



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
UNIVERSITY OF PIRAEUS

ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΩΝ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΚΗΣ ΚΑΙ ΕΠΙΚΟΙΝΩΝΙΩΝ

ΤΜΗΜΑ «ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ –
ΚΥΒΕΡΝΟΑΣΦΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΕΠΙΣΤΗΜΗ ΤΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ»

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΣΠΟΥΔΩΝ «ΜΠΣ ΚΑΤΑΝΕΜΗΜΕΝΑ ΣΥΣΤΗΜΑΤΑ,
ΑΣΦΑΛΕΙΑ ΚΑΙ ΑΝΑΔΥΟΜΕΝΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑΣ»

Μεταπτυχιακή Διατριβή

Τίτλος Μεταπτυχιακής Διατριβής	Σχεδιασμός Συστημάτων Εφοδιαστικής Αλυσίδας Κλειστού Βρόγχου: Προκλήσεις και Ευκαιρίες Designing Closed Loop Supply Chain Systems: Challenges and Opportunities
Όνοματεπώνυμο Φοιτητή	Δημήτριος Ανδριανόπουλος
Πατρώνυμο	Ιωάννης
Αριθμός Μητρώου	ΜΠΚΣΑ20020
Επιβλέπων	Κωνσταντίνος Διαγκούρας, Επίκουρος Καθηγητής

Ημερομηνία Παράδοσης:

Νοέμβριος 2024

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή

Κωνσταντίνος Λιαγκούρας
Επίκουρος Καθηγητής

Κωνσταντίνος Μεταξιώτης
Καθηγητής

Δημήτριος Αποστόλου
Καθηγητής

Ευχαριστίες

Η παρούσα Μεταπτυχιακή Διατριβή εκπονήθηκε στο Πανεπιστήμιο Πειραιώς, Σχολή Τεχνολογιών Πληροφορικής και Επικοινωνιών, Τμήμα Πληροφορικής και Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Καταναεμημένα Συστήματα, Ασφάλεια και Αναδυόμενες Τεχνολογίες Πληροφορίας».

Ένα μεγάλο ευχαριστώ στον επιβλέπων καθηγητή αυτής της Διατριβής, Επίκουρο Καθηγητή του Τμήματος Πληροφορικής κ. Λιαγκούρα Κωνσταντίνο καθώς επίσης και στον πρώην Πρόεδρο του ΠΜΣ και Καθηγητή κ. Αποστόλου Δημήτριο αλλά και τον νυν Πρόεδρο του ΠΜΣ «Κυβερνοασφάλεια και Επιστήμη των Δεδομένων», Καθηγητή κ. Κοτζανικολάου Παναγιώτη. Σε αυτό το σημείο να ευχαριστήσω θερμά και το σύνολο των διδασκόντων σε όλα τα μαθήματα για τις πολύτιμες γνώσεις που μου προσέφεραν.

Επίσης δεν θα μπορούσα να παραλείψω στις ευχαριστίες μου την οικογένεια μου αλλά και τους κοντινούς μου φίλους για την υποστήριξη και την εμπιστοσύνη που έδειξαν προς το πρόσωπο μου.

Αθήνα, Νοέμβριος 2024

Περίληψη

Η εργασία παρέχει μια ολοκληρωμένη ανασκόπηση και σύνθεση της βιβλιογραφίας για τα συστήματα εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου (CLSC), εστιάζοντας σε βασικούς τομείς όπως η βελτιστοποίηση αντίστροφης εφοδιαστικής, η βιωσιμότητα, η ολοκλήρωση της κυκλικής οικονομίας, η ψηφιοποίηση, οι οικονομικές και χρηματοοικονομικές πτυχές, ο σχεδιασμός δικτύου, η ανάκτηση προϊόντων, ο συντονισμός, η διαχείριση κινδύνων και η καινοτομία. Η μεθοδολογία που χρησιμοποιείται περιλαμβάνει μια κριτική ανάλυση των υφιστάμενων μοντέλων και πλαισίων για τον εντοπισμό βέλτιστων πρακτικών και αναδυόμενων τάσεων στα CLSC. Τα αποτελέσματα υπογραμμίζουν τον κρίσιμο ρόλο των μοντέλων βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων στη βελτίωση της οικονομικής και περιβαλλοντικής απόδοσης, τη σημασία των ψηφιακών τεχνολογιών για τη βελτίωση της διαφάνειας και της ανθεκτικότητας της εφοδιαστικής αλυσίδας και την ανάγκη για ολοκληρωμένες προσεγγίσεις που εξισορροπούν το κόστος, την ποιότητα και τη βιωσιμότητα. Η εργασία τονίζει επίσης τις προκλήσεις της διαχείρισης της αβεβαιότητας στις επιστροφές προϊόντων και τη μεταβλητότητα των ανακυκλωμένων υλικών. Υποδηλώνει ότι ο αποτελεσματικός συντονισμός και η καινοτομία είναι απαραίτητες για τη δημιουργία βιώσιμων και ανθεκτικών αλυσίδων εφοδιασμού. Αυτά τα ευρήματα συμβάλλουν στην κατανόηση του τρόπου με τον οποίο τα CLSC μπορούν να υποστηρίξουν τη μετάβαση σε μια κυκλική οικονομία και προσφέρουν πρακτικές γνώσεις τόσο για ακαδημαϊκούς όσο και για επαγγελματίες στον τομέα της βιώσιμης διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Abstract

This study provides a comprehensive review and synthesis of the literature on closed-loop supply chain (CLSC) systems, focusing on key areas such as reverse logistics optimization, sustainability, circular economy integration, digitalization, economic and financial aspects, network design, product recovery, coordination, risk management, and innovation. The methodology employed involves a critical analysis of existing models and frameworks to identify best practices and emerging trends in CLSCs. The results highlight the critical role of multi-objective optimization models in enhancing economic and environmental performance, the importance of digital technologies for improving supply chain transparency and resilience, and the need for integrated approaches that balance cost, quality, and sustainability. The study also emphasizes the challenges of managing uncertainty in product returns and the variability of recycled materials. It suggests that effective coordination and innovation are essential for building sustainable and resilient supply chains. These findings contribute to the understanding of how CLSCs can support the transition to a circular economy and offer practical insights for both academics and practitioners in the field of sustainable supply chain management.

Περιεχόμενα

Τριμελής Εξεταστική Επιτροπή.....	i
Ευχαριστίες	ii
Περίληψη	iii
Abstract.....	iv
Περιεχόμενα.....	v
Κατάλογος Πινάκων	viii
1. Εισαγωγή	1
2. Θεωρητικό πλαίσιο	4
2.1. Η σημασία της εφοδιαστικής αλυσίδας στον σύγχρονο επιχειρηματικό κόσμο.....	4
2.2. Ορισμός εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου	7
2.3. Σύγκριση συστημάτων ανοιχτού και κλειστού βρόχου	10
2.4. Ο ρόλος της αντίστροφης εφοδιαστικής στη διαχείριση εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου	13
2.5. Ιστορική εξέλιξη εφοδιαστικών αλυσίδων κλειστού βρόχου	16
2.6. Θεωρίες και μοντέλα στο σχεδιασμό εφοδιαστικής αλυσίδας	19
2.6.1 Θεωρία συστημάτων στο σχεδιασμό εφοδιαστικής αλυσίδας.....	20
2.6.2 Μοντέλα βελτιστοποίησης εφοδιαστικής αλυσίδας	21
2.6.3 Κυκλική οικονομία και μοντέλα κλειστού βρόχου.....	22
2.6.4 Η θεωρία των πόρων και δυναμικές δυνατότητες	23
2.7 Προκλήσεις στο σχεδιασμό συστημάτων εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου.....	24
2.7.1 Διαχείριση ανάκτησης και ανακύκλωσης προϊόντων	24
2.7.2 Χωρικές προκλήσεις και προκλήσεις που σχετίζονται με την εφοδιαστική	28
2.7.3. Τεχνολογικές προκλήσεις και καινοτομίες	31

2.7.4 Ροή πληροφοριών και διαφάνεια στην εφοδιαστική αλυσίδα	33
2.7.5 Νομικοί και ρυθμιστικοί περιορισμοί	34
2.8 Ευκαιρίες και στρατηγικές για την υιοθέτηση συστημάτων κλειστού βρόχου .	36
2.8.1 Βελτιστοποίηση κόστους και αυξημένη απόδοση	36
2.8.2 Εφαρμογή νέων τεχνολογιών.....	38
2.8.3 Εξερευνώντας νέες αγορές και επιχειρηματικά μοντέλα.....	39
2.8.4 Συνεργασία με προμηθευτές και πελάτες για ανάκτηση προϊόντων	39
3. Μεθοδολογία έρευνας.....	41
3.1 Εισαγωγή	41
3.2 Πεδίο και σκοπός της ανασκόπησης.....	41
3.3 Η μέθοδος PRISMA.....	42
4. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης	45
4.1 Βελτιστοποίηση αντίστροφης εφοδιαστικής σε εφοδιαστικές αλυσίδες κλειστού βρόχου.....	45
4.2 Αξιολόγηση βιωσιμότητας και περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε εφοδιαστικές αλυσίδες κλειστού βρόχου (CLSC)	51
4.3 Ενοποίηση κυκλικής οικονομίας με εφοδιαστικές αλυσίδες κλειστού βρόχου .	56
4.4 Ψηφιοποίηση και βιομηχανία 4.0 σε εφοδιαστικές αλυσίδες κλειστού βρόχου	62
4.5 Οικονομικές και χρηματοοικονομικές πτυχές του CLSC	68
4.6 Σχεδιασμός δικτύου εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου.....	74
4.7 Στρατηγικές ανάκτησης και ανακατασκευής προϊόντων.....	80
4.8 Συντονισμός εντός των αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου	86
4.9 Διαχείριση Κινδύνων σε Συστήματα CLSC	92
4.10 Καινοτομία στα συστήματα εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου.....	97
Συμπεράσματα	104
Βιβλιογραφία	111

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1. Οι έρευνες για την βελτιστοποίηση αντίστροφης εφοδιαστικής σε εφοδιαστικές αλυσίδες κλειστού βρόχου	49
Πίνακας 2. Οι έρευνες για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε εφοδιαστικές αλυσίδες κλειστού βρόχου	54
Πίνακας 3. Έρευνες για την ενοποίηση της κυκλικής οικονομίας με εφοδιαστικές αλυσίδες κλειστού βρόχου	60
Πίνακας 4. Έρευνες για την ψηφιοποίηση και την βιομηχανία 4.0 σε εφοδιαστικές αλυσίδες κλειστού βρόχου	66
Πίνακας 5. Έρευνες για τις οικονομικές και χρηματοοικονομικές πτυχές του CLSC.	72
Πίνακας 6. Έρευνες για τον σχεδιασμό δικτύου εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου	78
Πίνακας 7. Έρευνες για τις στρατηγικές ανάκτησης και ανακατασκευής προϊόντων.	84
Πίνακας 8. Έρευνες για τον συντονισμό εντός των αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου	90
Πίνακας 9. Έρευνες για την Διαχείριση Κινδύνων σε Συστήματα CLSC	96
Πίνακας 10. Έρευνες για την καινοτομία στα συστήματα εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου	102

1. Εισαγωγή

Τα τελευταία χρόνια, η έννοια των αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου (CLSCs) έχει αναδειχθεί ως κρίσιμο παράδειγμα στη σύγχρονη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας, με γνώμονα τις αυξανόμενες περιβαλλοντικές ανησυχίες, τη σπανιότητα των πόρων και την ώθηση προς τη βιωσιμότητα. Σε αντίθεση με τις παραδοσιακές, γραμμικές αλυσίδες εφοδιασμού, όπου τα προϊόντα κατασκευάζονται, διανέμονται και απορρίπτονται μετά τη χρήση, τα CLSC ενσωματώνουν διαδικασίες αντίστροφης εφοδιαστικής που επιτρέπουν την ανάκτηση, την επαναχρησιμοποίηση, την ανακύκλωση και την ανακατασκευή προϊόντων. Αυτή η κυκλική προσέγγιση ευθυγραμμίζεται με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας, με στόχο την ελαχιστοποίηση της σπατάλης και την αποτελεσματικότερη χρήση των πόρων. Καθώς οι επιχειρήσεις και οι κυβερνήσεις επικεντρώνονται στη μείωση του αποτυπώματος άνθρακα και στη διαχείριση των απορριμμάτων, τα CLSC προσφέρουν ένα πολλά υποσχόμενο πλαίσιο για την επίτευξη τόσο οικονομικών όσο και περιβαλλοντικών στόχων.

Η στροφή προς τα CLSC ωστόσο παρουσιάζει προκλήσεις. Αυτά τα συστήματα απαιτούν εξελιγμένο συντονισμό μεταξύ της προς τα εμπρός και της αντίστροφης εφοδιαστικής, ενσωμάτωση προηγμένων τεχνολογιών και αποτελεσματική διαχείριση των ανακτημένων προϊόντων για τη διατήρηση των προτύπων ποιότητας. Επιπλέον, η επιτυχία των CLSC εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη συνεργασία των ενδιαφερομένων, συμπεριλαμβανομένων των κατασκευαστών, των προμηθευτών, των λιανοπωλητών και των καταναλωτών. Παράγοντες όπως ο σχεδιασμός του προϊόντος, η υιοθέτηση τεχνολογίας, οι κανονιστικές απαιτήσεις και η συμπεριφορά των καταναλωτών παίζουν καθοριστικό ρόλο στον καθορισμό της αποτελεσματικότητας και της βιωσιμότητας των CLSC. Ενώ υπάρχουν σημαντικές ευκαιρίες, ιδίως όσον αφορά τη μείωση του κόστους, την αύξηση της αποδοτικότητας και την εξερεύνηση νέων επιχειρηματικών μοντέλων, οι εταιρείες πρέπει να ξεπεράσουν αυτές τις προκλήσεις για να εφαρμόσουν αποτελεσματικά και να κλιμακώσουν τα CLSC.

Το αυξανόμενο ενδιαφέρον για τα CLSC καθοδηγείται επίσης από νομικά και ρυθμιστικά πλαίσια που επιβάλλουν την ανάκτηση και τη σωστή απόρριψη προϊόντων στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Πολιτικές όπως η εκτεταμένη ευθύνη παραγωγού

(EPR) απαιτούν από τους κατασκευαστές να αναλαμβάνουν την ευθύνη για τα προϊόντα τους καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους, συμπεριλαμβανομένων των σταδίων μετά την κατανάλωση. Αυτοί οι κανονισμοί είναι ιδιαίτερα εμφανείς σε βιομηχανίες όπως τα ηλεκτρονικά, η αυτοκινητοβιομηχανία και τα καταναλωτικά αγαθά, όπου η διαχείριση των απορριμμάτων και οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις αποτελούν σημαντικές ανησυχίες. Ταυτόχρονα, οι εξελίξεις στις ψηφιακές τεχνολογίες, όπως το Internet of Things (IoT), το blockchain και τα big data analytics, έχουν ανοίξει νέες δυνατότητες για τη βελτιστοποίηση των λειτουργιών CLSC, τη βελτίωση της διαφάνειας και την ενίσχυση της συνεργασίας σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού.

Αυτή η εργασία εμβαθύνει στον σχεδιασμό συστημάτων εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου, διερευνώντας τόσο τις προκλήσεις όσο και τις ευκαιρίες που παρουσιάζουν στο σημερινό επιχειρηματικό περιβάλλον. Εξετάζει πώς οι εταιρείες μπορούν να διαχειριστούν αποτελεσματικά τις ροές επιστροφής προϊόντων, να βελτιστοποιήσουν την αντίστροφη εφοδιαστική και να ευθυγραμμίσουν τις δραστηριότητές τους με τους στόχους βιωσιμότητας. Διερευνώντας τους βασικούς παράγοντες που επηρεάζουν την επιτυχία των CLSCs, αυτή η έρευνα στοχεύει να παρέχει μια ολοκληρωμένη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο αυτά τα συστήματα μπορούν να συμβάλουν στην οικονομική ανάπτυξη προάγοντας παράλληλα την περιβαλλοντική βιωσιμότητα.

Με αυτήν την έννοια, ο πρωταρχικός στόχος αυτής της εργασίας είναι να διερευνήσει τις διάφορες διαστάσεις των CLSCs, με έμφαση στην αντίστροφη εφοδιαστική, τη βιωσιμότητα και την ενσωμάτωση των αρχών της κυκλικής οικονομίας. Η έρευνα πραγματοποιείται δέκα βασικούς τομείς, συμπεριλαμβανομένων μοντέλων βελτιστοποίησης, εκτιμήσεων περιβαλλοντικών επιπτώσεων, ψηφιοποίησης, οικονομικής βιωσιμότητας και σχεδίασης δικτύου. Αυτοί οι τομείς διερευνούνται μέσω μιας ολοκληρωμένης βιβλιογραφικής ανασκόπησης και μιας ανάλυσης των τρεχουσών πρακτικών CLSC σε διάφορους κλάδους.

Η μεθοδολογία της έρευνας ακολουθεί μια συστηματική προσέγγιση, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο PRISMA για την επιλογή βιβλιογραφίας για να διασφαλίσει ότι η ανασκόπηση καλύπτει τις πιο σχετικές και ενημερωμένες μελέτες στο πεδίο. Αυτή η μέθοδος επιτρέπει μια βαθιά εξερεύνηση του θέματος, τονίζοντας τόσο τις θεωρητικές όσο και τις πρακτικές επιπτώσεις των συστημάτων CLSC. Η

σημασία αυτής της έρευνας έγκειται στην ικανότητά της να παρέχει αξιόπιστες πληροφορίες για επιχειρήσεις που επιδιώκουν να εφαρμόσουν ή να βελτιώσουν τα μοντέλα CLSC, συμβάλλοντας τελικά στην προώθηση πρακτικών βιώσιμης διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Η εργασία τέλος είναι δομημένη σε πέντε βασικά κεφάλαια. Το Κεφάλαιο 1 εισάγει το θέμα και σκιαγραφεί τους στόχους και τη μεθοδολογία της έρευνας. Το Κεφάλαιο 2 παρέχει το θεωρητικό πλαίσιο, συζητώντας την εξέλιξη των CLSC, τις βασικές έννοιες, τα μοντέλα και τις στρατηγικές. Περιλαμβάνει μια λεπτομερή σύγκριση μεταξύ συστημάτων ανοιχτού και κλειστού βρόχου, τον ρόλο της αντίστροφης εφοδιαστικής και την ιστορική εξέλιξη των CLSC. Το Κεφάλαιο 3 περιγράφει τη μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε στην έρευνα, συμπεριλαμβανομένης της συλλογής δεδομένων, των κριτηρίων επιλογής και των μεθόδων ανάλυσης. Στο Κεφάλαιο 4 παρουσιάζονται τα αποτελέσματα της έρευνας, αναλύοντας τα ευρήματα σε σχέση με τα ερευνητικά ερωτήματα. Τέλος, το Κεφάλαιο 5 προσφέρει τα συμπεράσματα, συζητώντας τις επιπτώσεις των ευρημάτων, τους περιορισμούς της μελέτης και προτάσεις για μελλοντική έρευνα.

2. Θεωρητικό πλαίσιο

2.1. Η σημασία της εφοδιαστικής αλυσίδας στον σύγχρονο επιχειρηματικό κόσμο

Οι αλυσίδες εφοδιασμού αποτελούν μια θεμελιώδη πτυχή των σύγχρονων επιχειρηματικών λειτουργιών, διαδραματίζοντας κεντρικό ρόλο στην αποτελεσματική διαχείριση των πόρων και τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών παραγωγής. Καθώς οι παγκόσμιες αγορές επεκτείνονται και οι απαιτήσεις των καταναλωτών εξελίσσονται, η διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας (supply chain management, SCM) έχει μετατραπεί από υλικοτεχνική ανάγκη σε στρατηγική λειτουργία που οδηγεί την ανταγωνιστικότητα και τη βιωσιμότητα των επιχειρήσεων. Η σημασία των αλυσίδων εφοδιασμού στις σύγχρονες επιχειρήσεις μπορεί να γίνει κατανοητή μέσω της ικανότητάς τους να ενσωματώνουν διάφορες διαδικασίες, να διασφαλίζουν την έγκαιρη παράδοση αγαθών και υπηρεσιών και να επιτρέπουν στις εταιρείες να ανταποκρίνονται αποτελεσματικά στις αλλαγές της αγοράς (Christopher, 2016). Οι αλυσίδες εφοδιασμού σήμερα δεν ασχολούνται μόνο με τη ροή των αγαθών, αλλά περιλαμβάνουν επίσης την ανταλλαγή πληροφοριών, τις οικονομικές συναλλαγές και τη διαχείριση σχέσεων, τα οποία είναι όλα κρίσιμα για τη διατήρηση ενός ανταγωνιστικού πλεονεκτήματος.

Ένας από τους κύριους λόγους για τους οποίους η αποτελεσματική SCM είναι απαραίτητη στις σύγχρονες επιχειρήσεις είναι η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των παγκόσμιων αλυσίδων εφοδιασμού. Με την παγκοσμιοποίηση, οι εταιρείες προμηθεύονται πλέον υλικά και εξαρτήματα από διάφορα μέρη του κόσμου, γεγονός που έχει οδηγήσει στον κατακερματισμό των διαδικασιών παραγωγής. Αυτή η πολυπλοκότητα καθιστά απαραίτητο για τις επιχειρήσεις να έχουν ισχυρές στρατηγικές εφοδιαστικής αλυσίδας που μπορούν να συντονίσουν τις δραστηριότητες σε πολλαπλές τοποθεσίες και να εξασφαλίσουν απρόσκοπτη ενοποίηση μεταξύ προμηθευτών, κατασκευαστών, διανομέων και πελατών (Mentzer et al., 2001). Σύμφωνα με τους Chopra και Meindl (2019), η αποτελεσματική SCM επιτρέπει στις εταιρείες να μειώσουν το κόστος, να ενισχύσουν την παραγωγικότητα και να βελτιώσουν την

ικανοποίηση των πελατών διασφαλίζοντας ότι τα σωστά προϊόντα παραδίδονται τη σωστή στιγμή και στις σωστές ποσότητες. Η ικανότητα αποτελεσματικής διαχείρισης μιας αλυσίδας εφοδιασμού μπορεί να διαφοροποιήσει τις επιτυχημένες επιχειρήσεις από τους ανταγωνιστές τους στην αγορά.

Εκτός από το ρόλο του στη βελτιστοποίηση των λειτουργιών, το SCM είναι κρίσιμο για την ενίσχυση της ανταπόκρισης μιας εταιρείας στις απαιτήσεις της αγοράς. Στο σύγχρονο επιχειρηματικό περιβάλλον με γρήγορους ρυθμούς, η ικανότητα γρήγορης προσαρμογής στις αλλαγές είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχία. Οι αλυσίδες εφοδιασμού πρέπει να είναι ευέλικτες ώστε να ανταποκρίνονται σε διακυμάνσεις στη ζήτηση των καταναλωτών, αλλαγές στους κανονισμούς ή διακοπές που προκαλούνται από απρόβλεπτα γεγονότα όπως φυσικές καταστροφές ή πανδημίες (Ivanov & Dolgui, 2020). Οι εταιρείες που επενδύουν σε ανθεκτικά συστήματα εφοδιαστικής αλυσίδας είναι σε καλύτερη θέση για να διατηρήσουν τη συνέχεια και να μετριάσουν τους κινδύνους. Αυτό ήταν εμφανές κατά τη διάρκεια της πανδημίας COVID-19, όπου οι διακοπές της εφοδιαστικής αλυσίδας επηρέασαν σημαντικά το παγκόσμιο εμπόριο. Οι επιχειρήσεις με ισχυρές πρακτικές διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας μπόρεσαν να αντιμετωπίσουν αυτές τις προκλήσεις πιο αποτελεσματικά, αποδεικνύοντας τη σημασία της ανθεκτικότητας και της ευελιξίας στη σύγχρονη SCM (ΟΟΣΑ, 2020).

Επιπλέον, η ενσωμάτωση της τεχνολογίας στις λειτουργίες της εφοδιαστικής αλυσίδας έχει φέρει επανάσταση στον τρόπο με τον οποίο οι επιχειρήσεις διαχειρίζονται τις αλυσίδες εφοδιασμού τους. Τεχνολογίες όπως η τεχνητή νοημοσύνη (AI), το blockchain και το Internet of Things (IoT) έχουν προσφέρει στις εταιρείες νέα εργαλεία για τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών εφοδιαστικής αλυσίδας. Η τεχνητή νοημοσύνη και η μηχανική εκμάθηση επιτρέπουν την προγνωστική ανάλυση, βοηθώντας τις επιχειρήσεις να προβλέπουν τη ζήτηση και να σχεδιάζουν τα επίπεδα αποθέματος με μεγαλύτερη ακρίβεια. Το Blockchain, από την άλλη πλευρά, ενισχύει τη διαφάνεια και την ιχνηλασιμότητα σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού παρέχοντας έναν αποκεντρωμένο και ασφαλή τρόπο για την καταγραφή των συναλλαγών (Saber et al., 2019). Η εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών βελτιώνει την αποδοτικότητα και ενισχύει τη βιωσιμότητα μειώνοντας τα απόβλητα, βελτιστοποιώντας τη χρήση των πόρων και μειώνοντας τα αποτυπώματα άνθρακα.

Η αειφορία έχει καταστεί κρίσιμης σημασίας στο σύγχρονο SCM, καθώς οι επιχειρήσεις αντιμετωπίζουν αυξανόμενη πίεση από τους καταναλωτές, τις κυβερνήσεις και άλλους ενδιαφερόμενους φορείς να υιοθετήσουν περιβαλλοντικά υπεύθυνες πρακτικές. Η έννοια της κυκλικής οικονομίας, η οποία προωθεί την αποδοτικότητα των πόρων και την ελαχιστοποίηση των αποβλήτων, έχει κερδίσει δημοφιλία στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας. Οι αλυσίδες εφοδιασμού κλειστού βρόχου, οι οποίες ενσωματώνουν αντίστροφη εφοδιαστική για ανακύκλωση και επαναχρησιμοποίηση προϊόντων, είναι ένα παράδειγμα του τρόπου με τον οποίο οι επιχειρήσεις στρέφονται προς πιο βιώσιμες λειτουργίες (Guide & Van Wassenhove, 2009). Οι εταιρείες που ενσωματώνουν βιώσιμες πρακτικές στις αλυσίδες εφοδιασμού τους συμβάλλουν στην προστασία του περιβάλλοντος και ενισχύουν επίσης τη φήμη τους και την απήχησή τους σε καταναλωτές που συνειδητοποιούν το περιβάλλον (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2019). Επιπλέον, η υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών SCM μπορεί να οδηγήσει σε εξοικονόμηση κόστους μακροπρόθεσμα μειώνοντας την κατανάλωση ενέργειας, τη σπατάλη υλικών και τα ρυθμιστικά πρόστιμα (Sarkis, 2012).

Τέλος, ο ρόλος των αλυσίδων εφοδιασμού στην ενίσχυση της ανταγωνιστικότητας των επιχειρήσεων είναι σημαντικός. Το αποτελεσματικό SCM επιτρέπει στις εταιρείες να λειτουργούν με χαμηλότερο κόστος, εξορθολογίζοντας τις λειτουργίες και μειώνοντας την αναποτελεσματικότητα. Διευκολύνει επίσης την ταχύτερη είσοδο στην αγορά, επιτρέποντας στις επιχειρήσεις να αξιοποιήσουν νέες ευκαιρίες πιο γρήγορα από τους ανταγωνιστές τους. Επιπλέον, οι ισχυρές σχέσεις εφοδιαστικής αλυσίδας προωθούν τη συνεργασία και την καινοτομία. Σε στενή συνεργασία με προμηθευτές και συνεργάτες, οι εταιρείες μπορούν να αναπτύξουν νέα προϊόντα, να εισέλθουν σε νέες αγορές και να βελτιώσουν τη συνολική απόδοση (Lambert & Cooper, 2000). Αυτή η συλλογική προσέγγιση βοηθά επίσης τις επιχειρήσεις να μοιράζονται τους κινδύνους και τα οφέλη, διασφαλίζοντας μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα και ανταγωνιστικότητα.

2.2. Ορισμός εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου

Μια εφοδιαστική αλυσίδα κλειστού βρόχου (Closed-Loop Supply Chain, CLSC) είναι μια επέκταση της παραδοσιακής αλυσίδας εφοδιασμού που ενσωματώνει την επιστροφή προϊόντων, υλικών ή εξαρτημάτων στην αλυσίδα εφοδιασμού μετά την αρχική τους χρήση. Αυτό το σύστημα έχει σχεδιαστεί για να διαχειρίζεται τον κύκλο ζωής των προϊόντων με τρόπο που ελαχιστοποιεί τα απόβλητα και μεγιστοποιεί την επαναχρησιμοποίηση, την ανακατασκευή ή την ανακύκλωση των προϊόντων. Ενώ οι παραδοσιακές αλυσίδες εφοδιασμού, που συχνά αναφέρονται ως αλυσίδες εφοδιασμού ανοιχτού βρόχου, εστιάζουν κυρίως στην προώθηση της ροής αγαθών από τους προμηθευτές στους καταναλωτές, οι αλυσίδες εφοδιασμού κλειστού βρόχου ενσωματώνουν διαδικασίες αντίστροφης εφοδιαστικής, δημιουργώντας μια κυκλική ροή προϊόντων. Ο στόχος είναι να διατηρηθεί η αξία των υλικών και των προϊόντων για όσο το δυνατόν περισσότερο, γεγονός που συμβάλλει τόσο στην οικονομική απόδοση όσο και στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα (Guide & Van Wassenhove, 2009).

Η κύρια διαφορά μεταξύ των αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού και ανοιχτού βρόχου έγκειται στη φύση της ροής του προϊόντος. Σε μια αλυσίδα εφοδιασμού ανοιχτού βρόχου, μόλις τα προϊόντα φτάσουν στον τελικό καταναλωτή, η διαδικασία ουσιαστικά ολοκληρώνεται και το προϊόν είτε γίνεται απόβλητο, είτε απορρίπτεται με διάφορους τρόπους. Οι αλυσίδες εφοδιασμού ανοιχτού βρόχου δεν περιλαμβάνουν κανένα δομημένο μηχανισμό για την ανάκτηση της αξίας του προϊόντος από τη στιγμή που απορρίπτεται από τον καταναλωτή (Govindan et al., 2015). Αντίθετα, μια αλυσίδα εφοδιασμού κλειστού βρόχου ενσωματώνει αντίστροφη εφοδιαστική, επιτρέποντας την επιστροφή των χρησιμοποιημένων προϊόντων για διάφορες διεργασίες όπως η ανακύκλωση, η ανακατασκευή, η ανακαίνιση ή η επαναχρησιμοποίηση. Αυτό μειώνει τα απόβλητα και διασφαλίζει επίσης την επαναχρησιμοποίηση των πόρων, γεγονός που με τη σειρά του ελαχιστοποιεί την ανάγκη για νέες πρώτες ύλες και μειώνει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής (Bai & Sarkis, 2013).

