- [165]. Solanki, M., & Brewster, C. (2025). Representing supply chain events on the Web of data. *Aston Research Explorer*, 18–29.
<https://research.aston.ac.uk/en/publications/representing-supply-chain-events-on-the-web-of-data>
- [166]. Son, D. H., Duc, M. B., Khoa, T. V., Trung, N. L., Hoang, D. T., Minh, H. T., Alem, Y., & Minh, L. Q. (2024). Semi-Supervised Learning for Anomaly Detection in Blockchain-based Supply Chains. *ArXiv (Cornell University)*.
<https://doi.org/10.48550/arxiv.2407.15603>
- [167]. Soori, M., Jough, F. K. G., Dastres, R., & Arezoo, B. (2024). Blockchains for industrial Internet of Things in sustainable supply chain management of industry 4.0, a review. *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, 3, 100026.
<https://doi.org/10.1016/j.smse.2024.100026>
- [168]. Sriman, B., Ganesh Kumar, S., & Shamili, P. (2020). Blockchain Technology: Consensus Protocol Proof of Work and Proof of Stake. *Intelligent Computing and Applications*, 395–406. https://doi.org/10.1007/978-981-15-5566-4_34
- [169]. Stadtler, H. (2005). Supply chain management and advanced planning—basics, overview and challenges. *European Journal of Operational Research*, 163(3), 575–588.
<https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.03.001>
- [170]. Stark, J. (2022). Product Lifecycle Management (PLM). *Product Lifecycle Management*, 1(1), 1–32. https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-98578-3_1
- [171]. Sunny, J., Undralla, N., & Pillai, V. M. (2020). Supply chain transparency through blockchain-based traceability: An overview with demonstration. *Computers & Industrial Engineering*, 150(150), 106–895. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2020.106895>
- [172]. Sunkari, S. (2022, June 18). A Brief Review on CRM, Salesforce and Reasons Stating Salesforce as One of the Top CRM's. *Papers.ssrn.com*.
https://papers.ssrn.com/sol3/Papers.cfm?abstract_id=4158451
- [173]. Tian, F. (2016). An agri-food supply chain traceability system for China based on RFID & blockchain technology. 2016 13th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM), 1–6. <https://doi.org/10.1109/icsssm.2016.7538424>
- [174]. Toorajipour, R., Sohrabpour, V., Nazarpour, A., Oghazi, P., & Fischl, M. (2021). Artificial intelligence in supply chain management: A systematic literature review. *Journal of Business Research*, 122(1), 502–517. *Sciencedirect*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014829632030583X>
- [175]. Torabizadeh, M., Yusof, N. M., Ma'aram, A., & Shahrour, A. M. (2020). Identifying sustainable warehouse management system indicators and proposing new weighting method. *Journal of Cleaner Production*, 248(248).
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119190>

- [176]. Treiblmaier, H. (2019). Toward More Rigorous Blockchain Research: Recommendations for Writing Blockchain Case Studies. *Frontiers in Blockchain*, 2(1). <https://doi.org/10.3389/fbloc.2019.00003>
- [177]. Tseng, M.-L., Islam, M. S., Karia, N., Fauzi, F. A., & Afrin, S. (2019). A literature review on green supply chain management: Trends and future challenges. *Resources, Conservation and Recycling*, 141(1), 145–162. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.009>
- [178]. Tsolakis, N., Schumacher, R., Dora, M., & Kumar, M. (2022). Artificial intelligence and blockchain implementation in supply chains: a pathway to sustainability and data monetisation? *Annals of Operations Research*, 327(1), 157–210. <https://doi.org/10.1007/s10479-022-04785-2>
- [179]. Tuan, T., Dinh, A., Wang, J., Chen, G., Liu, R., Beng, Ooi, C., & Tan, K.-L. (2017). BLOCKBENCH: A Framework for Analyzing Private Blockchains. *SIGMOD '17: Proceedings of the 2017 ACM International Conference on Management of Data*. <https://doi.org/10.1145/3035918.3064033>
- [180]. Valashani, M. A., & Abukari, A. M. (2020). ERP Systems Architecture for the modern age: A review of the state of the art Technologies. *Journal of Applied Intelligent Systems and Information Sciences*, 1(2), 70–90. <https://doi.org/10.22034/jaisis.2020.232506.1009>