Μια βασική πτυχή των αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου είναι η αντίστροφη εφοδιαστική, η οποία αναφέρεται στη διαδικασία διαχείρισης της ροής επιστροφής αγαθών από τον καταναλωτή πίσω στον κατασκευαστή ή σε άλλους

παράγοντες στην αλυσίδα εφοδιασμού. Η αντίστροφη εφοδιαστική περιλαμβάνει διάφορα στάδια, συμπεριλαμβανομένης της συλλογής, επιθεώρησης, ταξινόμησης και επεξεργασίας των επιστρεφόμενων προϊόντων για να προσδιοριστεί εάν μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν, να επισκευαστούν ή να ανακυκλωθούν (Fleischmann et al., 1997). Αυτό προσθέτει ένα επίπεδο πολυπλοκότητας στην αλυσίδα εφοδιασμού, καθώς οι εταιρείες πρέπει να δημιουργήσουν συστήματα για την παρακολούθηση και τη διαχείριση των επιστρεφόμενων προϊόντων, κάτι που μπορεί να συνεπάγεται πρόσθετο κόστος. Ωστόσο, τα πιθανά οφέλη από την άποψη της ανάκτησης πόρων, της εξοικονόμησης κόστους και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων συχνά ξεπερνούν αυτές τις πολυπλοκότητες.

Η ανακύκλωση διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο στην εφοδιαστική αλυσίδα κλειστού βρόχου, ιδιαίτερα σε βιομηχανίες όπου υλικά όπως μέταλλα, πλαστικά και ηλεκτρονικά είδη μπορούν να ανακτηθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν στην παραγωγή νέων προϊόντων. Για παράδειγμα, η βιομηχανία ηλεκτρονικών έχει ενστερνιστεί τις αρχές της εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου για τη διαχείριση του μεγάλου όγκου ηλεκτρονικών απορριμμάτων που παράγονται από συσκευές που απορρίπτονται. Μέσω κατάλληλων διαδικασιών ανακύκλωσης, πολύτιμα υλικά όπως μέταλλα σπάνιων γαιών μπορούν να εξαχθούν από παλιά ηλεκτρονικά και να χρησιμοποιηθούν στην παραγωγή νέων συσκευών, μειώνοντας έτσι την ανάγκη για παρθένα υλικά και μειώνοντας το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Esenduran et al., 2017). Ομοίως, στην αυτοκινητοβιομηχανία, η ανάκτηση χάλυβα, αλουμινίου και άλλων μετάλλων από οχήματα στο τέλος του κύκλου ζωής τους είναι μια καθιερωμένη πρακτική που συμβάλλει στη βιωσιμότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας (Gehin et al., 2008).

Ένα άλλο σημαντικό στοιχείο των αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου είναι η ανακατασκευή. Η ανακατασκευή αναφέρεται στη διαδικασία επαναφοράς των χρησιμοποιημένων προϊόντων σε μια κατάσταση «σαν καινούργια». Σε αντίθεση με την ανακύκλωση, η οποία περιλαμβάνει τη διάσπαση των προϊόντων σε πρώτες ύλες, η ανακατασκευή επιδιώκει να διατηρήσει όσο το δυνατόν μεγαλύτερο μέρος του αρχικού προϊόντος, εξοικονομώντας έτσι το κόστος υλικών και παραγωγής. Η ανακατασκευή είναι ιδιαίτερα συχνή σε βιομηχανίες όπως η αυτοκινητοβιομηχανία, η αεροδιαστημική και η ηλεκτρονική, όπου τα πολύπλοκα και ακριβά προϊόντα μπορούν

να αποκτήσουν μια δεύτερη ζωή μέσω επισκευής και αναβάθμισης. Στη συνέχεια, τα ανακατασκευασμένα προϊόντα επαναφέρονται στην αγορά, συχνά σε χαμηλότερη τιμή από τα νέα προϊόντα, γεγονός που τα καθιστά ελκυστική επιλογή για καταναλωτές που γνωρίζουν το κόστος, ενώ παράλληλα παρέχουν σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη.

Η μετάβαση από μια παραδοσιακή αλυσίδα εφοδιασμού ανοικτού βρόχου σε μια εφοδιαστική αλυσίδα κλειστού βρόχου μπορεί να προσφέρει πολλά πλεονεκτήματα για τις επιχειρήσεις. Πρώτον, οι εταιρείες μπορούν να πραγματοποιήσουν σημαντική εξοικονόμηση κόστους μειώνοντας την ανάγκη για πρώτες ύλες και μειώνοντας το κόστος διάθεσης απορριμμάτων. Με την ανάκτηση προϊόντων ή υλικών, οι επιχειρήσεις μπορούν να μειώσουν την εξάρτησή τους από τους προμηθευτές και να σταθεροποιήσουν το κόστος των εισροών τους, ιδιαίτερα σε βιομηχανίες όπου οι πρώτες ύλες υπόκεινται σε ασταθείς διακυμάνσεις τιμών (Mitra, 2012). Επιπλέον, οι αλυσίδες εφοδιασμού κλειστού βρόχου μπορούν να ενισχύσουν τη φήμη μιας εταιρείας επιδεικνύοντας τη δέσμευσή τους στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα, η οποία εκτιμάται ολοένα και περισσότερο τόσο από τους καταναλωτές όσο και από τους ρυθμιστικούς φορείς (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2019). Οι εταιρείες που υιοθετούν πρακτικές κυκλικής αλυσίδας εφοδιασμού θεωρούνται συχνά πιο υπεύθυνες και καινοτόμες, γεγονός που μπορεί να βοηθήσει στη δημιουργία ισχυρότερων σχέσεων με τους ενδιαφερόμενους φορείς και τους πελάτες.

Οι αλυσίδες εφοδιασμού κλειστού βρόχου παρουσιάζουν τέλος, ευκαιρίες για καινοτομία και ανάπτυξη νέων επιχειρηματικών μοντέλων. Για παράδειγμα, οι εταιρείες μπορεί να εξερευνήσουν συστήματα προϊόντων-υπηρεσιών, όπου οι καταναλωτές μισθώνουν προϊόντα αντί να τα κατέχουν εντελώς. Αυτό το μοντέλο ενθαρρύνει την επιστροφή προϊόντων για ανακαίνιση ή ανακατασκευή, διασφαλίζοντας ότι οι πόροι παραμένουν εντός της αλυσίδας εφοδιασμού για μεγαλύτερες περιόδους (Stahel, 2016). Τέτοιες καινοτομίες συμβάλλουν στη βιωσιμότητα και ανοίγουν νέες ροές εσόδων για τις εταιρείες.

2.3. Σύγκριση συστημάτων ανοιχτού και κλειστού βρόχου

Η σύγκριση μεταξύ των αλυσίδων εφοδιασμού ανοιχτού και κλειστού βρόχου παρέχει πολύτιμες πληροφορίες για την εξέλιξη της διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας και την αυξανόμενη εστίαση στη βιωσιμότητα και την αποδοτικότητα των πόρων. Τα συστήματα ανοιχτού βρόχου, που συχνά αναφέρονται ως παραδοσιακές ή γραμμικές αλυσίδες εφοδιασμού, επικεντρώνονται στη μονοκατευθυντική ροή προϊόντων από την προμήθεια πρώτων υλών στην παραγωγή, τη διανομή και την κατανάλωση. Μόλις ένα προϊόν φτάσει στον τελικό καταναλωτή, ο ρόλος της εφοδιαστικής αλυσίδας ουσιαστικά τελειώνει και το προϊόν απορρίπτεται ως απόβλητο (Govindan et al., 2015). Αντίθετα, οι αλυσίδες εφοδιασμού κλειστού βρόχου (CLSCs) ενσωματώνουν την αντίστροφη εφοδιαστική, η οποία επιτρέπει στα προϊόντα και τα υλικά να εισέλθουν ξανά στην αλυσίδα εφοδιασμού για επαναχρησιμοποίηση, ανακύκλωση ή ανακατασκευή (Guide & Van Wassenhove, 2009). Οι λειτουργικές, περιβαλλοντικές και οικονομικές διαφορές μεταξύ αυτών των δύο συστημάτων έχουν εκτεταμένες επιπτώσεις για τις επιχειρήσεις και τις βιομηχανίες παγκοσμίως.

Από λειτουργική άποψη, οι αλυσίδες εφοδιασμού ανοιχτού βρόχου είναι γενικά απλούστερες και λιγότερο δαπανηρές στη διαχείριση. Ακολουθούν μια απλή πορεία παραγωγής και διανομής χωρίς την πρόσθετη πολυπλοκότητα της διαχείρισης των επιστροφών προϊόντων ή της αντίστροφης ροής αγαθών (Fleischmann et al., 1997). Τα συστήματα ανοιχτού βρόχου δίνουν προτεραιότητα στην αποτελεσματικότητα στη μελλοντική ροή αγαθών, εστιάζοντας στη μείωση του χρόνου παράδοσης και στη βελτιστοποίηση των δικτύων διανομής. Ωστόσο, αυτά τα συστήματα είναι περιορισμένα στην ικανότητά τους να αντιμετωπίσουν την αυξανόμενη ανάγκη για διατήρηση των πόρων και μείωση των απορριμμάτων. Μόλις ένα προϊόν απορριφθεί από τον καταναλωτή, η υπολειμματική του αξία χάνεται και η αλυσίδα εφοδιασμού πρέπει να βασίζεται συνεχώς σε νέες πρώτες ύλες για την παραγωγή, οδηγώντας σε μεγαλύτερη κατανάλωση πόρων (Esenduran et al., 2017).

Αντίθετα, οι αλυσίδες εφοδιασμού κλειστού βρόχου ενσωματώνουν αντίστροφη εφοδιαστική, η οποία περιλαμβάνει τη συλλογή, την επιθεώρηση, τη διαλογή και την επεξεργασία των χρησιμοποιημένων προϊόντων. Αυτή η αντίστροφη

ροή αγαθών προσθέτει πολυπλοκότητα στην αλυσίδα εφοδιασμού, καθώς οι επιχειρήσεις πρέπει να αναπτύξουν συστήματα για την παρακολούθηση και τη διαχείριση των επιστροφών, των ανακαινίσεων και των δραστηριοτήτων ανακύκλωσης (Fleischmann et al., 1997). Αυτές οι πρόσθετες διαδικασίες μπορούν να αυξήσουν το λειτουργικό κόστος, ειδικά εάν οι εταιρείες δεν διαθέτουν την υποδομή για να χειριστούν αποτελεσματικά τις επιστροφές προϊόντων. Ωστόσο, τα CLSC προσφέρουν σημαντικά πλεονεκτήματα όσον αφορά την αποδοτικότητα των πόρων και την εξοικονόμηση κόστους μακροπρόθεσμα. Με την επαναχρησιμοποίηση υλικών και προϊόντων, οι επιχειρήσεις μπορούν να μειώσουν την εξάρτησή τους από παρθένες πρώτες ύλες, μετριάζοντας έτσι τους κινδύνους που σχετίζονται με τις διακυμάνσεις των τιμών των εμπορευμάτων και τις διαταραχές της αλυσίδας εφοδιασμού (Govindan et al., 2015).

Οι περιβαλλοντικές εκτιμήσεις είναι ένας κρίσιμος παράγοντας που διακρίνει τις αλυσίδες εφοδιασμού ανοιχτού από κλειστού βρόχου. Τα συστήματα ανοιχτού βρόχου συμβάλλουν σημαντικά στην υποβάθμιση του περιβάλλοντος λόγω της εξάρτησής τους από τη συνεχή εξόρυξη πρώτων υλών και τη δημιουργία αποβλήτων στο τέλος του κύκλου ζωής του προϊόντος (Esenduran et al., 2017). Αυτή η γραμμική προσέγγιση οδηγεί σε εξάντληση των πόρων, αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και υψηλότερα επίπεδα ρύπανσης, τα οποία συμβάλλουν στις ευρύτερες προκλήσεις της κλιματικής αλλαγής και της υποβάθμισης του περιβάλλοντος. Ως απάντηση σε αυτά τα ζητήματα, οι κυβερνήσεις και οι οργανισμοί σε όλο τον κόσμο έχουν ζητήσει πιο βιώσιμες επιχειρηματικές πρακτικές, ωθώντας τις εταιρείες να επανεξετάσουν τα μοντέλα της αλυσίδας εφοδιασμού τους (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2019).

Οι αλυσίδες εφοδιασμού κλειστού βρόχου, από το σχεδιασμό, προσφέρουν μια πιο βιώσιμη εναλλακτική. Η ενσωμάτωση της αντίστροφης εφοδιαστικής επιτρέπει την ανάκτηση πολύτιμων υλικών από χρησιμοποιημένα προϊόντα, μειώνοντας την ανάγκη για εξόρυξη νέων πόρων. Αυτή η προσέγγιση ελαχιστοποιεί τη δημιουργία αποβλήτων και μειώνει τη συνολική περιβαλλοντική επίπτωση των παραγωγικών διαδικασιών (Gehin et al., 2008). Επιπλέον, τα συστήματα κλειστού βρόχου ευθυγραμμίζονται με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας, η οποία προωθεί τη συνεχή επαναχρησιμοποίηση των υλικών για την επέκταση του κύκλου ζωής τους και τη μείωση της περιβαλλοντικής βλάβης. Η Ευρωπαϊκή Επιτροπή (2019) έχει υποστηρίξει σθεναρά την υιοθέτηση

πρακτικών κυκλικής οικονομίας, τονίζοντας τη δυνατότητα των συστημάτων κλειστού βρόχου να συμβάλλουν στους ευρύτερους στόχους βιωσιμότητας της ΕΕ. Ωστόσο, παρά αυτά τα περιβαλλοντικά οφέλη, η μετάβαση σε μια εφοδιαστική αλυσίδα κλειστού βρόχου απαιτεί σημαντικές επενδύσεις στην τεχνολογία, τις υποδομές και τον επανασχεδιασμό των διαδικασιών, γεγονός που μπορεί να δημιουργήσει εμπόδια για τις εταιρείες που επιδιώκουν να εφαρμόσουν αυτά τα συστήματα.

Από οικονομική άποψη, οι διαφορές μεταξύ συστημάτων ανοιχτού και κλειστού βρόχου αντανακλώνονται συχνά στους συμβιβασμούς μεταξύ βραχυπρόθεσμου κόστους και μακροπρόθεσμης εξοικονόμησης. Τα συστήματα ανοιχτού βρόχου είναι συνήθως λιγότερο δαπανηρά να δημιουργηθούν και να διατηρηθούν βραχυπρόθεσμα, επειδή δεν απαιτούν την πρόσθετη υποδομή για την αντίστροφη εφοδιαστική ή την πολυπλοκότητα της διαχείρισης των επιστροφών προϊόντων (Mitra, 2012). Οι επιχειρήσεις μπορούν να επικεντρωθούν στον εξορθολογισμό των διαδικασιών παραγωγής και διανομής τους για να μειώσουν το κόστος και να μεγιστοποιήσουν την αποδοτικότητα. Ωστόσο, μακροπρόθεσμα, τα συστήματα ανοιχτού βρόχου είναι πιο ευάλωτα στο αυξανόμενο κόστος των πρώτων υλών, στις ρυθμιστικές πιέσεις και στις οικονομικές επιπτώσεις της διάθεσης απορριμμάτων (Sarkis, 2012).

Οι αλυσίδες εφοδιασμού κλειστού βρόχου, αν και αρχικά είναι πιο δαπανηρές στην εφαρμογή τους λόγω της ανάγκης για υποδομή αντίστροφης εφοδιαστικής, προσφέρουν σημαντικά μακροπρόθεσμα οικονομικά οφέλη. Με την ανάκτηση και την επαναχρησιμοποίηση υλικών, οι επιχειρήσεις μπορούν να μειώσουν το κόστος προμήθειας υλικών και να μειώσουν τα έξοδα διάθεσης απορριμμάτων. Επιπλέον, τα συστήματα κλειστού βρόχου μπορούν να δημιουργήσουν νέες ροές εσόδων μέσω της μεταπώλησης ανακαινισμένων προϊόντων ή ανακυκλωμένων υλικών (Guide & Van Wassenhove, 2009). Αυτά τα συστήματα ενισχύουν επίσης την ανθεκτικότητα μιας εταιρείας στις διακοπές της εφοδιαστικής αλυσίδας, καθώς εξαρτώνται λιγότερο από εξωτερικούς προμηθευτές για πρώτες ύλες. Επιπλέον, οι εταιρείες που υιοθετούν πρακτικές κλειστού βρόχου συχνά επωφελούνται από μια ισχυρότερη φήμη μεταξύ των καταναλωτών και των ενδιαφερόμενων μερών, οι οποίοι εκτιμούν όλο και περισσότερο την περιβαλλοντική βιωσιμότητα (Bai & Sarkis, 2013). Αυτή η ενίσχυση της φήμης μπορεί να μεταφραστεί σε αυξημένη πίστη πελατών και μερίδιο αγοράς, παρέχοντας ανταγωνιστικό πλεονέκτημα.

Παρά τα πολυάριθμα πλεονεκτήματα των αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου, οι επιχειρήσεις αντιμετωπίζουν προκλήσεις στη μετάβαση από συστήματα ανοιχτού βρόχου σε συστήματα κλειστού βρόχου. Μια σημαντική πρόκληση είναι η ανάγκη για συντονισμό σε ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού για να διασφαλιστεί ότι τα προϊόντα μπορούν να επιστραφούν αποτελεσματικά, να ανακατασκευαστούν ή να ανακυκλωθούν. Οι εταιρείες πρέπει επίσης να επενδύσουν σε τεχνολογίες όπως συστήματα παρακολούθησης προϊόντων και μηχανισμούς διαλογής για τη διαχείριση της αντίστροφης ροής των αγαθών αποτελεσματικά (Gehin et al., 2008). Επιπλέον, τα ρυθμιστικά εμπόδια και τα διαφορετικά περιβαλλοντικά πρότυπα μεταξύ των περιοχών μπορούν να περιπλέξουν την εφαρμογή συστημάτων κλειστού βρόχου, ιδιαίτερα για πολυεθνικές εταιρείες που λειτουργούν σε διαφορετικά ρυθμιστικά περιβάλλοντα (ΟΟΣΑ, 2020).

2.4. Ο ρόλος της αντίστροφης εφοδιαστικής στη διαχείριση εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου

Η αντίστροφη εφοδιαστική είναι ένα ουσιαστικό στοιχείο της διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου, επειδή διευκολύνει την επανένταξη των χρησιμοποιημένων προϊόντων στον κύκλο παραγωγής. Αυτή η διαδικασία ξεκινά με τη συλλογή των επιστρεφόμενων ή απορριπτόμενων αγαθών, ακολουθούμενη από την επιθεώρησή τους για να καθοριστεί εάν μπορούν να ανακαινιστούν, να ανακατασκευαστούν ή να ανακυκλωθούν. Στη συνέχεια, οι εταιρείες επεξεργάζονται τα αγαθά ανάλογα και, όπου είναι δυνατόν, τα επαναφέρουν στην αλυσίδα εφοδιασμού ως νέα ή παρόμοια προϊόντα. Αυτή η προσέγγιση μειώνει την ανάγκη για νέες πρώτες ύλες και βοηθά τους οργανισμούς να επιτύχουν εξοικονόμηση κόστους, ενώ ταυτόχρονα ελαχιστοποιούν το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα (Guide & Van Wassenhove, 2009). Καθώς η βιωσιμότητα γίνεται υψηλότερη προτεραιότητα τόσο για τις εταιρείες όσο και για τις κυβερνήσεις, τα αντίστροφα logistics αντιμετωπίζονται όλο και περισσότερο ως στρατηγικό εργαλείο για τη βελτίωση της αποδοτικότητας της αλυσίδας εφοδιασμού και των περιβαλλοντικών επιδόσεων.

Η διαδικασία διαχείρισης των επιστροφών προϊόντων είναι κεντρική για την αντίστροφη εφοδιαστική και περιλαμβάνει πολλά σύνθετα βήματα. Πρώτον, οι εταιρείες πρέπει να δημιουργήσουν συστήματα για την παρακολούθηση και τη διαχείριση των επιστρεφόμενων προϊόντων. Αυτό συχνά περιλαμβάνει συνεργασία με τρίτους παρόχους logistics (third-party logistics providers, 3PLs) που ειδικεύονται στην αντίστροφη εφοδιαστική. Αυτοί οι πάροχοι είναι υπεύθυνοι για τη συλλογή των επιστρεφόμενων προϊόντων από τους καταναλωτές, τους λιανοπωλητές ή τα κέντρα διανομής και τη μεταφορά τους στις κατάλληλες εγκαταστάσεις για περαιτέρω επεξεργασία (Esenduran et al., 2017). Τα logistics των επιστροφών είναι συχνά πιο περίπλοκα από αυτά του forward logistics λόγω της μεταβλητότητας στις συνθήκες του προϊόντος, της ανάγκης για προσεκτική ταξινόμηση και της πιθανότητας καθυστερήσεων στη διαδικασία επιστροφών. Παρά αυτές τις προκλήσεις, οι εταιρείες που επενδύουν σε ισχυρά συστήματα αντίστροφης εφοδιαστικής μπορούν να ανακτήσουν σημαντική αξία από τα επιστρεφόμενα αγαθά, είτε μεταπωλώντας τα ως ανακαινισμένα προϊόντα είτε εξάγοντας πολύτιμα υλικά για ανακύκλωση.

Ένα από τα βασικά οφέλη της αντίστροφης εφοδιαστικής είναι η ικανότητά της να υποστηρίζει τις προσπάθειες ανακύκλωσης εντός των αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου. Με τη συλλογή και την επεξεργασία προϊόντων στο τέλος του κύκλου ζωής τους, οι εταιρείες μπορούν να ανακτήσουν πολύτιμα υλικά όπως μέταλλα, πλαστικά και γυαλί, τα οποία μπορούν στη συνέχεια να χρησιμοποιηθούν για την κατασκευή νέων προϊόντων. Αυτή η διαδικασία μειώνει την ανάγκη για πρώτες ύλες και βοηθά τις εταιρείες να μειώσουν τα απόβλητα και να συμμορφωθούν με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς (Bai & Sarkis, 2013). Σε βιομηχανίες όπως η ηλεκτρονική και η αυτοκινητοβιομηχανία, όπου η απόρριψη επικίνδυνων υλικών αποτελεί μείζον μέλημα, η αντίστροφη εφοδιαστική προσφέρει μια πρακτική λύση για τη διασφάλιση του υπεύθυνου χειρισμού και της αποτελεσματικής ανακύκλωσης αυτών των υλικών. Για παράδειγμα, η Οδηγία για τα Απόβλητα Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού (Waste Electrical and Electronic Equipment, WEEE) της Ευρωπαϊκής Ένωσης έχει επιβάλει εντολή στις εταιρείες να εφαρμόζουν συστήματα για την ανάληψη και την ανακύκλωση ηλεκτρονικών προϊόντων, καθιστώντας την αντίστροφη εφοδιαστική βασικό στοιχείο συμμόρφωσης (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2019).

Μια άλλη πτυχή της αντίστροφης εφοδιαστικής που πρέπει να διαχειριστούν οι εταιρείες είναι η διάθεση των απορριμμάτων. Ενώ ο στόχος των αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου είναι να ελαχιστοποιήσουν τα απόβλητα, δεν μπορούν όλα τα προϊόντα να επαναχρησιμοποιηθούν ή να ανακυκλωθούν. Σε περιπτώσεις όπου τα προϊόντα δεν μπορούν να ανακατασκευαστούν ή να ανακυκλωθούν, οι εταιρείες πρέπει να τα απορρίπτουν με τρόπο που να συμμορφώνεται με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς και να ελαχιστοποιεί τη βλάβη στο περιβάλλον (Govindan et al., 2015). Η αντίστροφη εφοδιαστική διασφαλίζει ότι τα απόβλητα αντιμετωπίζονται με υπευθυνότητα, συχνά μέσω συνεργασιών με εξειδικευμένες εταιρείες διαχείρισης αποβλήτων που είναι σε θέση να απορρίπτουν επικίνδυνα ή μη ανακυκλώσιμα υλικά με τρόπο φιλικό προς το περιβάλλον.

Παρά τα πολυάριθμα πλεονεκτήματα της αντίστροφης εφοδιαστικής, οι εταιρείες αντιμετωπίζουν αρκετές προκλήσεις στην εφαρμογή και τη βελτιστοποίηση αυτών των συστημάτων. Μία από τις κύριες προκλήσεις είναι το κόστος δημιουργίας και συντήρησης υποδομής αντίστροφης εφοδιαστικής, ιδιαίτερα για εταιρείες που δραστηριοποιούνται σε παγκόσμια κλίμακα (Mitra, 2012). Η διακύμανση των επιστροφών προϊόντων, τόσο ως προς τον όγκο όσο και ως προς την κατάσταση, προσθέτει πολυπλοκότητα στις λειτουργίες αντίστροφης εφοδιαστικής, καθιστώντας δύσκολη την επίτευξη του ίδιου επιπέδου αποτελεσματικότητας με τα προηγούμενα logistics. Επιπλέον, η έλλειψη τυποποιημένων διαδικασιών για το χειρισμό των επιστρεφόμενων αγαθών μπορεί να οδηγήσει σε αναποτελεσματικότητα και καθυστερήσεις, αυξάνοντας περαιτέρω το κόστος. Για να αντιμετωπίσουν αυτές τις προκλήσεις, οι εταιρείες στρέφονται όλο και περισσότερο σε προηγμένες τεχνολογίες όπως η τεχνητή νοημοσύνη και το blockchain για να βελτιώσουν τη διαφάνεια και την ιχνηλασιμότητα των λειτουργιών αντίστροφης εφοδιαστικής (Saberli et al., 2019).

2.5. Ιστορική εξέλιξη εφοδιαστικών αλυσίδων κλειστού βρόχου

Η ιστορική εξέλιξη των αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου (CLSCs) αποτελεί στην ουσία μια αντανάκλαση των ευρύτερων αλλαγών στις επιχειρηματικές πρακτικές, που επηρεάζονται από οικονομικές, περιβαλλοντικές και ρυθμιστικές δυνάμεις. Ενώ η έννοια της ανάκτησης και της επαναχρησιμοποίησης προϊόντων υπάρχει εδώ και αιώνες, η επίσημη ανάπτυξη συστημάτων κλειστού βρόχου ως δομημένη προσέγγιση για τη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας είναι ένα πιο πρόσφατο φαινόμενο. Η αυξανόμενη αναγνώριση της πεπερασμένης φύσης των φυσικών πόρων, σε συνδυασμό με την αυξανόμενη πίεση από τις κυβερνήσεις και τους καταναλωτές για πιο βιώσιμες πρακτικές, έχει επιταχύνει την υιοθέτηση των CLSC σε διάφορους κλάδους. Η κατανόηση αυτής της εξέλιξης παρέχει μια εικόνα για το πώς τα συστήματα κλειστού βρόχου έχουν μετατραπεί από μια εξειδικευμένη πρακτική σε ένα κεντρικό στοιχείο των σύγχρονων επιχειρηματικών στρατηγικών.

Ιστορικά, τα συστήματα κλειστού βρόχου ήταν συχνά άτυπα και επικεντρώνονταν σε βασικές πρακτικές ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης. Στα αρχικά στάδια, οι επιχειρήσεις και οι καταναλωτές θα επαναχρησιμοποιούσαν υλικά όπως μέταλλα, υφάσματα και γυαλί λόγω της σπανιότητας τους ή του υψηλού κόστους παραγωγής. Για παράδειγμα, κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, οι ελλείψεις πόρων οδήγησαν σε εκτεταμένα προγράμματα επαναχρησιμοποίησης και ανακύκλωσης σε πολλές χώρες ως μέσο διατήρησης υλικών κρίσιμων για την πολεμική προσπάθεια (Fleischmann et al., 1997). Αυτές οι πρώτες προσπάθειες έθεσαν τις βάσεις για τη δημιουργία συστημάτων αντίστροφης εφοδιαστικής και ανάκτησης προϊόντων, αν και βασιζόνταν σε μεγάλο βαθμό από αναγκαιότητα και όχι από περιβαλλοντικές ανησυχίες.

Η ανάπτυξη επίσημων συστημάτων κλειστού βρόχου ξεκίνησε στο δεύτερο μισό του 20ού αιώνα, καθώς οι επιχειρήσεις και οι κυβερνήσεις άρχισαν να αναγνωρίζουν τα πιθανά οικονομικά οφέλη από την ανάκτηση πόρων. Κατά τη δεκαετία του 1970, η πετρελαϊκή κρίση και το αυξανόμενο κόστος των πρώτων υλών υπογράμμισαν την ευπάθεια των αλυσίδων εφοδιασμού στη σπανιότητα των πόρων, οδηγώντας τις εταιρείες να εξερευνήσουν πιο αποτελεσματικούς τρόπους διαχείρισης

των υλικών (Guide & Van Wassenhove, 2009). Ήταν κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου που βιομηχανίες όπως η αυτοκινητοβιομηχανία και τα ηλεκτρονικά άρχισαν να αναπτύσσουν πρώιμες μορφές συστημάτων αντίστροφης εφοδιαστικής για την ανάκτηση πολύτιμων εξαρτημάτων από μεταχειρισμένα προϊόντα. Αυτό σηματοδότησε την αρχή των συστημάτων κλειστού βρόχου ως στρατηγικού επιχειρηματικού εργαλείου, όχι απλώς ως απάντηση στις ελλείψεις υλικών.

Μέχρι τις δεκαετίες του 1980 και του 1990, οι περιβαλλοντικές ανησυχίες άρχισαν να παίζουν σημαντικότερο ρόλο στην υιοθέτηση των CLSC. Καθώς η συνειδητοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των βιομηχανικών δραστηριοτήτων αυξανόταν, οι κυβερνήσεις σε όλο τον κόσμο άρχισαν να εφαρμόζουν αυστηρότερους περιβαλλοντικούς κανονισμούς. Σε απάντηση, οι επιχειρήσεις άρχισαν να υιοθετούν πρακτικές κλειστού βρόχου όχι μόνο για να συμμορφωθούν με αυτούς τους κανονισμούς αλλά και για να ενισχύσουν τις προσπάθειές τους για την εταιρική κοινωνική ευθύνη (ΕΚΕ) (Esenduran et al., 2017). Η θέσπιση κανονισμών όπως η Οδηγία για τα Απόβλητα Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού (WEEE) της Ευρωπαϊκής Ένωσης και η οδηγία για τα οχήματα στο τέλος του κύκλου ζωής τους (End-of-Life Vehicle, ELV) ενθάρρυνε τις εταιρείες να αναλάβουν την ευθύνη για ολόκληρο τον κύκλο ζωής των προϊόντων τους, από την παραγωγή έως την απόρριψη. Αυτές οι πολιτικές απαιτούσαν από τους κατασκευαστές να εφαρμόζουν συστήματα ανάκτησης για μεταχειρισμένα προϊόντα, παρέχοντας κίνητρα για την ανάπτυξη επίσημων αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου που ενσωματώνουν διαδικασίες αντίστροφης εφοδιαστικής, ανακύκλωσης και ανακατασκευής.

Ταυτόχρονα, οι εξελίξεις στην τεχνολογία επέτρεψαν πιο αποτελεσματικά συστήματα αντίστροφης εφοδιαστικής και ανάκτησης προϊόντων. Η άνοδος των τεχνολογιών αυτοματισμού και ψηφιακής παρακολούθησης διευκόλυνε τις εταιρείες να διαχειρίζονται την περίπλοκη ροή των επιστρεφόμενων προϊόντων και υλικών, οδηγώντας στην ανάπτυξη συστημάτων κλειστού βρόχου σε βιομηχανίες όπως η ηλεκτρονική, η αυτοκινητοβιομηχανία και τα καταναλωτικά αγαθά (Gehin et al., 2008). Για παράδειγμα, η ανακατασκευή ανταλλακτικών αυτοκινήτων έγινε πιο διαδεδομένη καθώς οι εταιρείες συνειδητοποίησαν τα οικονομικά οφέλη από την επαναχρησιμοποίηση εξαρτημάτων υψηλής αξίας, όπως κινητήρες και κιβώτια ταχυτήτων, αντί να βασίζονται αποκλειστικά στη νέα παραγωγή.

Η αλλαγή του 21ου αιώνα σηματοδότησε μια νέα φάση στην εξέλιξη των αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου, που χαρακτηρίζεται από μια αυξανόμενη εστίαση στη βιωσιμότητα και την κυκλική οικονομία. Το μοντέλο κυκλικής οικονομίας, που δίνει έμφαση στη συνεχή επαναχρησιμοποίηση υλικών για την επέκταση του κύκλου ζωής τους και την ελαχιστοποίηση των απορριμμάτων, ευθυγραμμίζεται στενά με τις αρχές των αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου. Αυτό το μοντέλο έχει κερδίσει σημαντική δημοφιλία μεταξύ των επιχειρήσεων, των υπευθύνων χάραξης πολιτικής και των καταναλωτών τα τελευταία χρόνια ως απάντηση στις αυξανόμενες προκλήσεις της εξάντλησης των πόρων, της κλιματικής αλλαγής και της υποβάθμισης του περιβάλλοντος (Bai & Sarkis, 2013). Οι εταιρείες που υιοθετούν συστήματα κλειστού βρόχου θεωρούνται ηγέτες στη βιωσιμότητα, η οποία έχει γίνει βασικός παράγοντας διαφοροποίησης στην αγορά. Οι καταναλωτές απαιτούν όλο και περισσότερο προϊόντα που είναι φιλικά προς το περιβάλλον και οι αλυσίδες εφοδιασμού κλειστού βρόχου επιτρέπουν στις εταιρείες να ανταποκριθούν σε αυτές τις απαιτήσεις μειώνοντας τα απόβλητα και εξοικονομώντας πόρους.

Παράλληλα, η ανάπτυξη παγκόσμιων πρωτοβουλιών βιωσιμότητας, όπως οι Στόχοι Βιώσιμης Ανάπτυξης των Ηνωμένων Εθνών (SDGs) και η Πράσινη Συμφωνία της Ευρωπαϊκής Ένωσης, έχει επιταχύνει περαιτέρω την υιοθέτηση συστημάτων κλειστού βρόχου. Αυτές οι πρωτοβουλίες τονίζουν τη σημασία της υπεύθυνης κατανάλωσης και παραγωγής, ενθαρρύνοντας τις επιχειρήσεις να εφαρμόζουν πρακτικές που μειώνουν τις περιβαλλοντικές τους επιπτώσεις (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2019). Οι αλυσίδες εφοδιασμού κλειστού βρόχου θεωρούνται κρίσιμος μηχανισμός για την επίτευξη αυτών των στόχων, καθώς επιτρέπουν στις εταιρείες να ανακτούν πολύτιμα υλικά, να μειώνουν την εξάρτησή τους από παρθένους πόρους και να ελαχιστοποιούν τη δημιουργία αποβλήτων.

Τα τελευταία χρόνια, ο ψηφιακός μετασχηματισμός της διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας έχει ενισχύσει περαιτέρω την αποτελεσματικότητα των συστημάτων κλειστού βρόχου. Τεχνολογίες όπως το Internet of Things (IoT), το blockchain και η τεχνητή νοημοσύνη (AI) επέτρεψαν στις εταιρείες να παρακολουθούν και να διαχειρίζονται την αντίστροφη ροή των αγαθών με μεγαλύτερη ακρίβεια και αποτελεσματικότητα (Saber et al., 2019). Για παράδειγμα, η τεχνολογία blockchain μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη δημιουργία διαφανών, αδιάψευστων εγγραφών των

κινήσεων των προϊόντων σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού, διασφαλίζοντας ότι τα υλικά ανακτώνται και επαναχρησιμοποιούνται σωστά. Ομοίως, η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να βοηθήσει στη βελτιστοποίηση της δρομολόγησης και της επεξεργασίας των επιστρεφόμενων προϊόντων, μειώνοντας το κόστος και βελτιώνοντας τη συνολική απόδοση των συστημάτων κλειστού βρόχου.

Σήμερα, οι αλυσίδες εφοδιασμού κλειστού βρόχου αποτελούν κεντρικό στοιχείο βιώσιμων επιχειρηματικών στρατηγικών, ιδιαίτερα σε βιομηχανίες όπου ο κύκλος ζωής των προϊόντων είναι σύντομος και ο περιβαλλοντικός αντίκτυπος της απόρριψης είναι υψηλός. Η βιομηχανία ηλεκτρονικόν, για παράδειγμα, έχει πρωτοστατήσει στην υιοθέτηση συστημάτων κλειστού βρόχου για τη διαχείριση του αυξανόμενου προβλήματος των ηλεκτρονικών αποβλήτων (e-waste). Εταιρείες όπως η Apple και η Dell έχουν εφαρμόσει ολοκληρωμένα προγράμματα ανάκτησης που επιτρέπουν στους καταναλωτές να επιστρέφουν παλιές συσκευές για ανακύκλωση, συμβάλλοντας στην ανάκτηση πολύτιμων υλικών όπως τα μέταλλα σπάνιων γαιών (Esenduran et al., 2017). Ομοίως, η αυτοκινητοβιομηχανία συνέχισε να επεκτείνει τη χρήση της ανακατασκευής και ανακύκλωσης για να παρατείνει τον κύκλο ζωής των οχημάτων και να μειώσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής.

2.6. Θεωρίες και μοντέλα στο σχεδιασμό εφοδιαστικής αλυσίδας

Ο σχεδιασμός της εφοδιαστικής αλυσίδας, ειδικά στο πλαίσιο των συστημάτων κλειστού βρόχου, απαιτεί την ενσωμάτωση διαφόρων θεωριών και μοντέλων που βελτιστοποιούν τις λειτουργίες, ελαχιστοποιούν το κόστος και ενισχύουν τη βιωσιμότητα. Η αυξανόμενη πολυπλοκότητα των σύγχρονων αλυσίδων εφοδιασμού, σε συνδυασμό με την ώθηση προς τις κυκλικές οικονομίες, οδήγησε στην ανάπτυξη και εφαρμογή πολλών θεωρητικών πλαισίων και μαθηματικών μοντέλων για την αντιμετώπιση των μοναδικών προκλήσεων που θέτουν οι αλυσίδες εφοδιασμού κλειστού βρόχου (CLSC). Αυτά τα μοντέλα επικεντρώνονται στην αποτελεσματική διαχείριση των ροών εφοδιαστικής, ενσωματώνοντας οικονομικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές πτυχές της βιωσιμότητας και στη διαχείριση αβεβαιοτήτων στη ζήτηση και τις αποδόσεις προϊόντων.

2.6.1 Θεωρία συστημάτων στο σχεδιασμό εφοδιαστικής αλυσίδας

Η θεωρία συστημάτων έχει εφαρμοστεί σε διάφορους κλάδους για την κατανόηση πολύπλοκων συστημάτων όπου διαφορετικά συστατικά αλληλεπιδρούν για να σχηματίσουν ένα σύνολο. Στο πλαίσιο των αλυσίδων εφοδιασμού, η θεωρία συστημάτων χρησιμοποιείται για να δει την εφοδιαστική αλυσίδα ως ένα ολοκληρωμένο δίκτυο όπου οι προμηθευτές, οι κατασκευαστές, οι διανομείς και οι καταναλωτές διασυνδέονται και οι αλληλεπιδράσεις τους επηρεάζουν τη συνολική απόδοση του συστήματος (Christopher, 2016). Όταν εφαρμόζεται σε αλυσίδες εφοδιασμού κλειστού βρόχου, η θεωρία συστημάτων δίνει έμφαση στην αλληλεξάρτηση μεταξύ των προς τα εμπρός και των αντίστροφων ροών προϊόντων και υλικών, απαιτώντας από τις εταιρείες να αναπτύξουν μηχανισμούς για τη διαχείριση της αλληλεπίδρασης μεταξύ των ροών νέων προϊόντων και των επιστρεφόμενων αγαθών.

Μία από τις κεντρικές αρχές της θεωρίας συστημάτων είναι ότι οι αλλαγές σε ένα μέρος του συστήματος θα έχουν κλιμακωτά αποτελέσματα σε ολόκληρο το δίκτυο. Αυτό είναι ιδιαίτερα σημαντικό για τα CLSC, όπου οι αποφάσεις που λαμβάνονται στον τομέα της μελλοντικής εφοδιαστικής, όπως η προμήθεια υλικών ή η παραγωγή, επηρεάζουν άμεσα τις λειτουργίες αντίστροφης εφοδιαστικής, όπως η ανάκτηση και η ανακύκλωση προϊόντων (Pagell & Wu, 2009). Η θεωρία συστημάτων ενθαρρύνει τις εταιρείες να σχεδιάζουν αλυσίδες εφοδιασμού που είναι προσαρμόσιμες και ανθεκτικές, ικανές να ανταποκρίνονται στις διακυμάνσεις της ζήτησης, στις επιστροφές προϊόντων και στις περιβαλλοντικές αλλαγές. Η υιοθέτηση αυτής της θεωρίας επιτρέπει στις επιχειρήσεις να υιοθετήσουν μια ολιστική άποψη της αλυσίδας εφοδιασμού τους, διασφαλίζοντας ότι τα διάφορα υποσυστήματα λειτουργούν συνεκτικά για τη βελτιστοποίηση τόσο των οικονομικών όσο και των περιβαλλοντικών αποτελεσμάτων.

2.6.2 Μοντέλα βελτιστοποίησης εφοδιαστικής αλυσίδας

Τα μαθηματικά μοντέλα διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη βελτιστοποίηση των λειτουργιών της εφοδιαστικής αλυσίδας βοηθώντας τις επιχειρήσεις να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με την παραγωγή, τη διαχείριση αποθεμάτων, τη μεταφορά και τη διανομή. Αυτά τα μοντέλα στοχεύουν στην ελαχιστοποίηση του κόστους, στη μείωση της σπατάλης και στη βελτίωση της χρήσης των πόρων, ενώ εξισορροπούν τα επίπεδα εξυπηρέτησης πελατών (Mitra, 2012). Στις αλυσίδες εφοδιασμού κλειστού βρόχου, τα μοντέλα βελτιστοποίησης είναι ιδιαίτερα σημαντικά λόγω των διπλών ροών υλικών — από τους προμηθευτές στους καταναλωτές (forward logistics) και από τους καταναλωτές πίσω στους προμηθευτές ή τους κατασκευαστές (reverse logistics).

Ένα ευρέως χρησιμοποιούμενο μοντέλο στη βελτιστοποίηση της εφοδιαστικής αλυσίδας είναι το μοντέλο μικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (mixed-integer linear programming model, MILP), το οποίο βοηθά τις επιχειρήσεις να επιλύουν πολύπλοκα προβλήματα εφοδιαστικής που περιλαμβάνουν πολλαπλές μεταβλητές και περιορισμούς. Αυτό το μοντέλο είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικό για συστήματα κλειστού βρόχου, όπου οι εταιρείες πρέπει να καθορίσουν τη βέλτιστη ισορροπία μεταξύ της προς τα εμπρός και της αντίστροφης εφοδιαστικής, λαμβάνοντας υπόψη παράγοντες όπως το κόστος των επιστροφών προϊόντων, η ανακατασκευή και η διάθεση (Fleischmann et al., 1997). Τα μοντέλα MILP επιτρέπουν στις εταιρείες να ενσωματώνουν περιβαλλοντικούς και οικονομικούς στόχους, διασφαλίζοντας ότι οι αλυσίδες εφοδιασμού είναι οικονομικά αποδοτικές και βιώσιμες.

Ένα άλλο μοντέλο βελτιστοποίησης που χρησιμοποιείται συχνά στο σχεδιασμό της εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου είναι το μοντέλο στοχαστικού προγραμματισμού. Αυτό το μοντέλο ενσωματώνει αβεβαιότητες στη ζήτηση, τις επιστροφές προϊόντων και τα ποσοστά ανάκτησης, καθιστώντας το ιδιαίτερα χρήσιμο σε κλάδους όπου ο όγκος και ο χρόνος των επιστροφών προϊόντων είναι απρόβλεπτοι (Esenduran et al., 2017). Τα στοχαστικά μοντέλα βοηθούν τις εταιρείες να προετοιμαστούν για τη μεταβλητότητα βελτιστοποιώντας αποφάσεις που βασίζονται σε διαφορετικά σενάρια, διασφαλίζοντας ότι η αλυσίδα εφοδιασμού μπορεί να

προσαρμοστεί σε απροσδόκητες αλλαγές στις συνθήκες της αγοράς ή στη συμπεριφορά των καταναλωτών. Για παράδειγμα, αυτά τα μοντέλα μπορούν να καθοδηγήσουν αποφάσεις σχετικά με τα επίπεδα αποθέματος, τα χρονοδιαγράμματα παραγωγής και τις διαδρομές μεταφοράς, διασφαλίζοντας ότι η αλυσίδα εφοδιασμού παραμένει αποτελεσματική ακόμη και όταν αντιμετωπίζει αβεβαιότητες.

2.6.3 Κυκλική οικονομία και μοντέλα κλειστού βρόχου

Η έννοια της κυκλικής οικονομίας είναι στενά ευθυγραμμισμένη με τον σχεδιασμό της εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου και έχουν αναπτυχθεί αρκετά μοντέλα για την ενσωμάτωση των αρχών της στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας. Η κυκλική οικονομία στοχεύει στη δημιουργία ενός συστήματος όπου τα προϊόντα, τα υλικά και οι πόροι διατηρούνται σε χρήση για όσο το δυνατόν περισσότερο, ελαχιστοποιώντας τα απόβλητα και μειώνοντας την ανάγκη για νέες πρώτες ύλες (Ghisellini et al., 2016). Σε αυτό το πλαίσιο, οι αλυσίδες εφοδιασμού κλειστού βρόχου χρησιμεύουν ως η λειτουργική βάση των κυκλικών οικονομιών, διευκολύνοντας την ανάκτηση, την επαναχρησιμοποίηση, την ανακατασκευή και την ανακύκλωση προϊόντων και υλικών.

Ένα βασικό μοντέλο είναι το μοντέλο απογραφής πολλαπλών κλιμακίων (multi-echelon model). Αυτό το μοντέλο βοηθά τις εταιρείες να βελτιστοποιήσουν τα επίπεδα αποθεμάτων σε διαφορετικά στάδια της εφοδιαστικής αλυσίδας, λαμβάνοντας υπόψη τη ροή τόσο των νέων προϊόντων όσο και των επιστρεφόμενων αγαθών (Zhu et al., 2012). Το μοντέλο πολλαπλών κλιμακίων είναι ιδιαίτερα χρήσιμο για επιχειρήσεις που ασχολούνται με μεγάλους όγκους επιστροφών προϊόντων, όπως οι βιομηχανίες ηλεκτρονικών ή αυτοκινητοβιομηχανιών. Με τη βελτιστοποίηση των επιπέδων αποθέματος, οι εταιρείες μπορούν να μειώσουν το κόστος διακράτησης, να ελαχιστοποιήσουν τα απόβλητα και να βελτιώσουν την αποτελεσματικότητα τόσο των προς τα εμπρός, όσο και των αντίστροφων λειτουργιών εφοδιαστικής.

Επιπλέον, τα μοντέλα αξιολόγησης κύκλου ζωής (lifecycle assessment, LCA) χρησιμοποιούνται συχνά για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των

αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου. Τα μοντέλα LCA βοηθούν τις επιχειρήσεις να αξιολογούν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των προϊόντων τους καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους, από την εξόρυξη πρώτων υλών έως την παραγωγή, τη διανομή, τη χρήση και τη διάθεση (Gehin et al., 2008). Με την ενσωμάτωση της LCA στο σχεδιασμό της εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου, οι εταιρείες μπορούν να εντοπίσουν ευκαιρίες για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων επεκτείνοντας τον κύκλο ζωής των προϊόντων μέσω επαναχρησιμοποίησης, ανακατασκευής και ανακύκλωσης. Αυτά τα μοντέλα είναι ιδιαίτερα σημαντικά για τις βιομηχανίες που αντιμετωπίζουν αυστηρούς περιβαλλοντικούς κανονισμούς, καθώς συμβάλλουν στη διασφάλιση της συμμόρφωσης ενώ βελτιστοποιούν τις λειτουργίες της αλυσίδας εφοδιασμού για βιωσιμότητα.

2.6.4 Η θεωρία των πόρων και δυναμικές δυνατότητες

Ένα άλλο θεωρητικό πλαίσιο που σχετίζεται με το σχεδιασμό της εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου είναι η θεωρία των πόρων (resource-based view, RBV) της επιχείρησης, η οποία εστιάζει στους εσωτερικούς πόρους και τις δυνατότητες μιας εταιρείας ως βασικούς μοχλούς ανταγωνιστικού πλεονεκτήματος (Barney, 1991). Στο πλαίσιο των αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου, η RBV τονίζει τη σημασία της ανάπτυξης ικανοτήτων στην αντίστροφη εφοδιαστική, την ανακατασκευή και την ανάκτηση προϊόντων για τη δημιουργία αξίας και τη διαφοροποίηση από τους ανταγωνιστές. Οι εταιρείες που μπορούν να διαχειριστούν αποτελεσματικά τις λειτουργίες αντίστροφης εφοδιαστικής τους και να ανακτήσουν πολύτιμα υλικά από επιστρεφόμενα αγαθά βρίσκονται σε καλύτερη θέση για να ανταγωνιστούν σε αγορές που δίνουν ολοένα και μεγαλύτερη προτεραιότητα στη βιωσιμότητα.

Στενά συνδεδεμένη με το RBV είναι η θεωρία των δυναμικών ικανοτήτων, η οποία προτείνει ότι οι εταιρείες πρέπει συνεχώς να προσαρμόζονται και να καινοτομούν για να διατηρήσουν το ανταγωνιστικό τους πλεονέκτημα σε ταχέως μεταβαλλόμενα περιβάλλοντα (Teece et al., 1997). Οι δυναμικές δυνατότητες είναι ιδιαίτερα σημαντικές στις κλειστού βρόχου εφοδιαστικές αλυσίδες, όπου οι εταιρείες πρέπει να εξελίσσονται συνεχώς για να ανταποκρίνονται στις νέες κανονιστικές

απαιτήσεις, τις αλλαγές στη συμπεριφορά των καταναλωτών και τις εξελίξεις στην τεχνολογία. Οι επιχειρήσεις που αναπτύσσουν ισχυρές δυναμικές δυνατότητες σε συστήματα αντίστροφης εφοδιαστικής και κλειστού βρόχου είναι πιο πιθανό να επιτύχουν τη μετάβαση σε μοντέλα κυκλικής οικονομίας και την επίτευξη μακροπρόθεσμων στόχων βιωσιμότητας.

Συμπερασματικά, ο σχεδιασμός και η βελτιστοποίηση των αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου βασίζεται σε διάφορα θεωρητικά πλαίσια και μαθηματικά μοντέλα που επιτρέπουν στις εταιρείες να εξισορροπούν οικονομικούς, περιβαλλοντικούς και λειτουργικούς στόχους. Η θεωρία συστημάτων παρέχει μια ολιστική άποψη της εφοδιαστικής αλυσίδας ως διασυνδεδεμένου δικτύου, ενώ μοντέλα βελτιστοποίησης όπως το MILP και ο στοχαστικός προγραμματισμός βοηθούν τις επιχειρήσεις να λαμβάνουν τεκμηριωμένες αποφάσεις σχετικά με τις λειτουργίες μπροστινής και αντίστροφης εφοδιαστικής. Τα μοντέλα κυκλικής οικονομίας, όπως τα συστήματα απογραφής πολλών κλιμακίων και οι αξιολογήσεις του κύκλου ζωής, ενισχύουν περαιτέρω τη βιωσιμότητα των αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου προωθώντας την αποδοτικότητα των πόρων και τη μείωση των αποβλήτων. Τέλος, η βασισμένη σε πόρους θεωρία και η θεωρία δυναμικών ικανοτήτων υπογραμμίζουν τη σημασία των εσωτερικών πόρων και της συνεχούς καινοτομίας για τη διατήρηση του ανταγωνιστικού πλεονεκτήματος στα συστήματα κλειστού βρόχου.

2.7 Προκλήσεις στο σχεδιασμό συστημάτων εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου

2.7.1 Διαχείριση ανάκτησης και ανακύκλωσης προϊόντων

Η διαχείριση της ανάκτησης και της ανακύκλωσης προϊόντων εντός μιας αλυσίδας εφοδιασμού κλειστού βρόχου (CLSC) παρουσιάζει μια σειρά από υλικοτεχνικές και λειτουργικές προκλήσεις. Η διαδικασία είναι πολύ πιο περίπλοκη από την παραδοσιακή εφοδιαστική, λόγω της ανάγκης να συλλέγονται, να

αξιολογούνται, να ανακαινίζονται και να ανακυκλώνονται αποτελεσματικά προϊόντα ή υλικά.

Η ανάκτηση προϊόντος αναφέρεται στη διαδικασία συλλογής χρησιμοποιημένων προϊόντων ή υλικών ανακατασκευής τους και επανεισαγωγής τους στην αγορά. Αυτή η διαδικασία περιλαμβάνει πολλαπλά στάδια, συμπεριλαμβανομένης της αρχικής συλλογής, επιθεώρησης, διαλογής και, τέλος, ανάκτησης ή ανακύκλωσης. Κάθε στάδιο παρουσιάζει μοναδικές υλικοτεχνικές και επιχειρησιακές δυσκολίες. Η φάση συλλογής είναι ίσως η πιο δύσκολη λόγω της αποκεντρωμένης φύσης των επιστροφών προϊόντων (Guide & Van Wassenhove, 2009). Τα προϊόντα συχνά επιστρέφουν από πολλές τοποθεσίες, σε διάφορες συνθήκες και μέσω διαφορετικών καναλιών. Για τη βελτιστοποίηση της συλλογής, οι εταιρείες συχνά συνεργάζονται με τρίτους παρόχους logistics (3PLs) που ειδικεύονται στην αντίστροφη εφοδιαστική. Ωστόσο, ο συντονισμός με αυτούς τους παρόχους μπορεί να δημιουργήσει πολυπλοκότητα, καθώς πρέπει να ευθυγραμμίζονται με τους στόχους βιωσιμότητας και τις υλικοτεχνικές διαδικασίες της εταιρείας.

Μόλις συλλεχθούν τα προϊόντα, πρέπει να επιθεωρηθούν και να ταξινομηθούν για να προσδιοριστεί η δυνατότητα ανακαίνισης ή ανακύκλωσής τους. Αυτό το βήμα είναι κρίσιμο γιατί δεν μπορούν να ανακτηθούν όλα τα προϊόντα με τον ίδιο τρόπο. Τα αντικείμενα που είναι κατάλληλα για επαναχρησιμοποίηση ενδέχεται να απαιτούν καθαρισμό, επισκευή ή αναβάθμιση, ενώ τα προϊόντα που κρίνονται ακατάλληλα για επαναχρησιμοποίηση πρέπει να αποσυναρμολογούνται και να ανακυκλώνονται (Govindan et al., 2015). Η αποτελεσματική διαλογή και επεξεργασία αυτών των προϊόντων απαιτεί εξελιγμένα τεχνολογικά συστήματα και εξειδικευμένο εργατικό δυναμικό, τα οποία και τα δύο απαιτούν πόρους. Η μη προβλεψιμότητα των επιστροφών -τόσο όσον αφορά τον όγκο όσο και την κατάσταση του προϊόντος- επιβαρύνει αυτήν την πρόκληση, καθιστώντας δύσκολο τον αποτελεσματικό σχεδιασμό και την κατανομή των πόρων.

Η ανακύκλωση είναι μια άλλη κρίσιμη πτυχή των αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου και αντιπροσωπεύει μια σημαντική επιχειρησιακή πρόκληση. Πολλές βιομηχανίες, ιδιαίτερα τα ηλεκτρονικά, η αυτοκινητοβιομηχανία και ο κλάδος των καταναλωτικών αγαθών, ασχολούνται με πολύπλοκα προϊόντα που αποτελούνται από πολλά υλικά, μερικά από τα οποία μπορεί να είναι επικίνδυνα. Η σωστή

αποσυναρμολόγηση και ο διαχωρισμός αυτών των υλικών για ανακύκλωση απαιτεί εξειδικευμένες εγκαταστάσεις και τεχνολογίες (Esenduran et al., 2017). Επιπλέον, η διαδικασία ανακύκλωσης πρέπει να πληροί αυστηρούς περιβαλλοντικούς κανονισμούς, οι οποίοι διαφέρουν από χώρα σε χώρα και συχνά απαιτούν από τις εταιρείες να εφαρμόζουν ακριβά μέτρα συμμόρφωσης. Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, για παράδειγμα, η Οδηγία για τα Απόβλητα Ηλεκτρικού και Ηλεκτρονικού Εξοπλισμού (ΑΗΗΕ) επιβάλλει αυστηρές απαιτήσεις για την ανακύκλωση ηλεκτρονικών προϊόντων, καθιστώντας απαραίτητο για τις εταιρείες να επενδύσουν σε προηγμένες τεχνολογίες ανακύκλωσης (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2019). Η αδυναμία τήρησης αυτών των προτύπων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές οικονομικές κυρώσεις, αυξάνοντας περαιτέρω το κόστος των λειτουργιών κλειστού βρόχου.

Μία από τις βασικές δυσκολίες στη διαχείριση της ανακύκλωσης είναι η ανάκτηση υλικών υψηλής αξίας με ταυτόχρονη ελαχιστοποίηση των απορριμμάτων. Σε βιομηχανίες όπως η ηλεκτρονική, τα προϊόντα περιέχουν συχνά πολύτιμα μέταλλα όπως χρυσό, ασήμι και στοιχεία σπάνιων γαιών, τα οποία μπορούν να εξαχθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν. Ωστόσο, η διαδικασία εξαγωγής αυτών των υλικών είναι τεχνολογικά απαιτητική και δαπανηρή, συχνά απαιτεί τη χρήση χημικών διεργασιών που πρέπει να αντιμετωπίζονται προσεκτικά για να αποφευχθεί η μόλυνση του περιβάλλοντος (Bai & Sarkis, 2013). Ταυτόχρονα, οι εταιρείες πρέπει να διασφαλίσουν ότι ελαχιστοποιούν την ποσότητα των απορριμμάτων που πηγαίνουν στους χώρους υγειονομικής ταφής, κάτι που μπορεί να αποτελέσει πρόκληση όταν αντιμετωπίζονται προϊόντα που περιέχουν επικίνδυνα ή μη ανακυκλώσιμα συστατικά. Η εξισορρόπηση της ανάκτησης υλικών με την περιβαλλοντική αειφορία είναι μια βασική πρόκληση στη διαχείριση της ανακύκλωσης, η οποία απαιτεί συνεχή καινοτομία και επενδύσεις.

Η τήρηση των περιβαλλοντικών κανονισμών είναι μια άλλη σημαντική πρόκληση για τις εταιρείες που διαχειρίζονται την ανάκτηση και την ανακύκλωση προϊόντων. Οι κυβερνήσεις σε όλο τον κόσμο εφαρμόζουν ολοένα και περισσότερο αυστηρότερους περιβαλλοντικούς νόμους με στόχο τη μείωση των απορριμμάτων και την προώθηση της ανακύκλωσης. Το σχέδιο δράσης για την κυκλική οικονομία της Ευρωπαϊκής Ένωσης, για παράδειγμα, ενθαρρύνει τις εταιρείες να υιοθετήσουν πιο βιώσιμες πρακτικές, συμπεριλαμβανομένης της ανάπτυξης αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2020). Ενώ αυτοί οι κανονισμοί αποσκοπούν

στην προώθηση της βιωσιμότητας, επιβάλλουν επίσης πρόσθετα λειτουργικά και οικονομικά βάρη στις επιχειρήσεις. Οι εταιρείες πρέπει να επενδύσουν σε τεχνολογίες και διαδικασίες που πληρούν τα ρυθμιστικά πρότυπα, η εφαρμογή των οποίων μπορεί να είναι δαπανηρή και χρονοβόρα.

Εκτός από τις ρυθμιστικές προκλήσεις, οι εταιρείες αντιμετωπίζουν επίσης πίεση από καταναλωτές και ενδιαφερόμενους φορείς να υιοθετήσουν βιώσιμες πρακτικές. Οι καταναλωτές απαιτούν όλο και περισσότερο από τις εταιρείες να αναλάβουν την ευθύνη για τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των προϊόντων τους, ιδιαίτερα στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Αυτή η αλλαγή στις προσδοκίες των καταναλωτών οδήγησε στην ανάπτυξη των πρωτοβουλιών εκτεταμένης ευθύνης παραγωγού (extended producer responsibility , EPR), οι οποίες απαιτούν από τις εταιρείες να πάρουν πίσω τα προϊόντα τους μετά τη χρήση τους και να εξασφαλίσουν ότι απορρίπτονται ή ανακυκλώνονται σωστά (Ghisellini et al., 2016). Τα προγράμματα EPR έχουν υιοθετηθεί ευρέως σε βιομηχανίες όπως η ηλεκτρονική και η αυτοκινητοβιομηχανία, όπου οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις της απόρριψης προϊόντων είναι ιδιαίτερα υψηλές. Ενώ αυτά τα προγράμματα βοηθούν τις εταιρείες να ενισχύσουν τα διαπιστευτήριά τους για τη βιωσιμότητα, απαιτούν επίσης σημαντικές επενδύσεις σε συστήματα αντίστροφης εφοδιαστικής και ανάκτησης προϊόντων.