- [181]. Verma, A., Bhattacharya, P., Madhani, N., Trivedi, C., Bhushan, B., Tanwar, S., Sharma, G., Bokoro, P. N., & Sharma, R. (2022). Blockchain for Industry 5.0: Vision, Opportunities, Key Enablers, and Future Directions. *IEEE Access*, 10, 69160–69199. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3186892>
- [182]. Venuta, M., Zambetti, M., Pirola, F., Pezzotta, G., Grasseni, P., Ferrari, M., & Salvi, S. (2021). Implementation of IoT Platform's Dashboards for the Visualisation of Dynamic KPIs: Insights from a Case Study. *Springer EBooks*, 629, 517–525. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85969-5_48
- [183]. Vieira, J., Deschamps, F., & Valle, P. L. (2021). Advanced Planning and Scheduling (APS) Systems: A Systematic Literature Review. *Transdisciplinary Engineering for Resilience: Responding to System Disruptions*, 16. <https://doi.org/10.3233/atde210118>
- [184]. Vipin, J. (2021). An overview of wal-mart, amazon and its supply chain. *ACADEMICIA: An International Multidisciplinary Research Journal*, 11(12). <https://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:aca&volume=11&issue=12&article=119>
- [185]. Vijaykumar, V., Mercy, P., Agnes, L., Leena, H. M., & Savarimuthu, C. (2024). Convergence of IoT, Artificial Intelligence and Blockchain Approaches for Supply Chain Management. *Apress EBooks*, 45–89. https://doi.org/10.1007/979-8-8688-0315-4_2
- [186]. Vujičić, D., Jagodić, D., & Randić, S. (2018, March 1). Blockchain technology, bitcoin, and Ethereum: A brief overview. *IEEE Xplore*. <https://doi.org/10.1109/INFOTEH.2018.8345547>
- [187]. Wamba, S. F., & Queiroz, M. M. (2020). Blockchain in the operations and supply chain management: Benefits, challenges and future research opportunities. *International Journal of Information Management*, 52(2), 102064–102067. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.102064>

- [188]. Wang, L., Liu, Z., Liu, A., & Tao, F. (2021). Artificial intelligence in product lifecycle management. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114(3-4), 771–796. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-06882-1>
- [189]. Wang, L.-C., Chen, C.-C., Liu, J.-L., & Chu, P.-C. (2021). Framework and deployment of a cloud-based advanced planning and scheduling system. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 70. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2020.102088>
- [190]. Wang, M., Wu, Y., Chen, B., & Evans, M. (2020). Blockchain and Supply Chain Management: a New Paradigm for Supply Chain Integration and Collaboration. *Operations and Supply Chain Management: An International Journal*, 14(1), 111–122. <https://journal.oscm-forum.org/publication/article/blockchain-and-supply-chain-management-a-new-paradigm-for-supply-chain-integration-and-collaboration>
- [191]. Wang, T., Zhao, C., Yang, Q., Zhang, S., & Liew, S. C. (2021). Ethna: Analyzing the Underlying Peer-to-Peer Network of Ethereum Blockchain. *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, 8(3), 2131–2146. <https://doi.org/10.1109/tNSE.2021.3078181>
- [192]. Wendl, M., Doan, M. H., & Sassen, R. (2023). The environmental impact of cryptocurrencies using proof of work and proof of stake consensus algorithms: A systematic review. *Journal of Environmental Management*, 326. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116530>
- [193]. White, B. S., King, C. G., & Holladay, J. (2020). Blockchain security risk assessment and the auditor. *Journal of Corporate Accounting & Finance*, 31(2), 47–53. <https://doi.org/10.1002/jcaf.22433>
- [194]. Wiedmer, R., & Griffis, S. E. (2021). Structural characteristics of complex supply chain networks. *Journal of Business Logistics*, 42(2), 264–290. <https://doi.org/10.1111/jbl.12283>
- [195]. Wu, K., Ma, Y., Huang, G., & Liu, X. (2019). A first look at blockchain-based decentralized applications. *Software: Practice and Experience*, 51(10). <https://doi.org/10.1002/spe.2751>
- [196]. Wu, K.-J., Tseng, M.-L., Chiu, A. S. F., & Lim, M. K. (2017). Achieving competitive advantage through supply chain agility under uncertainty: A novel multi-criteria decision-making structure. *International Journal of Production Economics*, 190, 96–107. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.08.027>