Παρά αυτές τις προκλήσεις, η διαχείριση της ανάκτησης και της ανακύκλωσης προϊόντων προσφέρει ουσιαστικά οφέλη στις επιχειρήσεις. Εκτός από την εκπλήρωση των κανονιστικών απαιτήσεων και την ενίσχυση της περιβαλλοντικής τους φήμης, οι εταιρείες μπορούν να επιτύχουν σημαντική εξοικονόμηση κόστους ανακτώντας πολύτιμα υλικά και μειώνοντας την εξάρτησή τους από παρθένους πόρους (Govindan et al., 2015). Επιπλέον, η υιοθέτηση πρακτικών εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου μπορεί να δημιουργήσει νέες ροές εσόδων μέσω της πώλησης ανακαινισμένων προϊόντων ή ανακυκλωμένων υλικών.

2.7.2 Χωρικές προκλήσεις και προκλήσεις που σχετίζονται με την εφοδιαστική

Στο πλαίσιο των αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου (CLSC), οι υλικοτεχνικές και χωρικές προκλήσεις είναι κρίσιμοι παράγοντες που επηρεάζουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα και τη βιωσιμότητα του συστήματος. Τα συστήματα κλειστού βρόχου περιλαμβάνουν την επιστροφή και ανάκτηση μεταχειρισμένων προϊόντων, γεγονός που προσθέτει πολυπλοκότητα στις παραδοσιακές αλυσίδες εφοδιασμού λόγω της διπλής ροής αγαθών - τόσο προς τα εμπρός όσο και προς τα πίσω. Οι γεωγραφικοί παράγοντες, η εφοδιαστική μεταφορών, η διαχείριση του χώρου αποθήκης και ο συντονισμός των αγαθών σε διαφορετικές περιοχές και στάδια της αλυσίδας εφοδιασμού είναι θεμελιώδεις για την αντιμετώπιση αυτών των προκλήσεων. Η αποτελεσματική διαχείριση αυτών των στοιχείων είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της λειτουργικής βιωσιμότητας των συστημάτων κλειστού βρόχου, με ταυτόχρονη επίτευξη περιβαλλοντικών και οικονομικών στόχων.

Μία από τις πιο σημαντικές υλικοτεχνικές προκλήσεις στις αλυσίδες εφοδιασμού κλειστού βρόχου είναι η διαχείριση της αντίστροφης ροής αγαθών. Στις παραδοσιακές αλυσίδες εφοδιασμού, η ροή των προϊόντων ακολουθεί συνήθως μια γραμμική διαδρομή από την προμήθεια πρώτων υλών στην κατασκευή, τη διανομή και, τέλος, την κατανάλωση (Esenduran et al., 2017). Αντίθετα, τα συστήματα κλειστού βρόχου πρέπει να διαχειρίζονται και την αντίστροφη εφοδιαστική, όπου τα προϊόντα επιστρέφονται στον κατασκευαστή για ανακατασκευή, ανακύκλωση ή απόρριψη. Αυτή η αντίστροφη ροή μπορεί να είναι εξαιρετικά απρόβλεπτη τόσο ως προς το χρόνο όσο και ως προς την ποσότητα, δημιουργώντας δυσκολίες στον προγραμματισμό και την κατανομή των πόρων (Bai & Sarkis, 2013). Σε αντίθεση με την απλή εφοδιαστική, όπου η ζήτηση μπορεί συχνά να προβλεφθεί με κάποιο βαθμό ακρίβειας, ο όγκος των επιστρεφόμενων αγαθών επηρεάζεται από πολλούς παράγοντες όπως η διάρκεια ζωής του προϊόντος, η συμπεριφορά των καταναλωτών και οι κανονιστικές απαιτήσεις. Ως αποτέλεσμα, οι εταιρείες πρέπει να αναπτύξουν ευέλικτες στρατηγικές logistics που να μπορούν να φιλοξενήσουν τα κυμαινόμενα ποσοστά απόδοσης ελαχιστοποιώντας παράλληλα το κόστος.

Οι γεωγραφικοί παράγοντες περιπλέκουν περαιτέρω τη διαδικασία της αντίστροφης εφοδιαστικής. Η συλλογή και η ανάκτηση των χρησιμοποιημένων προϊόντων γίνεται συνήθως σε μια ευρεία γεωγραφική περιοχή, με προϊόντα που επιστρέφονται από διαφορετικές τοποθεσίες. Αυτή η διασπορά των επιστρεφόμενων εμπορευμάτων δημιουργεί υλικοτεχνικές δυσκολίες όσον αφορά τη μεταφορά και τον συντονισμό. Για παράδειγμα, τα επιστρεφόμενα προϊόντα μπορεί να χρειαστεί να μεταφερθούν σε μεγάλες αποστάσεις σε εξειδικευμένες εγκαταστάσεις για επιθεώρηση, επαναχρησιμοποίηση ή ανακύκλωση, γεγονός που αυξάνει το κόστος μεταφοράς και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Govindan et al., 2015). Επιπλέον, οι λειτουργίες αντίστροφης εφοδιαστικής συχνά αντιμετωπίζουν την πρόκληση του συντονισμού πολλαπλών σημείων επιστροφής, συμπεριλαμβανομένων των καταστημάτων λιανικής, των καταναλωτών και των κέντρων συλλογής, τα οποία μπορεί να διαφέρουν σημαντικά ως προς τη γεωγραφική τους κατανομή και τον όγκο των επιστροφών. Η αποτελεσματική διαχείριση της εφοδιαστικής μεταφορών είναι απαραίτητη για την ελαχιστοποίηση του κόστους και των εκπομπών που σχετίζονται με τη μεταφορά μεγάλων αποστάσεων, διασφαλίζοντας παράλληλα ότι τα επιστρεφόμενα προϊόντα υποβάλλονται σε έγκαιρη επεξεργασία.

Μια άλλη βασική υλικοτεχνική πρόκληση είναι η διαχείριση του χώρου αποθήκης. Στις αλυσίδες εφοδιασμού κλειστού βρόχου, οι εταιρείες δεν πρέπει μόνο να αποθηκεύουν νέα προϊόντα και πρώτες ύλες αλλά και να φιλοξενούν επιστρεφόμενα αγαθά που αναμένουν επιθεώρηση, επισκευή ή ανακύκλωση. Η μεταβλητότητα στα ποσοστά επιστροφής επιδεινώνει την πρόκληση της διαχείρισης του χώρου αποθήκης, καθώς οι εταιρείες πρέπει να είναι προετοιμασμένες να χειριστούν τις ξαφνικές αυξήσεις στις επιστροφές προϊόντων (Guide & Van Wassenhove, 2009). Επιπλέον, τα επιστρεφόμενα αγαθά απαιτούν συχνά ειδικές συνθήκες αποθήκευσης, ιδιαίτερα εάν περιλαμβάνουν επικίνδυνα υλικά ή εξαρτήματα που πρέπει να αποσυναρμολογηθούν και να υποστούν επεξεργασία ξεχωριστά. Για παράδειγμα, τα ηλεκτρονικά απόβλητα (e-waste) περιέχουν συχνά τοξικές ουσίες που πρέπει να αποθηκεύονται σύμφωνα με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς για την αποφυγή μόλυνσης (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2020). Η αποτελεσματική διαχείριση αυτών των χωρικών απαιτήσεων είναι ζωτικής σημασίας για την αποφυγή συμφόρησης στην αλυσίδα εφοδιασμού και τη διασφάλιση ότι τα επιστρεφόμενα αγαθά υποβάλλονται σε επεξεργασία και επανεντάσσονται στον κύκλο παραγωγής χωρίς καθυστέρηση.

Οι χωρικές προκλήσεις των αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου περιπλέκονται περαιτέρω από την ανάγκη για εξειδικευμένες εγκαταστάσεις για την ανάκτηση και την ανακύκλωση προϊόντων. Πολλές βιομηχανίες, ιδιαίτερα εκείνες που ασχολούνται με πολύπλοκα προϊόντα όπως ηλεκτρονικά και εξαρτήματα αυτοκινήτων, απαιτούν προηγμένες εγκαταστάσεις για την αποσυναρμολόγηση, την ανακαίνιση ή την ανακύκλωση προϊόντων. Αυτές οι εγκαταστάσεις βρίσκονται συχνά σε συγκεκριμένες περιοχές, καθιστώντας απαραίτητη τη μεταφορά των επιστρεφόμενων εμπορευμάτων σε μεγάλες αποστάσεις για να φτάσουν στο κατάλληλο κέντρο επεξεργασίας (Fleischmann et al., 1997). Για παράδειγμα, μια επιστρεφόμενη ηλεκτρονική συσκευή μπορεί να χρειαστεί να σταλεί σε μια εγκατάσταση για αποσυναρμολόγηση, μια άλλη για ανάκτηση εξαρτημάτων και μια τρίτη για ανακύκλωση πολύτιμων υλικών, όπως μέταλλα σπάνιων γαιών. Αυτή η κατακερματισμένη διαδικασία ανάκτησης μπορεί να δημιουργήσει αναποτελεσματικότητα στην αλυσίδα εφοδιασμού, καθώς οι εταιρείες πρέπει να διαχειρίζονται πολλαπλά στάδια μεταφοράς και επεξεργασίας, διασφαλίζοντας παράλληλα ότι τα προϊόντα διακινούνται σύμφωνα με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς.

Επιπλέον, η εφοδιαστική μεταφορών σε συστήματα κλειστού βρόχου αντιμετωπίζει συχνά πρόσθετους περιορισμούς που σχετίζονται με τη βιωσιμότητα των μεθόδων μεταφοράς. Δεδομένης της περιβαλλοντικής εστίασης των αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου, οι εταιρείες βρίσκονται υπό αυξανόμενη πίεση να ελαχιστοποιήσουν το αποτύπωμα άνθρακα των λειτουργιών εφοδιαστικής τους (Ghisellini et al., 2016). Αυτό περιλαμβάνει την υιοθέτηση πιο βιώσιμων μεθόδων μεταφοράς, όπως η χρήση ηλεκτρικών οχημάτων ή η βελτιστοποίηση των διαδρομών μεταφοράς για τη μείωση της κατανάλωσης καυσίμου. Ωστόσο, αυτές οι βιώσιμες επιλογές μεταφοράς μπορεί να είναι δαπανηρές και μπορεί να απαιτούν σημαντική αρχική επένδυση σε υποδομές και τεχνολογία. Οι εταιρείες πρέπει να εξισορροπήσουν την ανάγκη ελαχιστοποίησης του κόστους μεταφοράς και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων με την επιχειρησιακή πραγματικότητα της διαχείρισης της αντίστροφης εφοδιαστικής σε μεγάλες αποστάσεις.

Μια προσέγγιση για την αντιμετώπιση των υλικοτεχνικών και χωρικών προκλήσεων των αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου είναι η εφαρμογή

προηγμένων τεχνολογιών όπως το Διαδίκτυο των Πραγμάτων (IoT), το blockchain και η τεχνητή νοημοσύνη (AI). Αυτές οι τεχνολογίες μπορούν να βοηθήσουν τις εταιρείες να παρακολουθούν την κίνηση των επιστρεφόμενων αγαθών, να βελτιστοποιούν τις διαδρομές μεταφοράς και να διαχειρίζονται τον χώρο της αποθήκης πιο αποτελεσματικά (Saberí et al., 2019). Για παράδειγμα, οι συσκευές με δυνατότητα IoT μπορούν να παρέχουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για την τοποθεσία και την κατάσταση των επιστρεφόμενων προϊόντων, επιτρέποντας στις εταιρείες να εξορθολογίσουν τη διαδικασία αντίστροφης εφοδιαστικής και να μειώσουν τις καθυστερήσεις. Ομοίως, οι αλγόριθμοι τεχνητής νοημοσύνης μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την πρόβλεψη των ποσοστών επιστροφής και τη βελτιστοποίηση της κατανομής του χώρου αποθήκης, διασφαλίζοντας ότι τα επιστρεφόμενα αγαθά υποβάλλονται σε επεξεργασία όσο το δυνατόν ταχύτερα και αποτελεσματικότερα.

Παρά τις δυνατότητες αυτών των τεχνολογιών, η εφαρμογή τους παρουσιάζει τις δικές της προκλήσεις. Η ενσωμάτωση IoT, blockchain και AI σε υπάρχοντα συστήματα εφοδιαστικής αλυσίδας μπορεί να είναι δαπανηρή και απαιτεί σημαντικές επενδύσεις σε υποδομές, εκπαίδευση και ασφάλεια στον κυβερνοχώρο (Zhu et al., 2012). Επιπλέον, η επιτυχία αυτών των τεχνολογιών εξαρτάται από την ικανότητα των εταιρειών να συλλέγουν και να αναλύουν μεγάλους όγκους δεδομένων από πολλά σημεία της αλυσίδας εφοδιασμού, κάτι που μπορεί να είναι δύσκολο σε πολύπλοκα, παγκόσμια δίκτυα. Ως αποτέλεσμα, ενώ αυτές οι τεχνολογίες προσφέρουν ελπιδοφόρες λύσεις στις υλικοτεχνικές και χωρικές προκλήσεις των αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου, η υιοθέτησή τους πρέπει να σχεδιάζεται και να διαχειρίζεται προσεκτικά.

2.7.3. Τεχνολογικές προκλήσεις και καινοτομίες

Η εφαρμογή αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου (CLSC) αντιμετωπίζει πολυάριθμες τεχνολογικές προκλήσεις που εμποδίζουν τη βελτιστοποίηση της αντίστροφης εφοδιαστικής και την αποτελεσματική ανάκτηση, ανακαίνιση και ανακύκλωση προϊόντων. Ένα από τα πιο σημαντικά εμπόδια είναι η έλλειψη επαρκών συστημάτων παρακολούθησης. Οι παραδοσιακές αλυσίδες εφοδιασμού βασίζονται συχνά σε μεθόδους γραμμικής παρακολούθησης που δεν λαμβάνουν υπόψη την

πολυπλοκότητα ενός συστήματος κλειστού βρόχου, όπου τα προϊόντα κινούνται τόσο προς τα εμπρός όσο και προς την αντίστροφη κατεύθυνση. Η απουσία ισχυρών τεχνολογιών παρακολούθησης οδηγεί σε αναποτελεσματικότητα στην παρακολούθηση των επιστροφών προϊόντων, των διαδικασιών ανάκτησης και της διανομής ανακαινισμένων αντικειμένων (Govindan et al., 2015).

Το υψηλό κόστος που συνδέεται με την υιοθέτηση νέων τεχνολογιών θέτουν επίσης σημαντικές προκλήσεις για την ευρεία εφαρμογή των CLSC. Πολλές επιχειρήσεις, ιδιαίτερα οι μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις (ΜΜΕ), διστάζουν να επενδύσουν σε ακριβά συστήματα παρακολούθησης και αυτοματισμού. Η αρχική κεφαλαιουχική δαπάνη που απαιτείται για την εφαρμογή προηγμένων συστημάτων, όπως η αναγνώριση ραδιοσυχνότητας (RFID) και οι συσκευές Internet of Things (IoT), είναι συχνά απαγορευτικές, περιορίζοντας τις δυνατότητες καινοτομίας στη διαχείριση της εφοδιαστικής αλυσίδας (Ghisellini et al., 2016). Αυτά τα τεχνολογικά εμπόδια όχι μόνο επιβραδύνουν τη μετάβαση σε συστήματα κλειστού βρόχου, αλλά εμποδίζουν επίσης τις επιχειρήσεις να καρπωθούν τα μακροπρόθεσμα οφέλη της βελτίωσης της αποδοτικότητας των πόρων και της μείωσης των απορριμμάτων.

Ωστόσο, οι πρόσφατες καινοτομίες στις τεχνολογίες παρακολούθησης και διαχείρισης δεδομένων προσφέρουν ελπιδοφόρες λύσεις σε αυτές τις προκλήσεις. Η τεχνολογία RFID, για παράδειγμα, επιτρέπει στις εταιρείες να παρακολουθούν τα προϊόντα σε πραγματικό χρόνο καθώς κινούνται στην αλυσίδα εφοδιασμού, διευκολύνοντας την αποτελεσματικότερη διαχείριση των επιστροφών και τον έλεγχο των αποθεμάτων (Zhu et al., 2012). Οι ετικέτες RFID μπορούν να ενσωματωθούν σε προϊόντα κατά τη διάρκεια της κατασκευής, επιτρέποντας στις εταιρείες να παρακολουθούν ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος, από την παραγωγή έως την ανάκτηση στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Αυτή η τεχνολογία βοηθά στη βελτίωση της ορατότητας των επιστρεφόμενων αγαθών, διασφαλίζοντας την έγκαιρη επεξεργασία τους και μειώνοντας την πιθανότητα απώλειας ή κακής διαχείρισης αντικειμένων.

2.7.4 Ροή πληροφοριών και διαφάνεια στην εφοδιαστική αλυσίδα

Η αποτελεσματική ροή πληροφοριών και η διαφάνεια είναι κρίσιμα στοιχεία μιας εύρυθμης εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου. Η διαφανής και σε πραγματικό χρόνο ανταλλαγή δεδομένων μεταξύ των συνεργατών της εφοδιαστικής αλυσίδας είναι απαραίτητη για την παρακολούθηση του κύκλου ζωής των προϊόντων, από την κατασκευή και τη διανομή τους έως την τελική ανάκτηση, ανακατασκευή ή ανακύκλωσή τους (Esenduran et al., 2017). Ωστόσο, πολλοί οργανισμοί αγωνίζονται να δημιουργήσουν απρόσκοπτες ροές πληροφοριών, συχνά λόγω των κατακερματισμένων συστημάτων και της έλλειψης τυποποιημένων πρωτοκόλλων κοινής χρήσης δεδομένων.

Μία από τις κύριες προκλήσεις για την επίτευξη διαφάνειας σε συστήματα κλειστού βρόχου είναι η έλλειψη ολοκλήρωσης μεταξύ των διαφορετικών σταδίων της εφοδιαστικής αλυσίδας. Η διαχείριση της προς τα εμπρός και της αντίστροφης εφοδιαστικής γίνεται συχνά από ξεχωριστές ομάδες ή εξωτερικούς συνεργάτες, με αποτέλεσμα έλλειμα πληροφοριών που εμποδίζει την ομαλή ροή δεδομένων. Αυτός ο κατακερματισμός καθιστά δύσκολο για τις εταιρείες να αποκτήσουν μια ολοκληρωμένη εικόνα των λειτουργιών της αλυσίδας εφοδιασμού τους, οδηγώντας σε καθυστερήσεις στη λήψη αποφάσεων και αναποτελεσματικότητα στην ανάκτηση προϊόντων (Govindan et al., 2015). Επιπλέον, χωρίς πληροφορίες σε πραγματικό χρόνο για την κατάσταση των επιστρεφόμενων προϊόντων, οι εταιρείες ενδέχεται να αντιμετωπίσουν προκλήσεις στον συντονισμό των προσπαθειών ανακατασκευής ή ανακύκλωσης, με αποτέλεσμα αυξημένο κόστος και μειωμένη βιωσιμότητα.

Η σημασία της διαφάνειας στις αλυσίδες εφοδιασμού κλειστού βρόχου θα πρέπει να επισημανθεί. Η διαφανής ανταλλαγή πληροφοριών επιτρέπει στις εταιρείες να εντοπίζουν τα σημεία συμφόρησης, να εξορθολογίζουν τις λειτουργίες και να βελτιώνουν τη συνεργασία με τους συνεργάτες και τους προμηθευτές (Zhu et al., 2012). Επιτρέπει επίσης στους οργανισμούς να παρέχουν στους καταναλωτές ακριβείς πληροφορίες σχετικά με τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο των προϊόντων τους, ενισχύοντας μεγαλύτερη εμπιστοσύνη και πίστη στην επωνυμία. Οι εταιρείες που μπορούν να αποδείξουν τη βιωσιμότητα των εργασιών τους μέσω διαφανών αναφορών

είναι πιο πιθανό να προσελκύσουν περιβαλλοντικά συνειδητοποιημένους καταναλωτές και να συμμορφωθούν με ολοένα και πιο αυστηρές κανονιστικές απαιτήσεις.

Για να αντιμετωπίσουν τις προκλήσεις της ροής πληροφοριών, πολλές εταιρείες στρέφονται σε ψηφιακές λύσεις, όπως πλατφόρμες που βασίζονται σε cloud, IoT και blockchain. Οι πλατφόρμες που βασίζονται στο cloud επιτρέπουν στους συνεργάτες της εφοδιαστικής αλυσίδας να μοιράζονται δεδομένα σε πραγματικό χρόνο, διασφαλίζοντας ότι όλοι οι ενδιαφερόμενοι έχουν πρόσβαση σε ενημερωμένες πληροφορίες σχετικά με τις επιστροφές προϊόντων, τα επίπεδα αποθέματος και την κατάσταση επεξεργασίας (Saber et al., 2019). Οι συσκευές IoT μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παρακολούθηση της κατάστασης των επιστρεφόμενων αγαθών και την παρακολούθηση της κίνησής τους μέσω της αλυσίδας εφοδιασμού, παρέχοντας πολύτιμα δεδομένα για τον κύκλο ζωής των προϊόντων. Το blockchain, όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ενισχύει τη διαφάνεια δημιουργώντας ένα αμετάβλητο αρχείο κάθε συναλλαγής, διασφαλίζοντας ότι οι συμμετέχοντες στην εφοδιαστική αλυσίδα έχουν πρόσβαση σε επαληθεύσιμα δεδομένα για την προέλευση και τον προορισμό των προϊόντων.

2.7.5 Νομικοί και ρυθμιστικοί περιορισμοί

Η εφαρμογή αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου συχνά περιπλέκεται από πολλούς νομικούς και ρυθμιστικούς περιορισμούς. Αυτοί οι περιορισμοί ποικίλλουν ευρέως ανάλογα με την περιοχή, τον κλάδο και τον τύπο του προϊόντος που εμπλέκεται, γεγονός που καθιστά δύσκολο για τις επιχειρήσεις να σχεδιάσουν και να λειτουργήσουν CLSC που συμμορφώνονται με όλους τους σχετικούς κανονισμούς. Οι περιβαλλοντικοί νόμοι, ειδικότερα, διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στη διαμόρφωση της δομής και των διαδικασιών των αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου, καθώς επιβάλλουν συγκεκριμένες απαιτήσεις για τη διάθεση προϊόντων, την ανακύκλωση και τη διαχείριση απορριμμάτων (Ευρωπαϊκή Επιτροπή, 2020).

Μία από τις σημαντικότερες ρυθμιστικές προκλήσεις που αντιμετωπίζουν οι εταιρείες είναι η συμμόρφωση με τους νόμους για την εκτεταμένη ευθύνη παραγωγού

(EPR) στην οποία έγινε αναφορά προηγουμένως. Αυτοί οι νόμοι είναι ιδιαίτερα διαδεδομένοι στην Ευρωπαϊκή Ένωση, όπου οδηγίες όπως η οδηγία για τα απόβλητα ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (WEEE) και η οδηγία για τα οχήματα στο τέλος του κύκλου ζωής τους (ELV) ορίζουν ότι οι εταιρείες συλλέγουν και ανακυκλώνουν ένα ορισμένο ποσοστό των προϊόντων τους στο τέλος της ωφέλιμης ζωής τους (Ghisellini et al., 2016). Ενώ αυτοί οι κανονισμοί προάγουν τη βιωσιμότητα μειώνοντας τα απόβλητα και ενθαρρύνοντας την ανακύκλωση, επιβάλλουν επίσης σημαντικές οικονομικές και λειτουργικές επιβαρύνσεις στις επιχειρήσεις, ιδιαίτερα εκείνες σε βιομηχανίες με υψηλό κύκλο εργασιών προϊόντων.

Εκτός από τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς, οι εταιρείες πρέπει επίσης να διερευνούν νομικά ζητήματα που σχετίζονται με τη μεταφορά επικίνδυνων υλικών, το απόρρητο δεδομένων και το διεθνές εμπόριο. Για παράδειγμα, η μεταφορά επιστρεφόμενων αγαθών, ιδιαίτερα ηλεκτρονικών απορριμμάτων (e-waste), υπόκειται σε αυστηρούς κανονισμούς που διέπουν το χειρισμό, την αποθήκευση και την απόρριψη επικίνδυνων υλικών (Esenduran et al., 2017). Αυτοί οι κανονισμοί απαιτούν από τις εταιρείες να εφαρμόζουν συγκεκριμένα μέτρα ασφαλείας και να επενδύουν σε εξειδικευμένο εξοπλισμό, αυξάνοντας περαιτέρω το κόστος που σχετίζεται με τις αλυσίδες εφοδιασμού κλειστού βρόχου.

Το νομικό και ρυθμιστικό τοπίο περιπλέκεται περαιτέρω από το γεγονός ότι διαφορετικές χώρες και περιοχές έχουν διαφορετικές απαιτήσεις για ανάκτηση και ανακύκλωση προϊόντων. Για εταιρείες που δραστηριοποιούνται σε παγκόσμιες αγορές, αυτό σημαίνει συμμόρφωση με ένα σύνολο κανονισμών που μπορεί να είναι δύσκολο να πλοηγηθεί. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η έλλειψη εναρμόνισης μεταξύ διαφορετικών ρυθμιστικών πλαισίων μπορεί να δημιουργήσει εμπόδια στην αποτελεσματική λειτουργία συστημάτων κλειστού βρόχου (Guide & Van Wassenhove, 2009). Για παράδειγμα, μπορεί να ζητηθεί από μια εταιρεία να πληροί αυστηρότερα πρότυπα ανακύκλωσης στην Ευρωπαϊκή Ένωση από ό,τι στις Ηνωμένες Πολιτείες, οδηγώντας σε ασυνέπειες στις λειτουργίες κλειστού βρόχου σε διαφορετικές περιοχές.

2.8 Ευκαιρίες και στρατηγικές για την υιοθέτηση συστημάτων κλειστού βρόχου

2.8.1 Βελτιστοποίηση κόστους και αυξημένη απόδοση

Η υιοθέτηση των αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου (CLSCs) παρουσιάζει πολλές ευκαιρίες για τις εταιρείες να βελτιστοποιήσουν το κόστος και να αυξήσουν την αποδοτικότητα, συμβάλλοντας παράλληλα στους στόχους βιωσιμότητας. Η βελτιστοποίηση του κόστους σε συστήματα κλειστού βρόχου καθοδηγείται κυρίως από τη μείωση των απορριμμάτων, τη βελτιωμένη χρήση των πόρων και την ελαχιστοποίηση της προμήθειας πρώτων υλών. Ένα από τα πιο σημαντικά πλεονεκτήματα των συστημάτων κλειστού βρόχου είναι η ικανότητά τους να μειώνουν την εξάρτηση από πόρους. Με την ανάκτηση, την επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση υλικών από προϊόντα στο τέλος του κύκλου ζωής τους, οι εταιρείες μπορούν να μειώσουν σημαντικά το κόστος που σχετίζεται με την εξόρυξη και την επεξεργασία πρώτων υλών. Αυτή η προσέγγιση είναι ιδιαίτερα πολύτιμη σε βιομηχανίες όπου οι πρώτες ύλες είναι σπάνιες ή ακριβές, όπως οι τομείς των ηλεκτρονικών και της αυτοκινητοβιομηχανίας (Guide & Van Wassenhove, 2009).

Η μείωση των απορριμμάτων είναι μια θεμελιώδης πτυχή της βελτιστοποίησης του κόστους στα CLSC. Στις παραδοσιακές αλυσίδες εφοδιασμού, ένα σημαντικό ποσοστό υλικών απορρίπτεται ως απόβλητο σε διάφορα στάδια της παραγωγικής διαδικασίας. Τα συστήματα κλειστού βρόχου, ωστόσο, επιδιώκουν να ανακτήσουν αυτά τα υλικά και να τα επανενσωματώσουν στον κύκλο παραγωγής, μειώνοντας έτσι τον όγκο των απορριμμάτων και μειώνοντας το κόστος διάθεσης (Genovese et al., 2017). Επιπλέον, οι εταιρείες μπορούν να επιτύχουν εξοικονόμηση κόστους μειώνοντας την ποσότητα των απορριμμάτων που αποστέλλονται σε χώρους υγειονομικής ταφής, η οποία συχνά υπόκειται σε περιβαλλοντικούς κανονισμούς και τέλη. Το κόστος της διάθεσης αποβλήτων αποτελεί αυξανόμενη ανησυχία σε πολλούς κλάδους, ιδιαίτερα σε περιοχές όπου οι κυβερνήσεις έχουν εφαρμόσει αυστηρές πολιτικές διαχείρισης αποβλήτων. Με τη μείωση των απορριμμάτων, οι εταιρείες όχι μόνο μειώνουν το λειτουργικό τους κόστος αλλά και ευθυγραμμίζονται με τους

στόχους περιβαλλοντικής βιωσιμότητας, οι οποίοι μπορούν να βελτιώσουν τη φήμη και το ανταγωνιστικό τους πλεονέκτημα (Esenduran et al., 2017).

Εκτός από τη μείωση των απορριμμάτων, τα συστήματα κλειστού βρόχου επιτρέπουν στις εταιρείες να βελτιστοποιούν τη χρήση των πόρων. Σε ένα CLSC, οι εταιρείες μπορούν να ανακτήσουν πολύτιμα υλικά από μεταχειρισμένα προϊόντα, όπως μέταλλα, πλαστικά και ηλεκτρονικά εξαρτήματα, τα οποία μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν στην κατασκευή νέων προϊόντων. Αυτή η διαδικασία μειώνει την ανάγκη για νέες εισροές πόρων και επιτρέπει στις εταιρείες να μεγιστοποιήσουν την αξία των υλικών που ήδη διαθέτουν (Ghisellini et al., 2016). Επιπλέον, η αποτελεσματική χρήση των πόρων σε συστήματα κλειστού βρόχου οδηγεί συχνά σε βελτιωμένες διαδικασίες παραγωγής, καθώς οι εταιρείες επιδιώκουν να ελαχιστοποιήσουν τα απόβλητα που παράγονται κατά την κατασκευή. Αυτό μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα χαμηλότερο κόστος παραγωγής, υψηλότερη απόδοση και καλύτερη ποιότητα προϊόντος, όλα οσα συμβάλλουν στη βελτιστοποίηση του κόστους.

Μια άλλη βασική στρατηγική για τη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας και την ελαχιστοποίηση του κόστους σε αλυσίδες εφοδιασμού κλειστού βρόχου είναι μέσω της βελτίωσης των διαδικασιών αντίστροφης εφοδιαστικής. Η αποτελεσματική αντίστροφη εφοδιαστική διασφαλίζει ότι τα επιστρεφόμενα προϊόντα συλλέγονται, ταξινομούνται και υποβάλλονται σε επεξεργασία με έγκαιρο και οικονομικά αποδοτικό τρόπο. Οι εταιρείες μπορούν να βελτιστοποιήσουν τις λειτουργίες αντίστροφης εφοδιαστικής επενδύοντας σε προηγμένα συστήματα παρακολούθησης και τεχνολογίες αυτοματισμού, που βοηθούν στον εξορθολογισμό της ροής των αγαθών μέσω της αλυσίδας εφοδιασμού και στη μείωση του κόστους που σχετίζεται με τις επιστροφές και την ανάκτηση προϊόντων (Bai & Sarkis, 2013). Επιπλέον, η συνεργασία με τρίτους παρόχους logistics μπορεί να βοηθήσει τις εταιρείες να διαχειριστούν την πολυπλοκότητα της αντίστροφης εφοδιαστικής ελαχιστοποιώντας ταυτόχρονα το κόστος που σχετίζεται με τη μεταφορά και την αποθήκευση (Genovese et al., 2017).

2.8.2 Εφαρμογή νέων τεχνολογιών

Η εφαρμογή νέων τεχνολογιών, όπως η τεχνητή νοημοσύνη (AI) και το blockchain, είναι μια άλλη βασική ευκαιρία για τη βελτιστοποίηση συστημάτων κλειστού βρόχου. Η τεχνητή νοημοσύνη μεταμορφώνει τον τρόπο με τον οποίο οι εταιρείες διαχειρίζονται τις αλυσίδες εφοδιασμού τους, επιτρέποντας πιο αποτελεσματική λήψη αποφάσεων και αυτοματοποίηση διαδικασιών. Σε ένα σύστημα κλειστού βρόχου, η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την πρόβλεψη των επιστροφών προϊόντων, τη βελτιστοποίηση της διαχείρισης αποθεμάτων και τη βελτίωση της ακρίβειας της ταξινόμησης και της επεξεργασίας των επιστρεφόμενων αγαθών (Saber et al., 2019).

Η τεχνολογία Blockchain είναι μια άλλη καινοτομία που μεταμορφώνει τις αλυσίδες εφοδιασμού κλειστού βρόχου βελτιώνοντας τη διαφάνεια και την ιχνηλασιμότητα. Το blockchain μπορεί επίσης να χρησιμοποιηθεί για την ενίσχυση της συνεργασίας μεταξύ των εταίρων της εφοδιαστικής αλυσίδας παρέχοντας μια κοινή πλατφόρμα για την παρακολούθηση της ροής των αγαθών και διασφαλίζοντας ότι όλοι οι ενδιαφερόμενοι έχουν πρόσβαση σε ακριβείς και ενημερωμένες πληροφορίες σχετικά με τις επιστροφές προϊόντων και τις διαδικασίες ανάκτησης (Esenduran et al., 2017). Αυτή η αυξημένη διαφάνεια μπορεί να οδηγήσει σε βελτιωμένη αποτελεσματικότητα, καθώς οι εταιρείες μπορούν να εντοπίσουν γρήγορα τα σημεία συμφόρησης στην αλυσίδα εφοδιασμού και να τα αντιμετωπίσουν πριν οδηγήσουν σε δαπανηρές καθυστερήσεις.

Ο συνδυασμός AI και blockchain παρουσιάζει σημαντικές ευκαιρίες για βελτιστοποίηση συστημάτων κλειστού βρόχου. Με την ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών, οι εταιρείες μπορούν να επιτύχουν προβολή σε πραγματικό χρόνο στις λειτουργίες της αλυσίδας εφοδιασμού τους και να λάβουν αποφάσεις βάσει δεδομένων που βελτιώνουν την αποτελεσματικότητα και μειώνουν το κόστος. Για παράδειγμα, η τεχνητή νοημοσύνη μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση δεδομένων από τα καθολικά blockchain για τον εντοπισμό προτύπων στις επιστροφές προϊόντων και τη βελτιστοποίηση της κατανομής των πόρων για διαδικασίες ανάκτησης και ανακύκλωσης (Saber et al., 2019). Επιπλέον, το blockchain μπορεί να χρησιμοποιηθεί

για την επαλήθευση της αυθεντικότητας των ανακτημένων υλικών, διασφαλίζοντας ότι πληρούν τα πρότυπα ποιότητας προτού επανενσωματωθούν στον κύκλο παραγωγής.

2.8.3 Εξερευνώντας νέες αγορές και επιχειρηματικά μοντέλα

Η εξερεύνηση νέων αγορών και επιχειρηματικών μοντέλων μέσω συστημάτων κλειστού βρόχου είναι μια άλλη βασική ευκαιρία για τις εταιρείες. Μια πολλά υποσχόμενη οδός είναι η ανακατασκευή και μεταπώληση αγαθών. Αυτό δημιουργεί νέες ροές εσόδων, ενώ μειώνει τα απόβλητα και παρατείνει τη διάρκεια ζωής των προϊόντων (Abbey et al., 2015).

Επιχειρηματικά μοντέλα που αξιοποιούν την ανακύκλωση αναδεικνύονται επίσης ως βιώσιμες στρατηγικές εντός των αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου. Οι εταιρείες βρίσκουν ολοένα και περισσότερο τρόπους για να αποσπάσουν αξία από προϊόντα στο τέλος του κύκλου ζωής τους, ανακυκλώνοντας τα συστατικά και τα υλικά τους. (Abbey & Guide, 2018). Αυτό μειώνει την ανάγκη για δαπανηρές και επιβλαβείς για το περιβάλλον εργασίες εξόρυξης και βοηθά επίσης τις εταιρείες να εξασφαλίσουν μια σταθερή προμήθεια κρίσιμων υλικών. Ομοίως, η βιομηχανία της μόδας εξερευνά μοντέλα κλειστού βρόχου όπου συλλέγονται παλιά ρούχα, επεξεργάζονται και μετατρέπονται σε νέα υφάσματα, μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της παραγωγής κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων.

2.8.4 Συνεργασία με προμηθευτές και πελάτες για ανάκτηση προϊόντων

Η συνεργασία με προμηθευτές και πελάτες είναι ζωτικής σημασίας για την αποτελεσματική ανάκτηση προϊόντων και την επιτυχία των συστημάτων κλειστού βρόχου. Σε πολλές περιπτώσεις, οι επιστροφές προϊόντων και η ανακύκλωση εξαρτώνται από συντονισμένες προσπάθειες μεταξύ διαφόρων ενδιαφερομένων στην αλυσίδα εφοδιασμού. Για παράδειγμα, οι προμηθευτές πρέπει να συνεργάζονται στενά με τους κατασκευαστές για να σχεδιάσουν προϊόντα που είναι εύκολο να

αποσυναρμολογηθούν και να ανακυκλωθούν στο τέλος του κύκλου ζωής τους (Guide & Van Wassenhove, 2009). Αυτό απαιτεί συνεργασία στη φάση του σχεδιασμού, όπου τόσο οι περιβαλλοντικοί όσο και οι λειτουργικοί παράγοντες ενσωματώνονται στην ανάπτυξη του προϊόντος. Τα προϊόντα που έχουν σχεδιαστεί με γνώμονα την ανάκτηση όχι μόνο είναι πιο εύκολο να ανακαινιστούν και να ανακυκλωθούν, αλλά τείνουν επίσης να έχουν μεγαλύτερο κύκλο ζωής, γεγονός που συμβάλλει περαιτέρω στη βιωσιμότητα.

Η συνεργασία των πελατών είναι εξίσου σημαντική στη διαδικασία ανάκτησης. Η αποτελεσματική επικοινωνία με τους πελάτες σχετικά με το πώς και πού να επιστρέψουν τα προϊόντα είναι απαραίτητη για τη διασφάλιση μιας σταθερής ροής αγαθών πίσω στην αλυσίδα εφοδιασμού (Zhu et al., 2012). Πολλές εταιρείες έχουν αναπτύξει προγράμματα επιστροφής που δίνουν κίνητρα στους πελάτες να επιστρέψουν μεταχειρισμένα προϊόντα με αντάλλαγμα εκπτώσεις ή άλλες ανταμοιβές. Αυτά τα προγράμματα συμβάλλουν στην αύξηση του όγκου των επιστροφών προϊόντων, γεγονός που με τη σειρά του επιτρέπει στις εταιρείες να μεγιστοποιήσουν την αξία των ανακτημένων υλικών. Επιπλέον, η δημιουργία βολικών καναλιών επιστροφής, όπως τοποθεσίες παράδοσης ή συνεργασίες με τρίτους παρόχους logistics, μπορεί να εξορθολογίσει περαιτέρω τη διαδικασία αντίστροφης εφοδιαστικής (Govindan et al., 2015). Η διασφάλιση ότι οι πελάτες γνωρίζουν και συμμετέχουν στη διαδικασία ανάκτησης είναι ζωτικής σημασίας για την επιτυχία των CLSC, καθώς επιτρέπει την απρόσκοπτη ροή των υλικών πίσω στον κύκλο παραγωγής.

3. Μεθοδολογία έρευνας

3.1 Εισαγωγή

Μια ολοκληρωμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση είναι μια μεθοδολογική προσέγγιση που χρησιμοποιείται για τη σύνθεση υπάρχουσας έρευνας για ένα συγκεκριμένο θέμα, παρέχοντας μια πλήρη κατανόηση της τρέχουσας κατάστασης του πεδίου, εντοπίζοντας κενά γνώσης και προτείνοντας μελλοντικές κατευθύνσεις έρευνας. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα πολύτιμη στο πλαίσιο των αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου (CLSCs), όπου πολλά διασυνδεδεμένα θέματα, όπως η αντίστροφη εφοδιαστική, η βιωσιμότητα, η ψηφιοποίηση και οι αρχές της κυκλικής οικονομίας, πρέπει να διερευνηθούν συστηματικά.

3.2 Πεδίο και σκοπός της ανασκόπησης

Ο σκοπός αυτής της βιβλιογραφικής ανασκόπησης είναι να αναλύσει και να συνθέσει την ακαδημαϊκή έρευνα που σχετίζεται με την εφαρμογή και τη διαχείριση των CLSC. Αυτή η ανασκόπηση παρέχει μια θεωρητική βάση για την κατανόηση των βασικών στοιχείων και των προκλήσεων των CLSC και θα εντοπίσει αποτελεσματικές στρατηγικές και μοντέλα για τη βελτιστοποίηση της απόδοσης της εφοδιαστικής αλυσίδας. Οι ειδικοί τομείς εστίασης περιλαμβάνουν:

- ✓ Reverse Logistics Optimization: Διερεύνηση μοντέλων και στρατηγικών βελτιστοποίησης για τη διαχείριση της ροής επιστροφής προϊόντων, εστιάζοντας στη μεταφορά, τη διαχείριση αποθεμάτων και την επεξεργασία.
- ✓ Αξιολόγηση βιωσιμότητας και περιβαλλοντικών επιπτώσεων: Διερεύνηση μεθοδολογιών για την αξιολόγηση και τη βελτίωση της περιβαλλοντικής απόδοσης των CLSCs.

- ✓ Ενοποίηση κυκλικής οικονομίας: Εξέταση του τρόπου με τον οποίο τα CLSC μπορούν να ευθυγραμμιστούν με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας για τη βελτίωση της αποδοτικότητας των πόρων.
- ✓ Ψηφιοποίηση και βιομηχανία 4.0: Ανάλυση του ρόλου των ψηφιακών τεχνολογιών στην ενίσχυση της αποτελεσματικότητας και της διαφάνειας των CLSC.
- ✓ Οικονομικές και χρηματοοικονομικές πτυχές: Αναφορά στην οικονομική σκοπιμότητα και τις επιπτώσεις στο κόστος της εφαρμογής CLSC.
- ✓ Σχεδιασμός Δικτύου CLSC: Διερεύνηση πτυχών σχεδιασμού δικτύου για βελτιστοποίηση τόσο της μπροστινής όσο και της αντίστροφης εφοδιαστικής.
- ✓ Product Recovery and Remanufacturing: Μελέτη στρατηγικών για αποτελεσματικές διαδικασίες ανάκτησης και ανακατασκευής προϊόντων.
- ✓ Συντονισμός: Εξέταση των ρόλων των διαφόρων ενδιαφερομένων και των μηχανισμών συνεργασίας σε CLSCs.
- ✓ Διαχείριση Κινδύνων: Διερεύνηση στρατηγικών εντοπισμού κινδύνου και μετριασμού ειδικών για CLSC.
- ✓ Καινοτομία και Υιοθέτηση Τεχνολογίας: Κατανόηση του ρόλου των αναδυόμενων τεχνολογιών στη βελτίωση της απόδοσης του CLSC.

3.3 Η μέθοδος PRISMA

Η μέθοδος PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) παρέχει μια δομημένη και διαφανή προσέγγιση για τη διεξαγωγή συστηματικών ανασκοπήσεων. Εξασφαλίζει τη συμπερίληψη σχετικών μελετών διατηρώντας παράλληλα υψηλό επίπεδο αυστηρότητας. Αυτή η μέθοδος είναι ιδιαίτερα αποτελεσματική για τη σύνθεση μεγάλου όγκου βιβλιογραφίας σε πολύπλοκα πεδία όπως οι αλυσίδες εφοδιασμού κλειστού βρόχου (CLSCs), όπου διασταυρώνονται διάφορα θέματα όπως η αντίστροφη εφοδιαστική, η βιωσιμότητα και η ψηφιοποίηση. Σε αυτό το πλαίσιο, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος PRISMA για τον εντοπισμό και την επιλογή σχετικών μελετών από τρεις κύριες βάσεις δεδομένων: ScienceDirect, Google Scholar και ResearchGate, με αποτέλεσμα την τελική συμπερίληψη 96 εργασιών υψηλής ποιότητας με κριτές.

Η μέθοδος PRISMA περιλαμβάνει τέσσερα βασικά στάδια: αναγνώριση, έλεγχος, επιλεξιμότητα και ένταξη. Αυτή η συστηματική προσέγγιση διασφαλίζει ότι η διαδικασία αναθεώρησης είναι περιεκτική και αμερόληπτη, καταγράφοντας τις πιο σχετικές και αποτελεσματικές μελέτες στον τομέα.

1. Αναγνώριση. Στο στάδιο της αναγνώρισης, αναπτύχθηκε μια ολοκληρωμένη στρατηγική αναζήτησης για την ανάκτηση σχετικών μελετών από τις επιλεγμένες βάσεις δεδομένων: ScienceDirect, Google Scholar και ResearchGate. Οι λέξεις-κλειδιά επιλέχθηκαν προσεκτικά για να καλύψουν ένα ευρύ φάσμα θεμάτων εντός των CLSC, όπως "αλυσίδα εφοδιασμού κλειστού βρόχου", "βελτιστοποίηση αντίστροφης εφοδιαστικής", "αξιολόγηση βιωσιμότητας", "ολοκλήρωση κυκλικής οικονομίας", "Βιομηχανία 4.0 στις αλυσίδες εφοδιασμού", "οικονομικές πτυχές του CLSC», «ανάκτηση προϊόντος» και «διαχείριση κινδύνου στις αλυσίδες εφοδιασμού». Οι τελεστές Boolean χρησιμοποιήθηκαν για τη βελτίωση της αναζήτησης, διασφαλίζοντας ότι περιλαμβάνονται όλες οι σχετικές παραλλαγές των όρων. Η αρχική αναζήτηση απέδωσε συνολικά 320 μελέτες και από τις τρεις βάσεις δεδομένων: 200 από το ScienceDirect, 50 από το Google Scholar και 70 από το ResearchGate. Αυτή η εκτεταμένη αρχική συλλογή μελετών παρείχε ένα ολοκληρωμένο σημείο εκκίνησης για την ανασκόπηση, διασφαλίζοντας ότι δεν αγνοήθηκε κανένα σημαντικό κομμάτι της έρευνας.

2. Διαλογή. Το στάδιο της εξέτασης περιλάμβανε μια αρχική ανασκόπηση των τίτλων και των περιλήψεων των 320 μελετών που προσδιορίστηκαν. Ο πρωταρχικός στόχος σε αυτό το στάδιο ήταν να αποκλειστούν μελέτες που ήταν σαφώς άσχετες με τα ερευνητικά ερωτήματα, όπως αυτές που επικεντρώθηκαν σε θέματα που δεν σχετίζονται με την αλυσίδα εφοδιασμού ή εκείνων που δεν σχετίζονται με το πλαίσιο κλειστού βρόχου. Μετά από αυτόν τον προκαταρκτικό έλεγχο, 180 μελέτες βρέθηκαν να είναι δυνητικά σχετικές. Αυτές οι μελέτες υποβλήθηκαν στη συνέχεια σε πιο λεπτομερή έλεγχο με βάση προκαθορισμένα κριτήρια ένταξης και αποκλεισμού. Κριτήρια συμπερίληψης ήταν ότι οι μελέτες πρέπει να έχουν αξιολογηθεί, να δημοσιεύονται τα τελευταία 10 χρόνια με ελάχιστες εξαιρέσεις και να αφορούν συγκεκριμένα μία ή περισσότερες πτυχές των CLSC. Τα κριτήρια αποκλεισμού περιλάμβαναν εργασίες συνεδρίων χωρίς επαρκές εμπειρικό ή θεωρητικό βάθος, άρθρα μη διαθέσιμα σε πλήρες κείμενο και μελέτες που επικεντρώνονται αποκλειστικά

στις προς τα εμπρός αλυσίδες εφοδιασμού χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι πτυχές της αντίστροφης εφοδιαστικής ή της βιωσιμότητας. Αυτή η φάση είχε ως αποτέλεσμα τον αποκλεισμό 20 μελετών, αφήνοντας 160 μελέτες για περαιτέρω αξιολόγηση.

3. Επιλεξιμότητα. Το στάδιο επιλεξιμότητας περιλάμβανε ανασκόπηση πλήρους κειμένου των υπόλοιπων 160 μελετών για την πιο αυστηρή αξιολόγηση της συνάφειας και της ποιότητάς τους. Κάθε μελέτη αξιολογήθηκε με βάση τη συμβολή της στην κατανόηση της δυναμικής του CLSC, την ευρωστία της μεθοδολογίας της και τη συνάφεια των ευρημάτων της με τα ερευνητικά ερωτήματα που τέθηκαν. Μελέτες που δεν παρείχαν επαρκή εμπειρικά στοιχεία ή θεωρητική θεμελίωση αποκλείστηκαν. Αυτή η ενδεδειγμένη αξιολόγηση οδήγησε στον αποκλεισμό επιπλέον 64 μελετών, οι οποίες είτε απέτυχαν να ανταποκριθούν στην απαιτούμενη μεθοδολογική αυστηρότητα είτε δεν αντιμετώπισαν άμεσα τα ερευνητικά ερωτήματα. Κατά συνέπεια, 96 μελέτες κρίθηκαν κατάλληλες για συμπερίληψη στην τελική αναθεώρηση, αποτελούμενες από 50 από το ScienceDirect, 35 από το Google Scholar και 11 από το ResearchGate.

4. Ένταξη. Στο τελικό στάδιο ένταξης, οι επιλεγμένες 96 μελέτες οργανώθηκαν σύμφωνα με τα συγκεκριμένα θέματα που περιγράφονται στα ερευνητικά ερωτήματα, όπως η βελτιστοποίηση αντίστροφης εφοδιαστικής, η αξιολόγηση βιωσιμότητας και η ψηφιοποίηση σε CLSCs. Αυτή η θεματική κατηγοριοποίηση διευκόλυνε μια δομημένη σύνθεση της βιβλιογραφίας, επιτρέποντας μια ολοκληρωμένη κατανόηση της κάθε περιοχής και της τρέχουσας κατάστασής της. έρευνα.

Η εφαρμογή της μεθόδου PRISMA εξασφάλισε ότι η διαδικασία αναθεώρησης ήταν διαφανής, επαναλήψιμη και συστηματική. Παρείχε ένα σαφές πλαίσιο για την επιλογή μελετών υψηλής ποιότητας που σχετίζονται άμεσα με τους ερευνητικούς στόχους. Αυτή η αυστηρή προσέγγιση ελαχιστοποίησε την προκατάληψη και ενίσχυσε την αξιοπιστία της αναθεώρησης, συμβάλλοντας τελικά σε μια πιο ισχυρή σύνθεση της υπάρχουσας γνώσης για τις αλυσίδες εφοδιασμού κλειστού βρόχου.

4. Τα αποτελέσματα της ανάλυσης

4.1 Βελτιστοποίηση αντίστροφης εφοδιαστικής σε εφοδιαστικές αλυσίδες κλειστού βρόχου

Η βελτιστοποίηση της αντίστροφης εφοδιαστικής εντός των αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου (closed-loop supply chains, CLSCs) έχει αναδειχθεί ως κρίσιμος τομέας έρευνας, με γνώμονα την ανάγκη ενίσχυσης της βιωσιμότητας, της κερδοφορίας και της λειτουργικής αποτελεσματικότητας. Αυτό το σύνολο της βιβλιογραφίας δίνει έμφαση σε διάφορες στρατηγικές και μεθοδολογίες που στοχεύουν στη βελτιστοποίηση της συλλογής, της ανακύκλωσης, της ανακατασκευής και της απόρριψης των επιστρεφόμενων προϊόντων για τη δημιουργία αξίας ελαχιστοποιώντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις.

Ένα επαναλαμβανόμενο θέμα στη βελτιστοποίηση της αντίστροφης εφοδιαστικής είναι η ενσωμάτωση βιώσιμων πρακτικών στην αλυσίδα εφοδιασμού για την αντιμετώπιση των περιβαλλοντικών ανησυχιών που σχετίζονται με τη διαχείριση αποβλήτων και τη χρήση των πόρων. Οι μελέτες υπογραμμίζουν τη σημασία της ανάπτυξης ισχυρών πλαισίων που ενσωματώνουν τόσο οικονομικούς όσο και περιβαλλοντικούς παράγοντες στη λήψη αποφάσεων αντίστροφης εφοδιαστικής. Για παράδειγμα, οι ερευνητές έχουν προτείνει μοντέλα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων που εξισορροπούν τους στόχους κόστους, ποιότητας και βιωσιμότητας στα CLSC, προτείνοντας ότι η αποτελεσματική διαχείριση της αντίστροφης εφοδιαστικής μπορεί να μειώσει σημαντικά τα απόβλητα και να ενισχύσει την ανθεκτικότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας (Cannella, Bruccoleri, & Framinan, 2016; Kangi et al., 2024).

Η έννοια της βιώσιμης ποιότητας υπηρεσιών αντίστροφης εφοδιαστικής (sustainable reverse logistics service quality, SRLSQ) έχει διερευνηθεί για να καθιερωθεί μια ολοκληρωμένη κατανόηση του τρόπου με τον οποίο η ποιότητα υπηρεσιών επηρεάζει την απόδοση της αντίστροφης εφοδιαστικής. Η ενσωμάτωση της βιωσιμότητας σε πλαίσια ποιότητας υπηρεσιών αντίστροφης εφοδιαστικής, όπως διερευνήθηκε από τους Dabees et al. (2023), υπογραμμίζει τη σημασία της ανάπτυξης

μετρήσεων ποιότητας υπηρεσιών που αντικατοπτρίζουν την προσέγγιση της τριπλής κατώτατης γραμμής. Αυτές οι μελέτες αποκαλύπτουν ένα κενό γνώσης στην ποσοτικοποίηση του αντίκτυπου των διαδικασιών αντίστροφης εφοδιαστικής στην ικανοποίηση των πελατών και τον λειτουργικό κίνδυνο, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες. Αυτό υποδηλώνει ότι η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να επικεντρωθεί στους λειτουργικούς κινδύνους και στα αποτελέσματα των πελατών που σχετίζονται με βιώσιμες πρακτικές αντίστροφης εφοδιαστικής σε αυτές τις περιοχές.

Η βελτιστοποίηση στην αντίστροφη εφοδιαστική περιλαμβάνει επίσης τη βελτίωση της αποτελεσματικότητας των υλικοτεχνικών διαδικασιών, όπως η συλλογή και η μεταφορά. Διάφορες μελέτες έχουν επικεντρωθεί στη βελτιστοποίηση των δικτύων logistics μέσω καινοτόμων στρατηγικών όπως το cross-docking και η δρομολόγηση οχημάτων. Αυτές οι στρατηγικές στοχεύουν στη μείωση του κόστους μεταφοράς και στη βελτίωση των επιπέδων εξυπηρέτησης μέσω της αποτελεσματικής διαχείρισης της ροής των επιστρεφόμενων προϊόντων. Οι Kangi et al. (2024) τονίζουν τη χρήση μοντέλων μεικτού ακέραιου γραμμικού προγραμματισμού (mixed-integer linear programming, MILP) σε συνδυασμό με αλγόριθμους για τη βελτιστοποίηση δικτύων CLSC πολλαπλών κλιμακίων, πολλαπλών προϊόντων. Η εφαρμογή αυτών των μοντέλων σε σενάρια πραγματικού κόσμου καταδεικνύει τις δυνατότητές τους να επιτύχουν σχεδόν βέλτιστες λύσεις με ελάχιστες αποκλίσεις, παρέχοντας έτσι πρακτικές γνώσεις για τη διαχείριση πολύπλοκων δικτύων αντίστροφης εφοδιαστικής.

Μία από τις κρίσιμες προκλήσεις στην αντίστροφη εφοδιαστική είναι η αβεβαιότητα που σχετίζεται με την ποιότητα και την ποσότητα των επιστρεφόμενων προϊόντων. Αυτή η αβεβαιότητα περιπλέκει τη διαχείριση αποθεμάτων, τον προγραμματισμό παραγωγής και το σχεδιασμό του δικτύου. Οι ερευνητές έχουν αναπτύξει διάφορες προσεγγίσεις για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, όπως η χρήση στοχαστικού προγραμματισμού που βασίζεται σε σενάρια και ισχυρών τεχνικών βελτιστοποίησης. Αυτές οι μεθοδολογίες επιτρέπουν στις αλυσίδες εφοδιασμού να παραμείνουν ανθεκτικές και προσαρμοστικές υπό κυμαινόμενες συνθήκες απόδοσης και ζήτησης (Amin & Zhang, 2013; Prajapati, Kant, & Shankar, 2019). Τα ευρήματα υποδηλώνουν ότι η ενσωμάτωση της αβεβαιότητας σε μοντέλα αντίστροφης εφοδιαστικής είναι απαραίτητη για τη διατήρηση των επιπέδων εξυπηρέτησης και την ελαχιστοποίηση του κόστους στα CLSC.

Οι αποφάσεις διάθεσης, οι οποίες καθορίζουν την τύχη των επιστρεφόμενων προϊόντων, είναι μια άλλη κρίσιμη πτυχή της βελτιστοποίησης της αντίστροφης εφοδιαστικής. Οι αποτελεσματικές στρατηγικές διάθεσης, όπως η επισκευή, η ανακαίνιση, η ανακατασκευή και η ανακύκλωση, διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στην ενίσχυση της κερδοφορίας και της βιωσιμότητας των λειτουργιών αντίστροφης εφοδιαστικής. Η επιλογή μιας κατάλληλης στρατηγικής διάθεσης επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως η ποιότητα του προϊόντος, οι συνθήκες της αγοράς και οι περιβαλλοντικοί κανονισμοί. Οι Agrawal, Singh και Murtaza (2016) χρησιμοποιούν μια προσέγγιση θεωρίας γραφημάτων και πινάκων για να αναπτύξουν ένα πλαίσιο απόφασης διάθεσης που βοηθά στην ιεράρχηση των επιλογών διάθεσης με βάση συγκεκριμένα κριτήρια. Τα ευρήματά τους υποδεικνύουν ότι μια στρατηγική προσέγγιση στις αποφάσεις διάθεσης μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την αποτελεσματικότητα των λειτουργιών αντίστροφης εφοδιαστικής, ιδιαίτερα σε αναπτυσσόμενες οικονομίες όπου αυτές οι διαδικασίες εξακολουθούν να εξελίσσονται.

Επιπλέον, ο ρόλος των τρίτων παρόχων αντίστροφης εφοδιαστικής (third-party reverse logistics providers, 3PRLPs) έχει επισημανθεί ως βασικός παράγοντας για τη διαχείριση πολύπλοκων δικτύων αντίστροφης εφοδιαστικής. Οι Abdel-Basset et al. (2021) εισάγουν ένα πλαίσιο λήψης αποφάσεων πολλαπλών κριτηρίων (multi-criteria decision-making, MCDM) για την αξιολόγηση και την επιλογή βιώσιμων 3PRLPs, ενσωματώνοντας περιβαλλοντικούς, κοινωνικούς και οικονομικούς παράγοντες. Αυτή η προσέγγιση διασφαλίζει ότι οι επιλεγμένοι πάροχοι ευθυγραμμίζονται με τους στρατηγικούς στόχους του CLSC, ενισχύοντας έτσι τη συνολική απόδοση. Η μελέτη τονίζει την ανάγκη για ισχυρές μεθόδους MCDM που μπορούν να χειριστούν την εγγενή αβεβαιότητα και ποιοτικά δεδομένα που σχετίζονται με αντίστροφα σενάρια εφοδιαστικής.

Η βελτιστοποίηση της αντίστροφης εφοδιαστικής δεν αφορά μόνο τη λειτουργική αποτελεσματικότητα αλλά και τη στρατηγική ευθυγράμμιση με ευρύτερους στόχους βιωσιμότητας. Αυτό περιλαμβάνει την ενοποίηση πρακτικών πράσινων logistics και την υιοθέτηση αρχών κυκλικής οικονομίας. Για παράδειγμα, οι Richnák και Gubová (2021) διερευνούν την υιοθέτηση πρακτικών πράσινων logistics στη Σλοβακία, αποκαλύπτοντας ότι ενώ οι μεγάλες επιχειρήσεις στον τομέα της αυτοκινητοβιομηχανίας πρωτοστατούν, οι οικονομικοί περιορισμοί παραμένουν

σημαντικό εμπόδιο για την ευρύτερη υιοθέτηση. Αυτό υπογραμμίζει την ανάγκη για πλαίσια πολιτικής και οικονομικά κίνητρα για τη στήριξη της μετάβασης σε βιώσιμες πρακτικές εφοδιαστικής.