- [197]. Wu, J., & Tran, N.K. (2018). Application of blockchain technology in sustainable energy systems: An overview. *Sustainability*, 10(9), 3067. <https://doi.org/10.3390/su10093067>
- [198]. Xiong, H., Chen, M., Wu, C., Zhao, Y., & Yi, W. (2022). Research on Progress of Blockchain Consensus Algorithm: A Review on Recent Progress of Blockchain Consensus Algorithms. *Future Internet*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/fi14020047>
- [199]. Xu, X., Weber, I., Staples, M., Zhu, L., Bosch, J., Bass, L., Pautasso, C., & Rimba, P. (2017). A Taxonomy of Blockchain-Based Systems for Architecture Design. 2017 IEEE International Conference on Software Architecture (ICSA). <https://doi.org/10.1109/icsa.2017.33>

- [200]. Xu, Z., Elomri, A., Kerbache, L., & El Omri, A. (2020). Impacts of COVID-19 on Global Supply Chains: Facts and Perspectives. *IEEE Engineering Management Review*, 48(3), 153–166. <https://doi.org/10.1109/EMR.2020.3018420>
- [201]. Xu, J., Guo, S., Xie, D., & Yan, Y. (2020). Blockchain: A new safeguard for agri-foods. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 4, 153–161. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2020.08.002>
- [202]. Yang, R., Wakefield, R., Lyu, S., Jayasuriya, S., Han, F., Yi, X., Yang, X., Amarasinghe, G., & Chen, S. (2020). Public and private blockchain in construction business process and information integration. *Automation in Construction*, 118(1). <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103276>
- [203]. Yu, S., Lv, K., Shao, Z., Guo, Y., Zou, J., & Zhang, B. (2018). A High Performance Blockchain Platform for Intelligent Devices. 2018 1st IEEE International Conference on Hot Information-Centric Networking (HotICN). <https://doi.org/10.1109/hotcn.2018.8606017>
- [204]. Zakari, N., Al-Razgan, M., Alsaadi, A., Alshareef, H., Al saigh, H., Alashaikh, L., Alharbi, M., Alomar, R., & Alotaibi, S. (2022). Blockchain technology in the pharmaceutical industry: a systematic review. *PeerJ Computer Science*, 8(1). <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.840>
- [205]. Zamani, M., Movahedi, M., & Raykova, M. (2018). Rapid-Chain: Scaling Blockchain via Full Sharding. *Canada ACM Reference Format: Mahdi Zamani*, 18, 931–948. <https://doi.org/10.1145/3243734.3243853>
- [206]. Zavolokina, L., Ziolkowski, R., & Bauer, I. (2020). Management, Governance, and Value Creation in a Blockchain Consortium. *MIS Quarterly Executive*, 19(1), 1–17. <https://doi.org/10.17705/2msqe.00022>
- [207]. Zhang, X., Xue, M., & Miao, X. (2022). A consensus algorithm based on risk assessment model for permissioned blockchain. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022(1), 8698009. <https://doi.org/10.1155/2022/8698009>
- [208]. Zhang, Y., Lee, S., & Van De Ligt, J. (2019). Blockchain Technology: What Is It? https://mnshmp.dl9.umn.edu/sites/mnshmp.umn.edu/files/2023-06/shmp_2018119.46_blockchain_technology_part_1-sciencepage.pdf
- [209]. Zhong, W., Yang, C., Liang, W., Cai, J., Lin, C., Liao, J., & Xiong, N. (2023). Byzantine Fault-Tolerant Consensus Algorithms: A Survey. *Electronics*, 12(18). <https://doi.org/10.3390/electronics12183801>
- [210]. Zhu, Q., Bai, C., & Sarkis, J. (2022). Blockchain technology and supply chains: The paradox of the atheoretical research discourse. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 164, 102824. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2022.102824>
- [211]. Zhuk, A. (2025). Beyond the blockchain hype: addressing legal and regulatory challenges. *SN Social Sciences*, 5(2). <https://doi.org/10.1007/s43545-024-01044-y>
- [212]. Ziegler, Y., & Uli, V. (2021). Supply chain management and blockchain: bridging the antecedents of the technology with the status quo of use case applications. *International Journal of Value Chain Management*, 12(3), 267. <https://doi.org/10.1504/ijvcm.2021.118291>

- [213]. Zutshi, A., Grilo, A., & Nodehi, T. (2021). The value proposition of blockchain technologies and its impact on Digital Platforms. Computers & Industrial Engineering, 155, 107187. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107187>