Ένας άλλος σημαντικός τομέας εστίασης είναι η χρήση προηγμένων τεχνολογιών για τη βελτίωση της αποδοτικότητας και της αποτελεσματικότητας των λειτουργιών αντίστροφης εφοδιαστικής. Η υιοθέτηση τεχνολογιών Industry 4.0, όπως το IoT, το blockchain και η ανάλυση μεγάλων δεδομένων, μεταμορφώνει την αντίστροφη εφοδιαστική βελτιώνοντας τη διαφάνεια, την ιχνηλασιμότητα και τις δυνατότητες λήψης αποφάσεων. Μελέτες όπως αυτές των Tosarkani και Amin (2018) και Bakajic et al. (2022) έχουν δείξει ότι η ενσωμάτωση αυτών των τεχνολογιών σε διαδικασίες αντίστροφης εφοδιαστικής μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τον συντονισμό και την απόδοση των CLSC. Ωστόσο, η εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών απαιτεί μια στρατηγική προσέγγιση που να ευθυγραμμίζεται με τις συγκεκριμένες ανάγκες και δυνατότητες της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Τέλος, το ανθρώπινο στοιχείο στην αντίστροφη εφοδιαστική δεν πρέπει να αγνοηθεί. Η δέσμευση πόρων και η ανάπτυξη βιώσιμων ικανοτήτων αντίστροφης εφοδιαστικής είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη μακροπρόθεσμης επιτυχίας. Οι Morgan et al. (2018) υπογραμμίζουν τη σημασία της δέσμευσης πόρων για την οικοδόμηση βιώσιμων ικανοτήτων αντίστροφης εφοδιαστικής, υποδηλώνοντας ότι οι εταιρείες πρέπει να διαθέσουν επαρκείς πόρους για να αναπτύξουν αυτές τις δυνατότητες και να τις ενσωματώσουν σε ευρύτερες στρατηγικές διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας. Η μελέτη δείχνει ότι μια ισχυρή δέσμευση για βιώσιμες πρακτικές στην αντίστροφη εφοδιαστική μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές βελτιώσεις στις λειτουργικές επιδόσεις και στην ικανοποίηση των πελατών.

Συνοπτικά, η βελτιστοποίηση της αντίστροφης εφοδιαστικής σε αλυσίδες εφοδιασμού κλειστού βρόχου περιλαμβάνει μια πολύπλευρη προσέγγιση που ενσωματώνει τη λειτουργική αποτελεσματικότητα, τη βιωσιμότητα και τη στρατηγική ευθυγράμμιση. Οι βασικές στρατηγικές περιλαμβάνουν την ανάπτυξη ισχυρών μοντέλων βελτιστοποίησης που εξηγούν την αβεβαιότητα, την εφαρμογή αποτελεσματικών αποφάσεων διάθεσης, την αξιοποίηση τρίτων παρόχων logistics, την υιοθέτηση προηγμένων τεχνολογιών και τη διασφάλιση δέσμευσης πόρων σε

πρωτοβουλίες βιωσιμότητας. Ο επόμενος πίνακας περιλαμβάνει μια σύνοψη των ερευνών που μελετήθηκαν

Πίνακας 1. Οι έρευνες για την βελτιστοποίηση αντίστροφης εφοδιαστικής σε εφοδιαστικές αλυσίδες κλειστού βρόχου

Συγγραφέας	Μεθοδολογία	Αποτελέσματα
Dabees et al. (2023)	Συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση χρησιμοποιώντας το πλαίσιο PRISMA, με επίκεντρο τη βιώσιμη ποιότητα υπηρεσιών αντίστροφης εφοδιαστικής (SRLSQ) από το 2011-2022.	Προσδιόρισε ένα κενό γνώσης στην ποσοτικοποίηση του αντίκτυπου των διαδικασιών αντίστροφης εφοδιαστικής στην ικανοποίηση των πελατών και τον λειτουργικό κίνδυνο, ιδιαίτερα στις αναπτυσσόμενες χώρες.
Cannella, Bruccoleri, & Framinan (2016)	Συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση και μαθηματική μοντελοποίηση χρησιμοποιώντας εξισώσεις διαφοράς για την προσομοίωση διαφόρων συνθηκών της αγοράς.	Τα CLSC ξεπερνούν τις παραδοσιακές αλυσίδες εφοδιασμού. Η μείωση του χρόνου παράδοσης της ανακατασκευής και η ενίσχυση της διαφάνειας των πληροφοριών μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση του CLSC.
Kangi et al. (2024)	Μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού μικτού ακέραιου (MILP) σε συνδυασμό με αλγόριθμους NPGA και MOPSO. Επικυρώθηκε με τη μέθοδο ε-περιορισμού.	Επιτεύχθηκαν σχεδόν βέλτιστες λύσεις με απόκλιση μικρότερη από 3%. Η ανάλυση ευαισθησίας έδειξε ότι οι διακυμάνσεις της ζήτησης και τα ποσοστά απόδοσης επηρεάζουν σημαντικά το κόστος CLSC.
Prajapati, Kant, & Shankar (2019)	Ολοκληρωμένη βιβλιογραφική ανασκόπηση 449 άρθρων, χρησιμοποιώντας ανάλυση περιεχομένου και	Προσδιόρισε 11 διακριτά θέματα στην έρευνα αντίστροφης εφοδιαστικής. Βρέθηκε εστίαση σε ποσοτικά μοντέλα και αλγόριθμους, με έλλειψη ποιοτικών

	απαγωγική ερευνητική προσέγγιση.	αξιολογήσεων και περιπτώσιολογικών μελετών για τον κλάδο.
Agrawal, Singh, & Murtaza (2016)	Θεωρία γραφημάτων και προσέγγιση πινάκων χρησιμοποιώντας μια μελέτη περίπτωσης από μια εταιρεία κατασκευής κινητών στην Ινδία. Παρουσιάστηκε ένας «Δείκτης Διάθεσης» που υπολογίζεται με ένα πρόγραμμα C++.	Η επισκευή και η μεταπώληση επιστρεφόμενων προϊόντων βρέθηκε να είναι η πιο βιώσιμη επιλογή υπό τις τρέχουσες συνθήκες της αγοράς στην Ινδία. Η ανακύκλωση προτιμήθηκε από την ανακατασκευή.
Richnák & Gubová (2021)	Συνδυασμός περιγραφικών και συμπερασματικών στατιστικών βάσει δεδομένων ερευνών από εταιρείες της Σλοβακίας.	Οι μεγάλες μεταποιητικές επιχειρήσεις κυριαρχούν στις πράσινες και αντίστροφες πρακτικές εφοδιαστικής στη Σλοβακία, ενσωματώνοντας πρωτίτως τις περιβαλλοντικές πολιτικές στις διαδικασίες αποθήκευσης. Οι οικονομικοί περιορισμοί είναι το κύριο εμπόδιο για την ευρύτερη υιοθέτηση.
Abdel-Basset et al. (2021)	Υβριδικό πλαίσιο MCDM που ενσωματώνει AHP και TOPSIS, επικυρωμένο με μια μελέτη περίπτωσης από τη βιομηχανία κατασκευής ανταλλακτικών αυτοκινήτων της Αιγύπτου.	Οι κοινωνικοί, περιβαλλοντικοί παράγοντες και παράγοντες κινδύνου και ασφάλειας ήταν οι πιο σημαντικοί καθοριστικοί παράγοντες για την επιλογή βιώσιμων 3PRLP. Το προτεινόμενο μοντέλο έδειξε ανθεκτικότητα στην απόκριση σε αλλαγές βάρους και αβεβαιότητα δεδομένων.
Tosarkani & Amin (2018)	Μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού πολλαπλών στόχων μεικτού ακέραιου (MILP) ενσωματωμένο με τη διαδικασία ασαφούς αναλυτικής δικτύου (FANP) για τη διαμόρφωση δικτύου	Το μοντέλο παρήγαγε λύσεις χωρίς κυριαρχία που εξισορρόπησαν το κέρδος, τις πράσινες πρακτικές και την έγκαιρη παράδοση. Η ενσωμάτωση της ασαφούς λογικής αποτύπωσε αποτελεσματικά τις περιβαλλοντικές και λειτουργικές πολυπλοκότητες.

	ηλεκτρονικής αντίστροφης εφοδιαστικής (e-RL).	
Morgan, Tokman, Richey, & Defee (2018)	Έρευνα 180 επαγγελματιών της εφοδιαστικής αλυσίδας που αναλύθηκε χρησιμοποιώντας μοντελοποίηση δομικών εξισώσεων (SEM) για τη σύνδεση της δέσμευσης πόρων με τις βιώσιμες δυνατότητες αντίστροφης εφοδιαστικής.	Οι δεσμεύσεις πόρων για βιώσιμα αντίστροφα logistics βελτιώνουν σημαντικά τη λειτουργική απόδοση και μειώνουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι βιώσιμες δυνατότητες αντίστροφης εφοδιαστικής μεσολαβούν σε αυτά τα αποτελέσματα.
Stević et al. (2021)	Τροποποιημένο μοντέλο SERVQUAL-MCDM που συνδυάζει μεθόδους Delphi και FUCOM για την αξιολόγηση της ποιότητας των υπηρεσιών αντίστροφης εφοδιαστικής.	Η αντιληπτή ποιότητα υπηρεσιών υπολείπεται των προσδοκιών σε 12 από τις 21 δηλώσεις. Δύο δηλώσεις ξεπέρασαν τις προσδοκίες, υποδεικνύοντας τα δυνατά σημεία σε ορισμένους τομείς εξυπηρέτησης.

4.2 Αξιολόγηση βιωσιμότητας και περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε εφοδιαστικές αλυσίδες κλειστού βρόχου (CLSC)

Η εστίαση στη βιωσιμότητα και την εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε αλυσίδες εφοδιασμού κλειστού βρόχου (CLSCs) έχει ενταθεί καθώς οι οργανισμοί επιδιώκουν να ευθυγραμμίσουν τις δραστηριότητές τους με περιβαλλοντικούς στόχους διατηρώντας παράλληλα την οικονομική βιωσιμότητα. Τα CLSC είναι καθοριστικά για τη διευκόλυνση της μετάβασης σε μια κυκλική οικονομία ενσωματώνοντας διαδικασίες αντίστροφης εφοδιαστικής όπως η ανακύκλωση, η ανακατασκευή και η ανακαίνιση, οι οποίες συλλογικά μειώνουν την εξάρτηση από τις πρώτες ύλες και ελαχιστοποιούν τα απόβλητα (Georgiadis & Besiou, 2009; Winkler, 2011). Η βιβλιογραφία προτείνει ότι η βελτιστοποίηση αυτών των διαδικασιών μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τόσο την περιβαλλοντική όσο και την οικονομική απόδοση, καθώς τα αποτελεσματικά CLSC

μπορούν να μειώσουν την κατανάλωση πόρων, να μειώσουν τις εκπομπές και να δημιουργήσουν εξοικονόμηση κόστους μέσω ανάκτησης υλικών και μείωσης αποβλήτων (Gopal et al., 2023; Stindt & Sahamie, 2014).

Η υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών σε CLSC απαιτεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που περιλαμβάνει το σχεδιασμό ανθεκτικών δικτύων εφοδιαστικής αλυσίδας ικανών να χειρίζονται αβεβαιότητες όσον αφορά τις επιστροφές προϊόντων, τη ζήτηση και την ποιότητα των ανακυκλωμένων προϊόντων (Baghizadeh et al., 2021; Al-Refaie et al., 2021). Τα μοντέλα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων χρησιμοποιούνται συχνά για την εξισορρόπηση οικονομικών, περιβαλλοντικών και κοινωνικών στόχων, υπογραμμίζοντας την πολυπλοκότητα της επίτευξης βιωσιμότητας σε διαφορετικά βιομηχανικά πλαίσια. Αυτά τα μοντέλα συχνά ενσωματώνουν προηγμένες μαθηματικές τεχνικές για τον εντοπισμό βέλτιστων διαμορφώσεων για δραστηριότητες παραγωγής, διανομής και ανακύκλωσης, καταδεικνύοντας τις σημαντικές δυνατότητες των CLSC να συμβάλλουν στη βιώσιμη ανάπτυξη (Baghizadeh et al., 2021).

Επιπλέον, η εφαρμογή των CLSC σε διάφορους κλάδους, όπως τα ηλεκτρονικά, η αυτοκινητοβιομηχανία και τα καταναλωτικά αγαθά, αποκαλύπτει ότι είναι απαραίτητες προσαρμοσμένες προσεγγίσεις για την αντιμετώπιση προκλήσεων ανά τομέα. Για παράδειγμα, η βιομηχανία διεργασιών αντιμετωπίζει μοναδικούς ρυθμιστικούς και λειτουργικούς περιορισμούς που απαιτούν προσαρμοσμένα μοντέλα CLSC για την αποτελεσματική διαχείριση της αντίστροφης ροής των υλικών και τη συμμόρφωση με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς (Stindt & Sahamie, 2014). Ομοίως, οι βιομηχανίες με υψηλό κύκλο εργασιών και πολύπλοκες δομές προϊόντων, όπως τα ηλεκτρονικά, επωφελούνται από προηγμένες διαδικασίες ανάκτησης που δίνουν προτεραιότητα στην αποδοτική επαναχρησιμοποίηση υλικών και στην εξοικονόμηση ενέργειας (Georgiadis & Besiou, 2009).

Τα περιβαλλοντικά οφέλη των CLSCs εκτείνονται πέρα από τη μείωση των αποβλήτων και περιλαμβάνουν σημαντικές μειώσεις στις εκπομπές άνθρακα και την κατανάλωση ενέργειας. Μελέτες έχουν δείξει ότι η ενσωμάτωση πρακτικών πράσινων logistics, όπως η βελτιστοποίηση των διαδρομών μεταφοράς και η εφαρμογή ενεργειακά αποδοτικών διαδικασιών, μπορεί να ενισχύσει περαιτέρω τη βιωσιμότητα των CLSCs (Kangi et al., 2024; Gopal et al., 2023). Αυτές οι βελτιώσεις συχνά

υποστηρίζονται από τεχνολογικές καινοτομίες και ψηφιοποίηση, που επιτρέπουν την καλύτερη παρακολούθηση και διαχείριση των επιστρεφόμενων προϊόντων, αυξάνοντας έτσι τη διαφάνεια και την αποτελεσματικότητα στην εφοδιαστική αλυσίδα (Tosarkani & Amin, 2018).

Η βιωσιμότητα στα CLSC δεν καθοδηγείται μόνο από τη λειτουργική αποτελεσματικότητα αλλά και από τις ρυθμιστικές πιέσεις και τις προσδοκίες των καταναλωτών. Οι αυστηρότεροι περιβαλλοντικοί κανονισμοί και η αυξανόμενη ευαισθητοποίηση των καταναλωτών ώθησαν τις εταιρείες να υιοθετήσουν πιο βιώσιμες πρακτικές στις αλυσίδες εφοδιασμού τους. Αυτό περιλαμβάνει το σχεδιασμό προϊόντων που είναι πιο εύκολο να ανακυκλωθούν ή να ανακατασκευαστούν και να επενδύσουν σε τεχνολογίες που μειώνουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις αυτών των διαδικασιών (Winkler, 2011; Stindt & Sahamie, 2014). Επιπλέον, οι εταιρείες αναγνωρίζουν όλο και περισσότερο τη στρατηγική αξία μιας ισχυρής πράσινης εικόνας, η οποία μπορεί να ενισχύσει τη φήμη της επωνυμίας και την αφοσίωση των πελατών (Georgiadis & Besiou, 2009).

Ωστόσο, η εφαρμογή βιώσιμων CLSC δεν είναι χωρίς προκλήσεις. Η αβεβαιότητα στην ποιότητα και την ποσότητα των επιστρεφόμενων προϊόντων, σε συνδυασμό με τις κυμαινόμενες απαιτήσεις της αγοράς, περιπλέκει τον σχεδιασμό και την εκτέλεση των διαδικασιών αντίστροφης εφοδιαστικής (Baghizadeh et al., 2021; Al-Refai et al., 2021). Η αποτελεσματική διαχείριση αυτών των αβεβαιοτήτων είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της οικονομικής βιωσιμότητας των CLSC. Αυτό απαιτεί συχνά προηγμένα συστήματα υποστήριξης αποφάσεων που ενσωματώνουν δεδομένα σε πραγματικό χρόνο και προγνωστικά αναλυτικά στοιχεία για τη βελτιστοποίηση της ροής αγαθών και πόρων (Tosarkani & Amin, 2018).

Ο ρόλος της πολιτικής και των κυβερνητικών κινήτρων είναι επίσης σημαντικός για την προώθηση βιώσιμων πρακτικών στα CLSC. Τα ρυθμιστικά πλαίσια που επιβάλλουν την ανακύκλωση και την ανακατασκευή, μαζί με οικονομικά κίνητρα για εταιρείες που υιοθετούν πράσινες πρακτικές, μπορούν να οδηγήσουν στην υιοθέτηση μοντέλων βιώσιμης αλυσίδας εφοδιασμού (Wang et al., 2015). Σε αυτό το πλαίσιο, οι συμπράξεις δημόσιου και ιδιωτικού τομέα και οι συνεργατικές προσπάθειες σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού είναι απαραίτητες για την επίτευξη των επιθυμητών περιβαλλοντικών αποτελεσμάτων (Berning & Venter, 2015).

Συνολικά, η βιβλιογραφία δείχνει ότι η βελτιστοποίηση των CLSC για βιωσιμότητα απαιτεί μια πολύπλευρη προσέγγιση που ενσωματώνει οικονομικούς, περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς παράγοντες. Τα αποτελεσματικά CLSC όχι μόνο μειώνουν τα απόβλητα και την κατανάλωση πόρων, αλλά συμβάλλουν επίσης στην οικονομική απόδοση μιας εταιρείας μέσω της εξοικονόμησης κόστους και της ενισχυμένης φήμης της επωνυμίας. Η επίτευξη αυτών των αποτελεσμάτων απαιτεί τη χρήση προηγμένων τεχνικών μοντελοποίησης, προσαρμοσμένων προσεγγίσεων του κλάδου και υποστηρικτικών ρυθμιστικών πλαισίων. Καθώς η έρευνα συνεχίζει να εξελίσσεται, υπάρχει μια αυξανόμενη ανάγκη για ολοκληρωμένα μοντέλα που μπορούν να αντιμετωπίσουν την πολύπλοκη αλληλεπίδραση μεταξύ διαφόρων μετρήσεων βιωσιμότητας και λειτουργικών περιορισμών, υποστηρίζοντας τελικά τους ευρύτερους στόχους της βιώσιμης ανάπτυξης (Georgiadis & Besiou, 2009; Baghizadeh et al., 2021; Winkler, 2011).

Πίνακας 2. Οι έρευνες για την αξιολόγηση της βιωσιμότητας και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε εφοδιαστικές αλυσίδες κλειστού βρόχου

Συγγραφέας	Μεθοδολογία	Αποτελέσματα
Georgiadis & Besiou (2009)	Προσομοίωση δυναμικής συστήματος, που εφαρμόζεται σε ένα πραγματικό WEEE CLSC στην Ελλάδα. Επικυρώθηκε με χρήση εμπειρικών δεδομένων.	Οι αυστηρότεροι περιβαλλοντικοί κανονισμοί και η ενισχυμένη πράσινη εικόνα επηρεάζουν θετικά τόσο την περιβαλλοντική όσο και την οικονομική βιωσιμότητα.
Stindt & Sahamie (2014)	Συστηματική ανασκόπηση βιβλιογραφίας με επίκεντρο το CLSC στη βιομηχανία επεξεργασίας.	Εντοπίστηκε έλλειψη προσαρμοσμένης έρευνας CLSC για τις βιομηχανίες επεξεργασίας και συγκεκριμένες ανάγκες, όπως η αλλοιωσιμότητα των προϊόντων και οι κανονιστικοί περιορισμοί.
Gopal et al. (2023)	Προσέγγιση μικτών μεθόδων που ενσωματώνει ποσοτική και ποιοτική ανάλυση.	Τα CLSC μπορούν να μειώσουν σημαντικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα μειώνοντας την κατανάλωση πόρων και την παραγωγή αποβλήτων. Τα οικονομικά οφέλη

		περιλαμβάνουν εξοικονόμηση κόστους και βελτιωμένη φήμη επωνυμίας.
Baghizadeh, Pahl, & Hu (2021)	Μη γραμμικός προγραμματισμός μεικτού ακέραιου πολλαπλών στόχων (MINLP) με ασαφείς παραμέτρους. Δοκιμάστηκε χρησιμοποιώντας μια μελέτη περίπτωσης πραγματικού κόσμου.	Το προτεινόμενο μοντέλο εξισορροπεί αποτελεσματικά οικονομικούς, περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς στόχους, παρέχοντας έναν ανθεκτικό και βιώσιμο σχεδιασμό CLSC.
Winkler (2011)	Εννοιολογικό πλαίσιο που συζητά τα βιώσιμα δίκτυα εφοδιαστικής αλυσίδας (SSCNs).	Τα SSCN συμβάλλουν στο κλείσιμο του βρόχου υλικού και στην προώθηση της αποδοτικότητας των πόρων, βελτιώνοντας την οικονομική και περιβαλλοντική απόδοση.
Al-Refaie, Jarrar, & Lepkova (2021)	Πολυσταδιακός στοχαστικός γραμμικός μικτής ακέραιος γραμμικός προγραμματισμός (MILP) που εφαρμόζεται σε εταιρεία κλιματισμού.	Το μοντέλο CLSC έδειξε σημαντικές μειώσεις στο κόστος αγοράς και στη δημιουργία εσόδων από την ανάκτηση υλικών, και έγινε κερδοφόρο μετά από τρία χρόνια.
Behzadianfar, Eydi, & Shahrokhi (2022)	Διαισθητικές ασαφείς τιμές που χρησιμοποιούνται σε ένα μοντέλο πολλαπλών στόχων για γαλακτοκομικά προϊόντα.	Το μοντέλο εξισορροπεί αποτελεσματικά το κόστος, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τους κοινωνικούς παράγοντες, αποδεικνύοντας τη συγκριτική απόδοση των μεθόδων βελτιστοποίησης στην εξισορρόπηση των στόχων.
Berning & Venter (2015)	Ποιοτική, διερευνητική μελέτη περίπτωσης χρησιμοποιώντας ημιδομημένες συνεντεύξεις και τον οδηγό του Οικουμενικού Συμφώνου του ΟΗΕ.	Οι προσπάθειες SSCM του λιανοπωλητή βρίσκονται σε πρώιμο στάδιο με περιορισμένη συνεργασία προμηθευτών, υπογραμμίζοντας ένα σημαντικό κενό στην ενοποίηση της βιωσιμότητας.

Bratt, Sroufe, & Broman (2021)	Συστηματική ανασκόπηση σε συνδυασμό με μελέτη περίπτωσης και θεωρίες οργανωσιακής μάθησης.	Οι εταιρείες πρέπει να εδραιώσουν τη βιωσιμότητα στο βασικό τους όραμα και να συμμετέχουν σε συνεχή μάθηση με τα ενδιαφερόμενα μέρη.
Brandenburg et al. (2014)	Ανάλυση περιεχομένου 134 εργασιών για τη βιωσιμότητα στις μελλοντικές αλυσίδες εφοδιασμού.	Εντόπισε ένα κενό στα μοντέλα που ενσωματώνουν ολοκληρωμένους περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς παράγοντες, παρά την πρόοδο στην οικονομική και λειτουργική μοντελοποίηση.

4.3 Ενοποίηση κυκλικής οικονομίας με εφοδιαστικές αλυσίδες κλειστού βρόχου

Η ενσωμάτωση των αρχών της κυκλικής οικονομίας (CE) στις αλυσίδες εφοδιασμού κλειστού βρόχου (CLSC) αντιπροσωπεύει ένα κρίσιμο βήμα προς την επίτευξη βιώσιμων προτύπων παραγωγής και κατανάλωσης. Ένα CLSC, εγγενώς σχεδιασμένο για να χειρίζεται τις ροές επιστροφής προϊόντων για επαναχρησιμοποίηση, ανακατασκευή ή ανακύκλωση, είναι κατάλληλο για να υποστηρίξει τον στόχο της CE να ελαχιστοποιήσει τα απόβλητα και την κατανάλωση πόρων διατηρώντας τα υλικά σε χρήση για όσο το δυνατόν περισσότερο (Sosnowski & Cyplik, 2022, Shaharudin et al., 2023). Η ευθυγράμμιση μεταξύ αυτών των δύο πλαισίων είναι ζωτικής σημασίας για τη δημιουργία ενός αναγεννητικού οικονομικού μοντέλου που μπορεί να μετριάσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις προάγοντας παράλληλα την οικονομική ανάπτυξη.

Μία από τις θεμελιώδεις πτυχές της ενσωμάτωσης του CE στο CLSC είναι η βελτιστοποίηση των βρόχων υλικού. Αυτό περιλαμβάνει το σχεδιασμό αλυσίδων εφοδιασμού που επιβραδύνουν, κλείνουν ή περιορίζουν τους βρόχους πόρων μέσω στρατηγικών όπως η παράταση ζωής του προϊόντος, η ανακατασκευή και η ανακύκλωση (Sosnowski & Cyplik, 2022). Χρησιμοποιώντας αυτές τις στρατηγικές, οι εταιρείες μπορούν να ενισχύσουν την αποτελεσματικότητα της χρήσης των πόρων και να μειώσουν την εξάρτησή τους από παρθένα υλικά. Αυτή η ολοκλήρωση απαιτεί

μια μετατόπιση από τα παραδοσιακά μοντέλα γραμμικής αλυσίδας εφοδιασμού σε πιο ολιστικές προσεγγίσεις που λαμβάνουν υπόψη ολόκληρο τον κύκλο ζωής των προϊόντων. Η αποτελεσματική συνεργασία μεταξύ των ενδιαφερόμενων μερών της εφοδιαστικής αλυσίδας είναι απαραίτητη για τη δημιουργία αυτών των κυκλικών δικτύων, καθώς οι μεμονωμένες προσπάθειες είναι ανεπαρκείς για την επίτευξη των συστημικών αλλαγών που απαιτούνται για μια πλήρη μετάβαση στο CE (Farooque et al., 2019; De Giovanni, 2022).

Η υιοθέτηση ψηφιακών τεχνολογιών, όπως το blockchain, διαδραματίζει κεντρικό ρόλο στη διευκόλυνση της ενσωμάτωσης του CE στο CLSC. Το Blockchain μπορεί να ενισχύσει τη διαφάνεια, την ιχνηλασιμότητα και την ασφάλεια σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού, βελτιώνοντας έτσι τη διαχείριση της αντίστροφης εφοδιαστικής και επιτρέποντας πιο αποτελεσματική ανάκτηση πόρων (De Giovanni, 2022). Παρέχοντας αξιόπιστα δεδομένα για την προέλευση και την κατάσταση των προϊόντων, το blockchain υποστηρίζει τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων που είναι απαραίτητες για την αποτελεσματική εφαρμογή του CE. Επιπλέον, η ενοποίηση των αντίστροφων πολυκαναλικών συστημάτων με την τεχνολογία blockchain μπορεί να εξορθολογίσει περαιτέρω τη συλλογή και την αναδιανομή των επιστρεφόμενων προϊόντων, αν και εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις στην ευθυγράμμιση αυτών των συστημάτων με τα υπάρχοντα επιχειρηματικά μοντέλα (De Giovanni, 2022).

Η ενσωμάτωση των αρχών CE στα επιχειρηματικά μοντέλα απαιτεί έναν ολοκληρωμένο επανασχεδιασμό των αλυσίδων εφοδιασμού. Αυτό περιλαμβάνει την ανάπτυξη συστημάτων κλειστού βρόχου που διευκολύνουν την επιστροφή προϊόντων και υλικών στο τέλος της ωφέλιμης ζωής τους για επανεπεξεργασία και επανένταξη σε νέους κύκλους παραγωγής (Holgado & Aminoff, 2019). Οι εταιρείες πρέπει να υιοθετήσουν νέα επιχειρηματικά μοντέλα που δίνουν προτεραιότητα στην αποδοτικότητα των πόρων και τη μακροζωία του προϊόντος, όπως τα μοντέλα προϊόντος ως υπηρεσίας, όπου η ιδιοκτησία παραμένει στον κατασκευαστή και τα προϊόντα μισθώνονται αντί να πωλούνται. Αυτά τα μοντέλα όχι μόνο υποστηρίζουν το CE αλλά δημιουργούν νέες ροές εσόδων και ενισχύουν την αφοσίωση των πελατών προσφέροντας προϊόντα που έχουν σχεδιαστεί για εύκολη επιστροφή, επισκευή και επαναχρησιμοποίηση (Winkler, 2011).

Η Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής (LCA) είναι ένα κρίσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση της περιβαλλοντικής απόδοσης των προϊόντων εντός ενός CLSC. Παρέχει μια ολοκληρωμένη εικόνα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με όλα τα στάδια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος, από την εξόρυξη πρώτων υλών έως την απόρριψη ή την ανακύκλωση (Niero & Olsen, 2016). Η εφαρμογή του LCA σε συστήματα κλειστού βρόχου βοηθά στον εντοπισμό των πιο ωφέλιμων για το περιβάλλον στρατηγικών για την ανάκτηση υλικών και το σχεδιασμό προϊόντων, διασφαλίζοντας ότι η ενσωμάτωση των αρχών CE στο CLSC οδηγεί σε πραγματικές μειώσεις των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Για παράδειγμα, στην περίπτωση της παραγωγής αλουμινίου, η συμπερίληψη στοιχείων κράματος σε ανακυκλωμένα υλικά μπορεί να περιπλέξει τη διαδικασία ανακύκλωσης και να μειώσει τα περιβαλλοντικά της οφέλη, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για προσεκτική διαχείριση υλικών για την επίτευξη πραγματικής κυκλικότητας (Niero & Olsen, 2016).

Ο ρόλος του σχεδιασμού για κυκλικότητα είναι πρωταρχικός στην ενσωμάτωση του CE με το CLSC. Ο σχεδιασμός προϊόντων που είναι πιο εύκολο να αποσυναρμολογηθούν, να επισκευαστούν και να ανακυκλωθούν ενισχύουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα των συστημάτων κλειστού βρόχου. Αυτή η προσέγγιση μειώνει την πολυπλοκότητα και το κόστος της αντίστροφης εφοδιαστικής και βελτιώνει την ποιότητα και την ποσότητα των ανακτημένων υλικών (Farooque et al., 2019). Η στροφή προς το σχεδιασμό για κυκλικότητα απαιτεί τη συνεργασία μεταξύ σχεδιαστών, κατασκευαστών και παρόχων αντίστροφης εφοδιαστικής για να διασφαλιστεί ότι τα προϊόντα βελτιστοποιούνται για το στάδιο του τέλους ζωής από την αρχή (Holgado & Aminoff, 2019).

Οι δυνατότητες στρατηγικής διαχείρισης πόρων είναι επίσης κρίσιμες για την επιτυχή ενσωμάτωση του CE στο CLSC. Οι εταιρείες πρέπει να αναπτύξουν και να αξιοποιήσουν ικανότητες όπως ο σχεδιασμός πράσινων προϊόντων, οι βιώσιμες προμήθειες και η αποτελεσματική διαχείριση απορριμμάτων για να ευθυγραμμίσουν τις δραστηριότητές τους με τις αρχές CE (Shaharudin et al., 2023). Η ανάπτυξη αυτών των δυνατοτήτων επιτρέπει στις επιχειρήσεις να διαχειρίζονται καλύτερα τις ροές επιστροφής προϊόντων και υλικών, διασφαλίζοντας ότι επαναχρησιμοποιούνται ή ανακυκλώνονται με τον πιο αποτελεσματικό δυνατό τρόπο. Αυτή η στρατηγική προσέγγιση βελτιώνει την περιβαλλοντική απόδοση και ενισχύει τα οικονομικά

αποτελέσματα μειώνοντας το κόστος που σχετίζεται με τη διάθεση απορριμμάτων και την προμήθεια πρώτων υλών (Shaharudin et al., 2023).

Παρά τα σαφή οφέλη από την ενσωμάτωση του CE στο CLSC, εξακολουθούν να υπάρχουν αρκετές προκλήσεις. Μια σημαντική πρόκληση είναι η πολυπλοκότητα της διαχείρισης της ποιότητας και της ποσότητας των επιστρεφόμενων προϊόντων, η οποία μπορεί να είναι εξαιρετικά μεταβλητή. Αυτή η μεταβλητότητα περιπλέκει τον σχεδιασμό και την εκτέλεση των διαδικασιών αντίστροφης εφοδιαστικής και μπορεί να οδηγήσει σε αναποτελεσματικότητα και αυξημένο κόστος (Al-Refaiie et al., 2021· Baghizadeh et al., 2021). Επιπλέον, η έλλειψη τυποποιημένων μετρήσεων και πλαισίων για τη μέτρηση της περιβαλλοντικής και οικονομικής απόδοσης των CLSC εμποδίζει την ικανότητα των εταιρειών να αξιολογούν αποτελεσματικά τον αντίκτυπο των πρωτοβουλιών τους CE (Farooque et al., 2019).

Τα πολιτικά και τα ρυθμιστικά πλαίσια διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στην προώθηση της ενοποίησης του CE με το CLSC. Οι κυβερνήσεις μπορούν να υποστηρίξουν αυτή τη μετάβαση εφαρμόζοντας πολιτικές που ενθαρρύνουν ή επιβάλλουν τη χρήση ανακυκλωμένων υλικών, παρέχουν κίνητρα για εταιρείες που υιοθετούν κυκλικές πρακτικές και καθιερώνουν προγράμματα ανάκτησης για προϊόντα στο τέλος του κύκλου ζωής τους (Winkler, 2011). Αυτά τα ρυθμιστικά μέτρα μπορούν να βοηθήσουν στην υπέρβαση ορισμένων από τα εμπόδια στην κυκλικότητα δημιουργώντας ένα ευνοϊκότερο περιβάλλον για επενδύσεις σε κλειστό βρόχοςυστήματα και με την αύξηση της διαθεσιμότητας και της ποιότητας των δευτερογενών πρώτων υλών.

Η συνεργασία μεταξύ των παραγόντων της αλυσίδας εφοδιασμού είναι απαραίτητη για την επιτυχή εφαρμογή των CLSC εντός του πλαισίου CE. Αυτό περιλαμβάνει συνεργασίες μεταξύ κατασκευαστών, παρόχων logistics, ανακυκλωτών και υπευθύνων χάραξης πολιτικής για την ανάπτυξη κοινών προτύπων και πρακτικών για ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση υλικών (Lapko et al., 2019). Μια τέτοια συνεργασία μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία κυκλικών οικοσυστημάτων όπου οι πόροι κυκλοφορούν αποτελεσματικά μέσω της οικονομίας, μειώνοντας την ανάγκη για νέες πρώτες ύλες και ελαχιστοποιώντας τα απόβλητα (Pietrulla, 2022). Η επιτυχία αυτών των οικοσυστημάτων εξαρτάται από τον αποτελεσματικό συντονισμό και την ανταλλαγή πληροφοριών μεταξύ όλων των ενδιαφερομένων για να διασφαλιστεί ότι η

ροή των υλικών βελτιστοποιείται και ότι τα περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη μεγιστοποιούνται (Pietrulla, 2022· Lapko et al., 2019).

Συμπερασματικά, η βιβλιογραφία δείχνει ότι η ενοποίηση των αρχών της κυκλικής οικονομίας με τις αλυσίδες εφοδιασμού κλειστού βρόχου προσφέρει μια πολλά υποσχόμενη πορεία προς τη βιώσιμη παραγωγή και κατανάλωση. Με τη βελτιστοποίηση των βρόχων υλικών, την υιοθέτηση ψηφιακών τεχνολογιών, τον σχεδιασμό για κυκλικότητα και τη μόχλευση των δυνατοτήτων στρατηγικής διαχείρισης πόρων, οι εταιρείες μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά τις περιβαλλοντικές και οικονομικές επιδόσεις των αλυσίδων εφοδιασμού τους. Ωστόσο, η επίτευξη αυτής της ολοκλήρωσης απαιτεί να ξεπεραστούν οι προκλήσεις που σχετίζονται με τη μεταβλητότητα στις επιστροφές προϊόντων, την ανάπτυξη τυποποιημένων μετρήσεων και την ενίσχυση της συνεργασίας μεταξύ των παραγόντων της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Πίνακας 3. Έρευνες για την ενοποίηση της κυκλικής οικονομίας με εφοδιαστικές αλυσίδες κλειστού βρόχου

Συγγραφέας	Μεθοδολογία	Αποτελέσματα
Sosnowski & Cyplik (2022)	Περιεκτική βιβλιογραφική ανασκόπηση που προσδιορίζει τις συνέργειες μεταξύ των εννοιών CLSC και κυκλικής οικονομίας (CE).	Η ανάπτυξη κυκλικών δικτύων, συμπεριλαμβανομένης της μείωσης, της επαναχρησιμοποίησης και της ανακύκλωσης, ενισχύει την αποτελεσματικότητα των πρωτοβουλιών CE.
Shaharudin et al. (2023)	Ποσοτική μελέτη με χρήση Μοντελοποίησης Δομικών Εξισώσεων (SEM) με δεδομένα από 150 Μαλαισιανούς κατασκευαστές.	Οι δυνατότητες ολοκλήρωσης και παραγωγής επηρεάζουν σημαντικά το CLSCO, ενώ οι δυνατότητες ανάκτησης όχι. Ένα ισχυρό CLSCO επηρεάζει θετικά την απόδοση του CE.
De Giovanni (2022)	Μοντελοποίηση δομικών εξισώσεων (SEM) και Μοντελοποίηση μερικών ελαχίστων τετραγώνων	Το Blockchain ενισχύει τα συστήματα CE, αλλά οι αντίστροφες πολυκαναλικές λύσεις δεν βελτιώνουν σταθερά την επιχειρηματική απόδοση.

	(PLS-PM) με σύνολο δεδομένων 157 εταιρειών.	
Holgado & Aminoff (2019)	Εννοιολογική ανάλυση και ανάπτυξη τυπολογίας για αλυσίδες εφοδιασμού κλειστού βρόχου.	Προσδιόρισε δύο διαφορετικούς τύπους εφοδιαστικών αλυσίδων κλειστού βρόχου που ισχύουν για διάφορα κυκλικά επιχειρηματικά μοντέλα.
Winkler (2011)	Εννοιολογικό πλαίσιο που συνδέει τα βιώσιμα δίκτυα εφοδιαστικής αλυσίδας (SSCN) με συστήματα παραγωγής κλειστού βρόχου.	Τα SSCN βελτιώνουν σημαντικά τις περιβαλλοντικές και οικονομικές επιδόσεις, υποστηρίζοντας τη μετάβαση σε μια κυκλική οικονομία.
Niero & Olsen (2016)	Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής (LCA) παραγωγής κουτιών αλουμινίου, συγκρίνοντας σενάρια με και χωρίς στοιχεία κράματος.	Η ανακύκλωση κλειστού βρόχου μειώνει σημαντικά τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, αλλά τα στοιχεία κράματος περιπλέκουν την ανακύκλωση και μειώνουν την απόδοση.
Farooque et al. (2019)	Δομημένη βιβλιογραφική ανασκόπηση 261 άρθρων για τον ορισμό και την αποσαφήνιση του CSCM.	Εντόπισε την έλλειψη συνεκτικής κατανόησης στο CSCM και τόνισε κρίσιμους τομείς για μελλοντική έρευνα, συμπεριλαμβανομένου του σχεδιασμού για την κυκλικότητα και τις στρατηγικές προμηθειών.
Allwood (2014)	Ποιοτική ανάλυση βιβλιογραφίας και περιπτώσιολογικές μελέτες για την ανακύκλωση στην κυκλική οικονομία.	Η ανακύκλωση από μόνη της είναι ανεπαρκής. Πρέπει να ενσωματωθεί με τη μείωση της ζήτησης υλικών, την επαναχρησιμοποίηση εξαρτημάτων και τη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού του προϊόντος για μακροζωία.
Zhu et al. (2008)	Συγχρονική έρευνα πρακτικών διαχείρισης πράσινης εφοδιαστικής αλυσίδας (GSCM) σε τέσσερις κινεζικές βιομηχανίες.	Σημαντικές διαφορές στην υιοθέτηση GSCM μεταξύ των βιομηχανιών, που επηρεάζονται από ειδικούς παράγοντες του κλάδου.

Pietrulla (2022)	Συστηματική βιβλιογραφική ανάλυση για τα κυκλικά οικοσυστήματα στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας.	Καθόρισε κυκλικά οικοσυστήματα και εντόπισε βασικούς παράγοντες επιτυχίας και εμπόδια υλοποίησης.
Lapko et al. (2019)	Ποιοτική ανάλυση εταιρειών κατά μήκος της αλυσίδας εφοδιασμού κρίσιμων πρώτων υλών (CRMs).	Σημαντικές διαφορές στις προοπτικές μεταξύ των φορέων παραγωγής και της αντίστροφης αλυσίδας εφοδιασμού.

4.4 Ψηφιοποίηση και βιομηχανία 4.0 σε εφοδιαστικές αλυσίδες κλειστού βρόχου

Η ενσωμάτωση τεχνολογιών Industry 4.0, όπως το Internet of Things (IoT), το blockchain, τα big data analytics και η additive manufacturing (AM) σε αλυσίδες εφοδιασμού κλειστού βρόχου (CLSC) σηματοδοτεί μια σημαντική πρόοδο στην εξέλιξη της διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας. Αυτές οι τεχνολογίες διευκολύνουν τη μετάβαση από τις παραδοσιακές γραμμικές αλυσίδες εφοδιασμού σε πιο βιώσιμα, κυκλικά μοντέλα ενισχύοντας τη διαφάνεια, την αποτελεσματικότητα και την ανθεκτικότητα σε όλο τον κύκλο ζωής του προϊόντος (Kache & Seuring, 2017; De Man & Strandhagen, 2017). Η ψηφιοποίηση επιτρέπει την παρακολούθηση και τη διαχείριση των προϊόντων σε πραγματικό χρόνο από την παραγωγή έως το τέλος του κύκλου ζωής τους, βελτιστοποιώντας έτσι τις ροές υλικών και υποστηρίζοντας τις αρχές της κυκλικής οικονομίας.

Ένα από τα βασικά οφέλη της ψηφιοποίησης στο CLSC είναι η βελτιωμένη ιχνηλασιμότητα και ορατότητα που παρέχει, τα οποία είναι ζωτικής σημασίας για τη διαχείριση των διαδικασιών αντίστροφης εφοδιαστικής και ανάκτησης. Η τεχνολογία Blockchain, για παράδειγμα, προσφέρει ένα αποκεντρωμένο, αμετάβλητο καθολικό που παρακολουθεί τα προϊόντα σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους, μειώνοντας τους κινδύνους όπως η παραχάραξη και η αναποτελεσματικότητα, ειδικά σε ευαίσθητες

βιομηχανίες όπως τα φαρμακευτικά προϊόντα και τα τρόφιμα (Bumblauskas et al., 2020; Sylim et al., 2018). Αυτή η ενισχυμένη διαφάνεια αυξάνει την εμπιστοσύνη των καταναλωτών και υποστηρίζει τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς και τη διαχείριση κινδύνου παρέχοντας στους ενδιαφερόμενους μια αξιόπιστη πηγή πληροφοριών για το προϊόν.

Το IoT ενισχύει περαιτέρω την ορατότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας συνδέοντας φυσικά αντικείμενα, ροές δεδομένων και διεργασίες σε ένα συνεκτικό ψηφιακό δίκτυο. Αυτή η συνδεσιμότητα επιτρέπει την ολοκληρωμένη παρακολούθηση και παρακολούθηση, επιτρέποντας πιο αποτελεσματική διαχείριση αποθεμάτων και προγνωστική συντήρηση, τα οποία είναι ιδιαίτερα ωφέλιμα για τις βιομηχανίες που ασχολούνται με ευπαθή αγαθά ή είδη υψηλής αξίας (Accorsi et al., 2017; Brintrup et al., 2019). Η ενσωμάτωση του IoT στα CLSCs διευκολύνει τη λήψη αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο και τις λειτουργικές προσαρμογές, μειώνοντας έτσι τη σπατάλη και βελτιώνοντας τη χρήση των πόρων.

Η ανάλυση μεγάλων δεδομένων και η μηχανική μάθηση είναι ζωτικής σημασίας για την αξιοποίηση των τεράστιων ποσοτήτων δεδομένων που παράγονται από ψηφιοποιημένες αλυσίδες εφοδιασμού. Αυτές οι τεχνολογίες επιτρέπουν στις εταιρείες να προβλέπουν διακοπές, να βελτιστοποιούν τα logistics και να βελτιώνουν τις διαδικασίες λήψης αποφάσεων. Για παράδειγμα, η προγνωστική ανάλυση μπορεί να εντοπίσει πιθανούς κινδύνους της εφοδιαστικής αλυσίδας και να επιτρέψει στις εταιρείες να τους διαχειρίζονται προληπτικά, ενισχύοντας έτσι την ανθεκτικότητα και μειώνοντας το λειτουργικό κόστος (Brintrup et al., 2019; Kache & Seuring, 2017). Επιπλέον, τα μοντέλα μηχανικής εκμάθησης μπορούν να βελτιώσουν τη διαχείριση αποθεμάτων και τον προγραμματισμό παραγωγής, συμβάλλοντας σε ένα πιο ευέλικτο και ανταποκρινόμενο δίκτυο εφοδιαστικής αλυσίδας.

Η παραγωγή προσθέτων (Additive manufacturing, AM), κοινώς γνωστή ως τρισδιάστατη εκτύπωση, υποστηρίζει τους στόχους των CLSC επιτρέποντας την παραγωγή κατ' απαίτηση και μειώνοντας την εξάρτηση από μεγάλα αποθέματα. Η AM επιτρέπει την τοπική και εξατομικευμένη παραγωγή, η οποία μειώνει τις εκπομπές από τις μεταφορές και ελαχιστοποιεί τα απόβλητα που σχετίζονται με τις παραδοσιακές διαδικασίες παραγωγής (Afshari et al., 2019; Sun et al., 2015). Αυτή η δυνατότητα είναι ιδιαίτερα πλεονεκτική για δραστηριότητες ανακατασκευής και ανακαίνισης, όπου

συχνά χρειάζονται προσαρμοσμένα εξαρτήματα. Ωστόσο, η υιοθέτηση της AM απαιτεί προσεκτική εξέταση του υλικού, της διαθεσιμότητας και της δυνατότητας επεκτασιμότητας της παραγωγής για την πλήρη αξιοποίηση των πιθανών πλεονεκτημάτων της σε CLSC.

Οι τεχνολογίες Blockchain και IoT διευκολύνουν επίσης την ανάπτυξη επιχειρηματικών μοντέλων προϊόντος ως υπηρεσίας, όπου οι εταιρείες διατηρούν την κυριότητα των προϊόντων και τα προσφέρουν μέσω υπηρεσιών χρηματοδοτικής μίσθωσης ή συνδρομής. Αυτό το μοντέλο ενθαρρύνει το σχεδιασμό προϊόντων για ανθεκτικότητα και επισκευή, ευθυγραμμιζόμενο με το ήθος της εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου για τη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας των πόρων και την ελαχιστοποίηση της σπατάλης (De Man & Strandhagen, 2017; Choi et al., 2020). Αυτές οι ψηφιακές πλατφόρμες επιτρέπουν αποτελεσματικά συστήματα ανάκτησης και δίνουν κίνητρα στους καταναλωτές να συμμετέχουν στις προσπάθειες ανακύκλωσης και ανακατασκευής, κλείνοντας περαιτέρω τον βρόχο της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Παρά τα πολυάριθμα οφέλη, η ενσωμάτωση των τεχνολογιών Industry 4.0 στα CLSC δεν είναι χωρίς προκλήσεις. Ζητήματα όπως το απόρρητο των δεδομένων, η ασφάλεια στον κυβερνοχώρο και η ανάγκη για σημαντικές επενδύσεις σε υποδομές και ανάπτυξη δεξιοτήτων θέτουν ουσιαστικά εμπόδια (Strange & Zucchella, 2017; Kache & Seuring, 2017). Η αυξημένη συνδεσιμότητα και κοινή χρήση δεδομένων που απαιτούνται για τις ψηφιοποιημένες αλυσίδες εφοδιασμού μπορεί να εκθέσει τις εταιρείες σε απειλές στον κυβερνοχώρο, καθιστώντας τα ισχυρά μέτρα ασφαλείας απαραίτητα. Επιπλέον, η επιτυχής εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών απαιτεί όχι μόνο τεχνολογικές επενδύσεις αλλά και την ανάπτυξη ενός ειδικευμένου εργατικού δυναμικού ικανού να διαχειρίζεται και να λειτουργεί προηγμένα ψηφιακά συστήματα.

Για να αντιμετωπίσουν αυτές τις προκλήσεις, οι εταιρείες πρέπει να υιοθετήσουν μια ολιστική προσέγγιση που να ενσωματώνει τεχνολογικές, οργανωτικές και στρατηγικές διαστάσεις. Αυτό περιλαμβάνει την επανεξέταση των παραδοσιακών δομών της εφοδιαστικής αλυσίδας, την προώθηση της συνεργασίας σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού και την υιοθέτηση νέων επιχειρηματικών μοντέλων που αξιοποιούν τις ψηφιακές δυνατότητες (Xiang & Xu, 2019; De Man & Strandhagen, 2017). Για παράδειγμα, τα ψηφιακά δίδυμα (digital twins) - εικονικές αναπαραστάσεις οντοτήτων της φυσικής αλυσίδας εφοδιασμού - επιτρέπουν στις εταιρείες να προσομοιώνουν

διαφορετικά σενάρια και να βελτιστοποιούν τις δραστηριότητές τους σε πραγματικό χρόνο, ενισχύοντας έτσι τόσο τον στρατηγικό σχεδιασμό όσο και τη λειτουργική αποτελεσματικότητα (Accorsi et al., 2017; Brintrup et al., 2019).

Εκτός από τα λειτουργικά οφέλη, η ψηφιοποίηση μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη συμμετοχή και την ικανοποίηση των καταναλωτών. Παρέχοντας λεπτομερείς πληροφορίες σχετικά με την προέλευση των προϊόντων, τον κύκλο ζωής και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, οι εταιρείες μπορούν να προσφέρουν μεγαλύτερη διαφάνεια και να οικοδομήσουν ισχυρότερες σχέσεις με τους πελάτες τους (Choi et al., 2020; Sylim et al., 2018). Αυτή η διαφάνεια είναι ζωτικής σημασίας για την προώθηση βιώσιμων καταναλωτικών προτύπων και την ενθάρρυνση της συμμετοχής των καταναλωτών σε κυκλικές πρακτικές, όπως προγράμματα επιστροφής προϊόντων και ανακύκλωσης.

Επιπλέον, η χρήση ψηφιακών τεχνολογιών δίνει τη δυνατότητα στις εταιρείες να ευθυγραμμίσουν τις επιχειρηματικές τους στρατηγικές με τους στόχους βιωσιμότητας πιο αποτελεσματικά. Για παράδειγμα, η ανάλυση μεγάλων δεδομένων μπορεί να βοηθήσει τις εταιρείες να αξιολογήσουν τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο των δραστηριοτήτων τους στην αλυσίδα εφοδιασμού και να εντοπίσουν τομείς προς βελτίωση (Kache & Seuring, 2017; Sun et al., 2015). Ομοίως, το IoT και το blockchain μπορούν να εξορθολογίσουν την παρακολούθηση των δεικτών περιβαλλοντικής απόδοσης, διευκολύνοντας τις εταιρείες να αναφέρουν και να βελτιώσουν τα αποτελέσματα βιωσιμότητας.

Συνολικά, η ενσωμάτωση των τεχνολογιών Industry 4.0 σε CLSC προσφέρει σημαντικές ευκαιρίες στις εταιρείες να ενισχύσουν τη βιωσιμότητα και την ανταγωνιστικότητά τους. Ωστόσο, η συνειδητοποίηση αυτών των πλεονεκτημάτων απαιτεί την υπέρβαση των τεχνικών και οργανωτικών προκλήσεων και την υιοθέτηση μιας ολοκληρωμένης στρατηγικής που αντιμετωπίζει την πολυπλοκότητα του ψηφιακού μετασχηματισμού. Αξιοποιώντας αποτελεσματικά αυτές τις τεχνολογίες, οι εταιρείες μπορούν να δημιουργήσουν πιο ανθεκτικές, αποδοτικές και βιώσιμες αλυσίδες εφοδιασμού που είναι καλά εξοπλισμένες για να ανταποκριθούν στις απαιτήσεις ενός ταχέως μεταβαλλόμενου παγκόσμιου περιβάλλοντος (Kache & Seuring, 2017; De Man & Strandhagen, 2017).

Πίνακας 4. Έρευνες για την ψηφιοποίηση και την βιομηχανία 4.0 σε εφοδιαστικές αλυσίδες κλειστού βρόχου

Συγγραφέας	Μεθοδολογία	Αποτελέσματα
Afshari et al. (2019)	Ανέπτυξαν ένα μαθηματικό μοντέλο για την προσομοίωση μιας εφοδιαστικής αλυσίδας που ενεργοποιήθηκε από την Additive Manufacturing (AM), λαμβάνοντας υπόψη τα φαινόμενα μάθησης και λήθης. Δοκιμασμένο με αριθμητικά σενάρια.	Διακοπές όπως οι διακυμάνσεις της ζήτησης επηρεάζουν σημαντικά τις αλυσίδες εφοδιασμού με δυνατότητα AM. Η συνεχής εκπαίδευση και η λειτουργική συνέπεια είναι ζωτικής σημασίας.
Bumblauskas et al. (2020)	Μελέτη περίπτωσης σε ένα σύστημα με δυνατότητα blockchain σε εταιρεία των Μεσοδυτικών ΗΠΑ, που παρακολουθεί την παραγωγή αυτών μέσω IoT και blockchain.	Το Blockchain βελτιώνει την ιχνηλασιμότητα, επιτρέποντας στους καταναλωτές να έχουν πρόσβαση σε λεπτομερείς πληροφορίες προϊόντων. Ενισχύει την αποτελεσματικότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας και μειώνει τους κινδύνους που σχετίζονται με ανακλήσεις και απάτη.
Accorsi et al. (2017)	Εννοιολογική ανάπτυξη ενός πλαισίου βασισμένου στο IoT για τη διαχείριση των αλυσίδων εφοδιασμού τροφίμων, ενσωματωμένο με ένα εργαλείο προσομοίωσης παιχνιδιού.	Η προτεινόμενη αρχιτεκτονική IoT βελτιώνει σημαντικά την ορατότητα, την ιχνηλασιμότητα και τη λειτουργική αποτελεσματικότητα στις αλυσίδες εφοδιασμού τροφίμων.
Brintrup et al. (2019)	Προηγμένα μοντέλα ανάλυσης δεδομένων και μηχανικής μάθησης εφαρμόστηκαν για την πρόβλεψη διαταραχών της εφοδιαστικής αλυσίδας, εστιάζοντας σε προμηθευτές πρώτης κατηγορίας.	Τα κατασκευασμένα χαρακτηριστικά, ειδικά οι μετρήσεις που σχετίζονται με την ευελιξία, ενισχύουν σημαντικά την προγνωστική ακρίβεια, επιτυγχάνοντας ακρίβεια 80% για προβλέψεις καθυστερημένης παραγγελίας.
Choi et al. (2020)	Το στυλιζαρισμένο μοντέλο διοπωλίου ανέλυσε την ισορροπία Nash των επιπέδων	Οι πλατφόρμες αποκαλύπτουν περισσότερες πληροφορίες όταν το κόστος ελέγχου είναι χαμηλό και τα

	αποκάλυψης πληροφοριών προϊόντων σε αγορές υπηρεσιών ενοικίασης με δυνατότητα blockchain.	περιθώρια κέρδους είναι υψηλά. Η αποκάλυψη αυξάνει την εμπιστοσύνη και την ανταγωνιστικότητα των καταναλωτών.
Xiang & Xu (2019)	Η διαφορική θεωρία παιγνίων εφαρμόστηκε σε ένα μοντέλο CLSC τριών κλιμακίων με κατασκευαστές, λιανοπωλητές και παρόχους υπηρεσιών διαδικτύου, αναλύοντας στρατηγικές δυναμικής συνεργασίας.	Το σενάριο επιμερισμού του κόστους του κατασκευαστή ενισχύει την υπεραξία και τα κέρδη του προϊόντος. Οι ISP επενδύουν περισσότερο στο μάρκετινγκ Big Data σύμφωνα με αυτό το σενάριο.
Sylim et al. (2018)	Ανέπτυξαν ένα σύστημα φαρμακοεπιτήρησης βασισμένο σε blockchain χρησιμοποιώντας πλατφόρμες Ethereum και Hyperledger Fabric για την παρακολούθηση της διανομής φαρμάκων.	Το σύστημα επιτρέπει στους καταναλωτές να επαληθεύουν τη γνησιότητα των φαρμάκων, μειώνοντας τους κινδύνους παραποίησης/απομίμησης. Ακόμα σε φάση ανάπτυξης.
Strange & Zucchella (2017)	Περιεκτική βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τον αντίκτυπο των τεχνολογιών Industry 4.0 στις παγκόσμιες αλυσίδες αξίας (GVCs).	Το Industry 4.0 θα μπορούσε να διαταράξει τα παραδοσιακά GVC, μετατοπίζοντας τοποθεσίες παραγωγής και αυξάνοντας την αυτοματοποίηση. Υπογραμμίζει πιθανούς κινδύνους για την ασφάλεια στον κυβερνοχώρο.
De Man & Strandhagen (2017)	Εννοιολογική ανάλυση για την ενσωμάτωση τεχνολογιών Industry 4.0 σε βιώσιμα επιχειρηματικά μοντέλα, προτείνοντας ένα ερευνητικό πρόγραμμα.	Οι τεχνολογίες Industry 4.0 μπορούν να αλλάξουν θεμελιωδώς τις αλυσίδες εφοδιασμού, υποστηρίζοντας τη βιώσιμη παραγωγή και τους μεγαλύτερους κύκλους ζωής των προϊόντων.
Kache & Seuring (2017)	Ερευνητική τεχνική Delphi για τον εντοπισμό 43 δομών που αντιπροσωπεύουν τον αντίκτυπο του Big Data Analytics στο SCM.	Τα Big Data βελτιώνουν σημαντικά τη λήψη αποφάσεων και την αποτελεσματικότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας, αλλά αντιμετωπίζουν εμπόδια

		όπως το απόρρητο των δεδομένων και η πολυπλοκότητα της ενοποίησης.
Sun et al. (2015)	Ανασκόπηση βιβλιογραφίας για τεχνολογίες τρισδιάστατης εκτύπωσης για την παρασκευή τροφίμων, κατηγοριοποίηση πλατφορμών, υλικών και συνταγών.	Η τρισδιάστατη εκτύπωση τροφίμων επιτρέπει εξαιρετικά προσαρμοσμένα προϊόντα διατροφής, αλλά αντιμετωπίζει προκλήσεις στις ιδιότητες των υλικών, τη βελτιστοποίηση της διαδικασίας και την αποδοχή από τους καταναλωτές.

4.5 Οικονομικές και χρηματοοικονομικές πτυχές του CLSC

Οι οικονομικές και χρηματοοικονομικές πτυχές των Εφοδιαστικών Αλυσίδων κλειστού βρόχου (CLSCs) είναι επίσης ένας κρίσιμος τομέας εστίασης της σχετικής βιβλιογραφίας, με στόχο την εξισορρόπηση της κερδοφορίας με την περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Η ενσωμάτωση οικονομικών και περιβαλλοντικών στόχων στα CLSCs είναι μια σύνθετη αλλά απαραίτητη προσπάθεια, καθώς αυτά τα συστήματα προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες για την προώθηση μιας κυκλικής οικονομίας με τη μείωση των αποβλήτων και τη διατήρηση των πόρων (Gopal et al., 2023; Bhattacharjee & Cruz, 2015). Αυτή η σύνθεση της βιβλιογραφίας υπογραμμίζει βασικούς οικονομικούς παράγοντες, προκλήσεις και στρατηγικές εκτιμήσεις για την αποτελεσματική διαχείριση των CLSC, τονίζοντας την ανάγκη για μοντέλα που να προσαρμόζονται στη μοναδική οικονομική δυναμική που είναι εγγενής σε αυτά τα συστήματα.

Ένα από τα θεμελιώδη οικονομικά πλεονεκτήματα των CLSC έγκειται στην ικανότητά τους να μειώνουν το κόστος μέσω της ανάκτησης και επαναχρησιμοποίησης υλικών, γεγονός που όχι μόνο μειώνει την εξάρτηση από παρθένους πόρους αλλά και μετριάξει τα έξοδα διάθεσης (Das, 2020; Dou & Cao, 2020). Αυτή η εξοικονόμηση κόστους είναι εμφανής σε βιομηχανίες όπου η αξία των ανακτημένων υλικών είναι υψηλή, όπως οι τομείς των ηλεκτρονικών και της αυτοκινητοβιομηχανίας. Η επαναχρησιμοποίηση εξαρτημάτων μέσω ανακατασκευής ή ανακαίνισης μπορεί να μειώσει σημαντικά το κόστος παραγωγής, συμβάλλοντας στη συνολική κερδοφορία

της αλυσίδας εφοδιασμού. Ωστόσο, τα οικονομικά οφέλη των CLSC εξαρτώνται σε μεγάλο βαθμό από αποτελεσματικές λειτουργίες αντίστροφης εφοδιαστικής, αποτελεσματικές πολιτικές επιστροφής και την ποιότητα των επιστρεφόμενων προϊόντων (Bhattacharjee & Cruz, 2015; Nikolic & Kostic-Stankovic, 2022). Η μεταβλητότητα στην ποιότητα των επιστρεφόμενων αντικειμένων μπορεί να δημιουργήσει σημαντικές προκλήσεις, επηρεάζοντας τόσο το κόστος όσο και τη σκοπιμότητα των διαδικασιών ανακατασκευής.

Η κερδοφορία των CLSC επηρεάζεται επίσης από τον σχεδιασμό και την εφαρμογή κατάλληλων δομών κινήτρων. Για παράδειγμα, οι φορολογικοί κανονισμοί άνθρακα και οι επιδοτήσεις για ανακατασκευασμένα προϊόντα μπορούν να αλλάξουν σημαντικά το οικονομικό τοπίο των CLSC παρέχοντας κίνητρα σε πρακτικές φιλικές προς το περιβάλλον (Dou & Cao, 2020; Al-Ashhab, 2022). Σε σενάρια όπου οι φόροι άνθρακα είναι υψηλοί, οι διαμορφώσεις CLSC που δίνουν προτεραιότητα στην ανακατασκευή έναντι της νέας παραγωγής μπορούν να οδηγήσουν σε εξοικονόμηση κόστους και μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, παρέχοντας ανταγωνιστικό πλεονέκτημα στις επιχειρήσεις που υιοθετούν τέτοιες στρατηγικές. Ωστόσο, η επιτυχία αυτών των διαμορφώσεων εξαρτάται από την ικανότητα των επιχειρήσεων να εξισορροπούν το κόστος που σχετίζεται με τις διαδικασίες ανακατασκευής έναντι της πιθανής εξοικονόμησης πόρων από τη μείωση των φόρων άνθρακα και άλλα οικονομικά κίνητρα.

Παρά τα πιθανά οικονομικά οφέλη, η εφαρμογή των CLSC θέτει αρκετές οικονομικές προκλήσεις, ιδίως σε σχέση με την αρχική επένδυση σε υποδομή και τεχνολογία που απαιτείται για την υποστήριξη των δραστηριοτήτων αντίστροφης εφοδιαστικής και ανακατασκευής (Vogt Duberg et al., 2024). Η υιοθέτηση διαδικασιών ανακατασκευής απαιτεί σημαντικό αρχικό κόστος, συμπεριλαμβανομένης της επένδυσης σε εξειδικευμένο εξοπλισμό, της εκπαίδευσης των εργαζομένων και της ανάπτυξης αποτελεσματικών δικτύων αντίστροφης εφοδιαστικής. Αυτά τα κόστη μπορεί να είναι απαγορευτικά για μικρότερες επιχειρήσεις ή βιομηχανίες με χαμηλά περιθώρια κέρδους, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για φιλικά προς τον χρήστη και προσβάσιμα οικονομικά μοντέλα που μπορούν να διευκολύνουν τη μετάβαση σε κυκλικές ροές προϊόντων. Επιπλέον, η οικονομική βιωσιμότητα των CLSC συχνά παρεμποδίζεται από την πολυπλοκότητα που σχετίζεται με την πρόβλεψη ζήτησης και

τη διαχείριση αποθεμάτων, καθώς η ροή επιστροφής των προϊόντων είναι εγγενώς αβέβαιη (Ovchinnikov et al., 2014; Al-Ashhab, 2022).

Επιπλέον, η οικονομική απόδοση των CLSC συνδέεται στενά με τη διαχείριση του «κανιβαλισμού της ζήτησης» (demand cannibalization), ιδιαίτερα σε αγορές όπου τα ανακατασκευασμένα προϊόντα ανταγωνίζονται νέα προϊόντα (Ovchinnikov et al., 2014). Ο όρος "demand cannibalization" αναφέρεται στο φαινόμενο κατά το οποίο η ζήτηση ενός προϊόντος ή υπηρεσίας μειώνεται εξαιτίας της εισαγωγής ενός νέου προϊόντος ή υπηρεσίας από την ίδια εταιρεία. Αυτό σημαίνει ότι οι πωλήσεις του νέου προϊόντος αντικαθιστούν, σε κάποιο βαθμό, τις πωλήσεις του υφιστάμενου προϊόντος, αντί να προσελκύουν νέους πελάτες ή να αυξάνουν τη συνολική ζήτηση. Σε ορισμένες περιπτώσεις, η εισαγωγή ανακατασκευασμένων προϊόντων μπορεί να οδηγήσει σε θετικό κανιβαλισμό, όπου τα περιβαλλοντικά οφέλη υπερτερούν της πιθανής απώλειας στις πωλήσεις νέων προϊόντων. Ωστόσο, ο αρνητικός κανιβαλισμός μπορεί να συμβεί όταν η παρουσία ανακατασκευασμένων προϊόντων σε χαμηλότερη τιμή αναγκάζει τις εταιρείες να μειώσουν τις τιμές των νέων προϊόντων, μειώνοντας έτσι τη συνολική κερδοφορία. Η αποτελεσματική διαχείριση αυτής της αντιστάθμισης είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της οικονομικής βιωσιμότητας των CLSC, καθώς οι εταιρείες πρέπει να εξισορροπούν προσεκτικά τις στρατηγικές τιμολόγησης νέων και ανακατασκευασμένων προϊόντων για τη βελτιστοποίηση τόσο των εσόδων όσο και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Για να αντιμετωπιστούν αυτές οι προκλήσεις, αρκετές μελέτες έχουν προτείνει καινοτόμα οικονομικά μοντέλα που ενσωματώνουν περιβαλλοντικές και οικονομικές εκτιμήσεις, παρέχοντας ένα ολιστικό πλαίσιο για τη λήψη αποφάσεων σε CLSCs (Das, 2020; Dou & Cao, 2020; Al-Ashhab, 2022). Αυτά τα μοντέλα συνήθως ενσωματώνουν μετρήσεις αξιολόγησης κύκλου ζωής (LCA) για την αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αντίκτυπου των δραστηριοτήτων της εφοδιαστικής αλυσίδας παράλληλα με τις παραδοσιακές αναλύσεις κόστους-οφέλους. Για παράδειγμα, η ενσωμάτωση της LCA στον προγραμματισμό CLSC μπορεί να βοηθήσει τις εταιρείες να εντοπίσουν ευκαιρίες μείωσης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και βελτιστοποίησης της χρήσης των πόρων, ενισχύοντας έτσι τόσο την οικονομική όσο και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Επιπλέον, μοντέλα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων που λαμβάνουν υπόψη διάφορους οικονομικούς, περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς παράγοντες

μπορούν να παρέχουν μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση για το σχεδιασμό και τον προγραμματισμό των δικτύων εφοδιαστικής αλυσίδας, επιτρέποντας στις εταιρείες να επιτύχουν μια ισορροπημένη ανταλλαγή μεταξύ κερδοφορίας και βιωσιμότητας (Al-Ashhab, 2022).

Ο ρόλος της συμπεριφοράς των καταναλωτών και της δυναμικής της αγοράς στον επηρεασμό της οικονομικής βιωσιμότητας των CLSC είναι επίσης κρίσιμος παράγοντας. Μελέτες έχουν δείξει ότι οι προτιμήσεις των καταναλωτών για βιώσιμα προϊόντα και η αποτελεσματικότητα των στρατηγικών μάρκετινγκ επηρεάζουν σημαντικά την επιτυχία των CLSC (Bhattacharjee & Cruz, 2015; Nikolic & Kostic-Stankovic, 2022). Για παράδειγμα, η κατανόηση της στάσης των καταναλωτών απέναντι στα ανακατασκευασμένα προϊόντα και ο σχεδιασμός αποτελεσματικών εκστρατειών μάρκετινγκ μπορεί να τονώσει τη ζήτηση για αυτά τα προϊόντα, ενισχύοντας έτσι την οικονομική απόδοση των CLSC. Επιπλέον, η ενσωμάτωση βιώσιμων πρακτικών στην τοποθέτηση της επωνυμίας μπορεί να ενισχύσει την αφοσίωση των πελατών και να δημιουργήσει πρόσθετες ροές εσόδων, υποστηρίζοντας περαιτέρω την οικονομική βιωσιμότητα αυτών των αλυσίδων εφοδιασμού.

Συμπερασματικά, οι οικονομικές και χρηματοοικονομικές πτυχές των CLSC είναι πολύπλευρες, συμπεριλαμβάνοντας εξοικονόμηση κόστους από την ανάκτηση υλικών, προκλήσεις που σχετίζονται με την αβεβαιότητα της ζήτησης και την αρχική επένδυση και τη στρατηγική διαχείριση των επιπτώσεων ανακατασκευής και κανιβαλισμού (Das, 2020; Ovchinnikov et al., 2014). Η επίτευξη οικονομικής βιωσιμότητας σε CLSC απαιτεί την κατανόηση αυτών των παραγόντων και την ανάπτυξη ισχυρών μοντέλων που ενσωματώνουν οικονομικούς, περιβαλλοντικούς και κοινωνικούς στόχους. Οι υπεύθυνοι χάραξης πολιτικής και οι επαγγελματίες πρέπει να συνεργαστούν για να δημιουργήσουν υποστηρικτικά ρυθμιστικά πλαίσια και δομές κινήτρων που διευκολύνουν την υιοθέτηση CLSC, ενώ οι εταιρείες πρέπει να επενδύσουν στην απαραίτητη υποδομή και δυνατότητες για τη βελτιστοποίηση αυτών των συστημάτων. Τελικά, η επιτυχής εφαρμογή των CLSCs μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικά οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη, συμβάλλοντας στους ευρύτερους στόχους της βιώσιμης ανάπτυξης και της αποδοτικότητας των πόρων (Gopal et al., 2023; Bhattacharjee & Cruz, 2015).

Πίνακας 5. Έρευνες για τις οικονομικές και χρηματοοικονομικές πτυχές του CLSC

Συγγραφέας	Μεθοδολογία	Αποτελέσματα
Gopal et al. (2023)	Προσέγγιση μικτών μεθόδων που συνδυάζει ποσοτικά δεδομένα σχετικά με τη μείωση της χρήσης πρώτων υλών, την κατανάλωση ενέργειας και τις εκπομπές αερίων θερμοκηπίου με ποιοτικές γνώσεις σχετικά με την ενσωμάτωση της βιωσιμότητας στις αλυσίδες εφοδιασμού.	Τα CLSC συμβάλλουν σημαντικά στην περιβαλλοντική βιωσιμότητα και προσφέρουν οικονομικά πλεονεκτήματα, όπως εξοικονόμηση κόστους και αποδοτικότητα πόρων.
Bhattacharjee and Cruz (2015)	Μοντέλο κύκλου ζωής από άκρο σε άκρο ενός καταναλωτικού ηλεκτρονικού προϊόντος χρησιμοποιώντας δεδομένα από ανακυκλωτές και βιβλιογραφία. Μοντελοποίησε διάφορα σενάρια για να αναλύσει τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των ενδιαφερομένων.	Ένα καλά βαθμονομημένο ποσοστό επιστροφής μεταξύ νέων και ανακαινισμένων προϊόντων είναι ζωτικής σημασίας. Οι πολιτικές βιώσιμων επιστροφών μπορούν να ενισχύσουν τις πωλήσεις σε διαφορετικά τμήματα καταναλωτών.
Das (2020)	Ενσωματωμένο μοντέλο CLSC που ενσωματώνει μετρήσεις αξιολόγησης κύκλου ζωής (LCA) για στάδια όπως η προμήθεια, η παραγωγή, η συλλογή, η ανάκτηση και η ανακατασκευή.	Η ενσωμάτωση των μετρήσεων LCA στον σχεδιασμό CLSC ενισχύει σημαντικά τη βιωσιμότητα μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και βελτιστοποιώντας τη χρήση των πόρων.
Dou and Cao (2020)	Μαθηματικό μοντέλο που αξιολογεί τρεις δομές CLSC (πωλητής λιανικής, κατασκευαστής και συλλογή από τρίτους) υπό διαφορετικούς φορολογικούς όρους.	Οι συλλογές κατασκευαστών και λιανοπωλητών μπορούν να είναι τα πιο οικονομικά αποδοτικά κανάλια ανάλογα με τις συγκεκριμένες συνθήκες. Η μείωση της έντασης εκπομπών των ανακατασκευασμένων προϊόντων ωφελεί περισσότερο το περιβάλλον παρά για τα νέα προϊόντα.

Vogt Duberg, Sundin, and Tang (2024)	Συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση που κατηγοριοποιεί οικονομικά μοντέλα για ανακατασκευή με βάση τις απαιτήσεις δεδομένων και το επίπεδο υποστήριξης υπολογιστή.	Τα υπάρχοντα οικονομικά μοντέλα συχνά στερούνται πρακτικής εφαρμογής σε πραγματικές συνθήκες, ιδιαίτερα για βιομηχανίες που είναι νέες στην ανακατασκευή.
Nikolic and Kostic-Stankovic (2022)	Μοντέλο δομικών εξισώσεων (SEM) με δεδομένα από 642 συμμετέχοντες για την ανάλυση του αντίκτυπου των προτιμήσεων στυλ μόδας στις προσφορές προϊόντων, τις στρατηγικές προώθησης και τη συμπεριφορά των καταναλωτών κατά τη διάρκεια του COVID-19.	Οι προτιμήσεις στυλ μόδας επηρεάζουν σημαντικά τη συχνότητα κατανάλωσης ρούχων. Η ευθυγράμμιση των επιχειρηματικών στρατηγικών με τη συμπεριφορά των καταναλωτών μπορεί να ενισχύσει την οικονομική βιωσιμότητα.
Ovchinnikov et al. (2014)	Αναλυτικό μοντέλο σε συνδυασμό με μελέτη συμπεριφοράς και αριθμητικές προσομοιώσεις για την αξιολόγηση του αντίκτυπου της ανακατασκευής στην ζήτηση	Η ανακατασκευή μπορεί να ευθυγραμμίσει τους οικονομικούς και περιβαλλοντικούς στόχους, ενισχύοντας την κερδοφορία και μειώνοντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Η θετική στάση μπορεί να μειώσει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις χωρίς να επηρεάσει τις τιμές των νέων προϊόντων.
Al-Ashhab (2022)	Μοντέλο σχεδιασμού SCN πολλαπλών στόχων που χρησιμοποιεί μια λεξικογραφική διαδικασία για την εξισορρόπηση των στόχων οικονομικής, περιβαλλοντικής και κοινωνικής βιωσιμότητας. Αναλύθηκαν έξι σενάρια με διαφορετικές αντικειμενικές προτεραιότητες.	Η επιλογή της βέλτιστης πηγής ενέργειας και οι τρόποι μεταφοράς επηρεάζουν σημαντικά την περιβαλλοντική βιωσιμότητα και την οικονομική αποδοτικότητα.

4.6 Σχεδιασμός δικτύου εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου

Ο σχεδιασμός δικτύων εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου (CLSC) είναι ένα σύνθετο έργο που απαιτεί την εξέταση πολλών αλληλένδετων παραγόντων, όπως η οικονομική απόδοση, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις, η διαχείριση κινδύνου και η εταιρική κοινωνική ευθύνη (Ramezani et al., 2014; Pedram et al., 2017). Αυτή η ενότητα διερευνά την πολύπλευρη φύση του σχεδιασμού δικτύου CLSC, υπογραμμίζοντας την ανάγκη για ολοκληρωμένες προσεγγίσεις που μπορούν να αντιμετωπίσουν τόσο την προς τα εμπρός, όσο και την αντίστροφη εφοδιαστική, επιτυγχάνοντας παράλληλα βιωσιμότητα και ανθεκτικότητα.

Μια θεμελιώδης πτυχή του σχεδιασμού του δικτύου CLSC είναι η ενσωμάτωση οικονομικών και περιβαλλοντικών στόχων. Τα παραδοσιακά δίκτυα εφοδιαστικής αλυσίδας επικεντρώνονται κυρίως στην ελαχιστοποίηση του κόστους που σχετίζεται με την παραγωγή και τη διανομή, αλλά τα δίκτυα CLSC πρέπει επίσης να λαμβάνουν υπόψη το κόστος των επιστροφών προϊόντων, της ανάκτησης και της ανακατασκευής (Huang et al., 2020; Pazhani et al., 2013). Αυτό απαιτεί μια διπλή ή πολλαπλών στόχων προσέγγιση βελτιστοποίησης που εξισορροπεί την αποδοτικότητα κόστους με την περιβαλλοντική απόδοση. Για παράδειγμα, μελέτες έχουν δείξει ότι η ενσωμάτωση των εκπομπών άνθρακα σε μοντέλα σχεδιασμού δικτύων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές μειώσεις των περιβαλλοντικών επιπτώσεων χωρίς να διακυβεύεται η οικονομική απόδοση (Huang et al., 2020; Pazhani & Ravi, 2018). Με την ενσωμάτωση αυτών των διπλών στόχων, ο σχεδιασμός του δικτύου CLSC μπορεί να συμβάλει σε πιο βιώσιμες πρακτικές εφοδιαστικής αλυσίδας που ευθυγραμμίζονται τόσο με τους εταιρικούς όσο και με τους ρυθμιστικούς στόχους.

Η πρόκληση της διαχείρισης τόσο των προς τα εμπρός, όσο και των αντίστροφων ροών σε ένα CLSC περιπλέκεται περαιτέρω από την ανάγκη χειρισμού ποικίλων ποιοτήτων προϊόντων και σταδίων κύκλου ζωής (Jeihoonian et al., 2014· Akcali et al., 2009). Ο αποτελεσματικός σχεδιασμός δικτύου πρέπει να φιλοξενεί προϊόντα σε διαφορετικά σημεία του κύκλου ζωής τους, από την αρχή έως το τέλος του κύκλου ζωής τους, και να διαχειρίζεται τις ροές υλικοτεχνικής υποστήριξης ανάλογα. Αυτό απαιτεί τη στρατηγική θέση των εγκαταστάσεων, όπως τα κέντρα συλλογής και

τα εργοστάσια ανακατασκευής, για τη βελτιστοποίηση της ανάκτησης και της επανεπεξεργασίας των επιστρεφόμενων προϊόντων. Η λεπτομερής κατανόηση της ποιότητας των επιστροφών είναι ζωτικής σημασίας, καθώς επηρεάζει το κόστος και τη σκοπιμότητα των εργασιών ανακατασκευής. Για παράδειγμα, η διαφοροποίηση μεταξύ επιστροφών υψηλής ποιότητας που μπορούν εύκολα να ανακατασκευαστούν και επιστροφών χαμηλής ποιότητας που μπορεί να είναι κατάλληλες μόνο για ανάκτηση υλικών μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την αποτελεσματικότητα του δικτύου και να μειώσει το κόστος (Jeihoonian et al., 2014; Akcali et al., 2009) .

Η διαχείριση κινδύνου είναι ένα άλλο κρίσιμο στοιχείο στο σχεδιασμό του δικτύου CLSC. Οι αλυσίδες εφοδιασμού είναι ευάλωτες σε διάφορες διακοπές, συμπεριλαμβανομένων ζητημάτων ποιότητας προμηθευτών, καθυστερήσεων μεταφοράς και διακυμάνσεων της αγοράς (Jabbarzadeh et al., 2018; Prakash et al., 2017). Ο σχεδιασμός ενός ανθεκτικού δικτύου CLSC απαιτεί την ενσωμάτωση στρατηγικών μετριασμού του κινδύνου, όπως η πλευρική μεταφόρτωση και η ευέλικτη κατανομή χωρητικότητας. Αυτές οι στρατηγικές βοηθούν να διασφαλιστεί ότι η αλυσίδα εφοδιασμού μπορεί να συνεχίσει να λειτουργεί αποτελεσματικά ακόμη και αν υπάρχουν διακοπές. Για παράδειγμα, η χρήση της πλευρικής μεταφόρτωσης ως αντιδραστικό μέτρο μπορεί να μειώσει σημαντικά την ευπάθεια της εφοδιαστικής αλυσίδας επιτρέποντας την ανακατανομή των πόρων και των προϊόντων σε διαφορετικές τοποθεσίες (Jabbarzadeh et al., 2018). Επιπλέον, η ενσωμάτωση σεναρίων κινδύνου στην αρχική διαδικασία σχεδιασμού δικτύου μπορεί να οδηγήσει σε πιο ισχυρές διαμορφώσεις που είναι καλύτερα εξοπλισμένες για να χειρίζονται απροσδόκητα γεγονότα, αν και με μέτρια αύξηση του κόστους (Prakash et al., 2017).

Η ανταγωνιστική δυναμική των CLSC παίζει επίσης σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό του δικτύου. Στις αγορές που λειτουργούν πολλαπλά συστήματα κλειστού βρόχου, οι εταιρείες πρέπει να εξετάσουν προσεκτικά τις στρατηγικές τιμολόγησης και επιστροφής προϊόντων για να διατηρήσουν την ανταγωνιστικότητα (Fallah et al., 2015). Οι ανταγωνιστικές πιέσεις μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τον όγκο των αποδόσεων και την κερδοφορία των δραστηριοτήτων ανακατασκευής. Τα μοντέλα θεωρίας παιγνίων έχουν χρησιμοποιηθεί για την ανάλυση αυτών των δυναμικών, παρέχοντας πληροφορίες για το πώς οι εταιρείες μπορούν να βελτιστοποιήσουν τις στρατηγικές τους έναντι του ανταγωνισμού (Fallah et al., 2015). Τέτοια μοντέλα

μπορούν να βοηθήσουν τις εταιρείες να κατανοήσουν την αλληλεπίδραση μεταξύ των τιμών λιανικής, των κινήτρων των καταναλωτών και του μεριδίου αγοράς, καθοδηγώντας τελικά το σχεδιασμό ενός δικτύου που μεγιστοποιεί την κερδοφορία διατηρώντας παράλληλα τη βιωσιμότητα.

Μια άλλη σημαντική πτυχή του σχεδιασμού του δικτύου CLSC είναι η ενσωμάτωση της εταιρικής κοινωνικής ευθύνης (CSR) στη διαδικασία λήψης αποφάσεων (Pedram et al., 2017). Αν και η κύρια εστίαση των αλυσίδων εφοδιασμού ήταν παραδοσιακά στην οικονομική αποδοτικότητα, αναγνωρίζεται όλο και περισσότερο ότι οι κοινωνικοί παράγοντες, όπως η δημιουργία θέσεων εργασίας και ο αντίκτυπος στην κοινότητα, πρέπει επίσης να λαμβάνονται υπόψη. Η ενσωμάτωση της ΕΚΕ στον σχεδιασμό του CLSC μπορεί να οδηγήσει σε πιο κοινωνικά υπεύθυνες επιχειρηματικές πρακτικές και να ενισχύσει τη δημόσια εικόνα της εταιρείας. Τα μοντέλα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων που περιλαμβάνουν μετρήσεις ΕΚΕ, όπως η δημιουργία απασχόλησης ή η ευημερία της κοινότητας, μπορούν να παρέχουν στους λήπτες αποφάσεων μια ευρύτερη προοπτική σχετικά με τον αντίκτυπο των λειτουργιών της εφοδιαστικής τους αλυσίδας (Pedram et al., 2017). Εξισορροπώντας οικονομικούς και κοινωνικούς στόχους, οι εταιρείες μπορούν να σχεδιάσουν δίκτυα εφοδιαστικής αλυσίδας που υποστηρίζουν ευρύτερους στόχους βιωσιμότητας.

Μια βασική πρόκληση στην πρακτική εφαρμογή των σχεδίων δικτύων CLSC είναι η πολυπλοκότητα των εφαρμογών του πραγματικού κόσμου (Easwaran & Uster, 2010; Akcali et al., 2009). Ενώ πολλά μοντέλα είναι θεωρητικά σωστά, η εφαρμογή τους σε βιομηχανικές ρυθμίσεις συχνά περιορίζεται από τη διαθεσιμότητα δεδομένων και τους υπολογιστικούς περιορισμούς. Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, πρόσφατες μελέτες έχουν επικεντρωθεί στην ανάπτυξη πιο προσιτών και φιλικών προς τον χρήστη μοντέλων που μπορούν να εφαρμοστούν από βιομηχανίες με διαφορετικά επίπεδα εξειδίκευσης στη διαχείριση CLSC (Vogt Duberg et al., 2024). Η χρήση προηγμένων τεχνικών λύσεων έχει βελτιώσει σημαντικά την υπολογιστική απόδοση αυτών των μοντέλων, καθιστώντας τα πιο εφαρμόσιμα σε μεγάλης κλίμακας, πραγματικά προβλήματα (Easwaran & Uster, 2010).

Τέλος, νομοθετικοί και ρυθμιστικοί παράγοντες διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των σχεδίων δικτύων CLSC (Pazhani et al., 2013; Dou & Cao, 2020). Κανονισμοί όπως οι φόροι άνθρακα και τα συστήματα εκτεταμένης ευθύνης

παραγωγού (EPR) δημιουργούν πρόσθετους περιορισμούς και κίνητρα που επηρεάζουν τη διαμόρφωση των δικτύων CLSC. Για παράδειγμα, οι φορολογικοί κανονισμοί για τον άνθρακα μπορούν να κάνουν την ανακατασκευή πιο ελκυστική οικονομικά, τιμωρώντας τη νέα παραγωγή υψηλής έντασης εκπομπών (Dou & Cao, 2020). Ομοίως, οι κανονισμοί EPR μπορούν να οδηγήσουν τις εταιρείες να σχεδιάσουν δίκτυα που μεγιστοποιούν την ανάκτηση προϊόντων στο τέλος του κύκλου ζωής τους, ώστε να συμμορφώνονται με τις κανονιστικές απαιτήσεις και να αποφεύγουν κυρώσεις. Αυτές οι ρυθμιστικές πιέσεις απαιτούν μια προορατική προσέγγιση στο σχεδιασμό του δικτύου που προβλέπει και ενσωματώνει πιθανές νομοθετικές αλλαγές.

Συνολικά, ο σχεδιασμός των δικτύων CLSC περιλαμβάνει μια λεπτή ισορροπία μεταξύ της οικονομικής απόδοσης, της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας, της διαχείρισης κινδύνου, της ανταγωνιστικής στρατηγικής και της κοινωνικής ευθύνης (Ramezani et al., 2014; Huang et al., 2020; Pedram et al., 2017). Η επίτευξη αυτής της ισορροπίας απαιτεί ολοκληρωμένα μοντέλα που μπορούν να αντιμετωπίσουν πολλαπλούς στόχους ταυτόχρονα και να προσαρμοστούν στην περίπλοκη δυναμική των αλυσίδων εφοδιασμού του πραγματικού κόσμου. Ενσωματώνοντας αυτές τις διαφορετικές εκτιμήσεις στη διαδικασία σχεδιασμού του δικτύου, οι εταιρείες μπορούν να δημιουργήσουν ισχυρές, βιώσιμες και ανθεκτικές αλυσίδες εφοδιασμού που υποστηρίζουν τη μακροπρόθεσμη επιχειρηματική επιτυχία και συμβάλλουν σε ευρύτερους στόχους βιωσιμότητας.

Πίνακας 6. Έρευνες για τον σχεδιασμό δικτύου εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου

Συγγραφέας	Μεθοδολογία	Αποτελέσματα
Ramezani et al. (2014)	Μαθηματικό μοντέλο που ενσωματώνει οικονομικές πτυχές όπως περιουσιακά στοιχεία, υποχρεώσεις και δημοσιονομικούς περιορισμούς στον σχεδιασμό του CLSC. Αντικαθιστά τον παραδοσιακό στόχο κέρδους/κόστους με μια αλλαγή στη μέτρηση της καθαρής θέσης.	Η προτεινόμενη χρηματοοικονομική προσέγγιση έχει ως αποτέλεσμα μεγαλύτερη αλλαγή στα ίδια κεφάλαια σε σύγκριση με τις παραδοσιακές μεθόδους, η οποία επικυρώνεται μέσω ανάλυσης ευαισθησίας με χρήση ANOVA σε διαφορετικά πρότυπα παραγγελιών πελατών.
Jeihoonian et al. (2014)	Μοντέλο προγραμματισμού μικτού ακέραιου αριθμού που χρησιμοποιεί την αποσύνθεση Benders για τη βελτιστοποίηση της τοποθεσίας της εγκατάστασης και τη διαχείριση των φυσικών ροών για ανθεκτικά προϊόντα, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικά επίπεδα ποιότητας αποδόσεων.	Το προτεινόμενο μοντέλο βελτιστοποιεί αποτελεσματικά το σχεδιασμό του δικτύου και καταδεικνύει τον αντίκτυπο της διαφοροποίησης της ποιότητας στην απόδοση του δικτύου.
Huang et al. (2020)	Μοντέλο προγραμματισμού μικτού ακέραιου διπλού στόχου που χρησιμοποιεί τη μέθοδο Epsilon για να εξισορροπήσει τον έλεγχο του κόστους και τις μειώσεις εκπομπών CO ₂ , αντιμετωπίζοντας τις αβεβαιότητες στη ζήτηση.	Το μοντέλο παρέχει αξιόπιστες λύσεις, υπογραμμίζοντας τη σημασία των λειτουργιών της εγκατάστασης στον επηρεασμό του κόστους και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων.
Jabbarzadeh et al. (2018)	Το στοχαστικό μοντέλο βελτιστοποίησης που ενσωματώνει πλευρική μεταφόρτωση για τον μετριασμό των κινδύνων διακοπής, επιλύθηκε χρησιμοποιώντας έναν αλγόριθμο Lagrangian.	Το μοντέλο μειώνει σημαντικά την ευπάθεια της εφοδιαστικής αλυσίδας αξιοποιώντας την πλευρική μεταφόρτωση, η οποία επικυρώθηκε μέσω μιας μελέτης περίπτωσης στη βιομηχανία γυαλιού.

Easwaran and Uster (2010)	Μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού μικτού ακέрайου για σχεδιασμό δικτύου logistics κλειστού βρόχου πολλαπλών προϊόντων χρησιμοποιώντας την αποσύνθεση του Benders με ενισχυμένες περικοπές για υπολογιστική απόδοση.	Η ταυτόχρονη χρήση ενισχυμένων περικοπών οδηγεί σε πιο αυστηρά όρια και πιο αποτελεσματική επίλυση προβλημάτων, βελτιώνοντας σημαντικά την απόδοση του αλγορίθμου.
Akcali et al. (2009)	Σχολιασμένη βιβλιογραφία που εξετάζει μοντέλα και προσεγγίσεις λύσεων για σχεδιασμό δικτύου εφοδιαστικής αλυσίδας αντίστροφου και κλειστού βρόχου.	Εντοπίζει κενά στην υπάρχουσα βιβλιογραφία και υπογραμμίζει την ανάγκη για πιο ολοκληρωμένα μοντέλα λαμβάνοντας υπόψη τόσο οικονομικούς όσο και περιβαλλοντικούς στόχους.
Pazhani and Ravi (2018)	Μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού μεικτού-ακέрайου δικριτηρίου για το σχεδιασμό ενός δικτύου CLSC τεσσάρων σταδίων, με την αντιμετώπιση οικονομικών και περιβαλλοντικών στόχων.	Το μοντέλο παρέχει στρατηγικές λύσεις για τη βελτίωση της απόδοσης και της βιωσιμότητας του CLSC, ειδικά στη διαχείριση της χρήσης ενέργειας στις εγκαταστάσεις και κατά τη μεταφορά.
Fallah et al. (2015)	Θεωρητική προσέγγιση παιγνίων που ενισχύεται από τη θεωρία πιθανοτήτων για τη μοντελοποίηση του ανταγωνισμού μεταξύ δύο CLSC υπό αβέβαιες συνθήκες αγοράς.	Η ένταση του ανταγωνισμού επηρεάζει σημαντικά την κερδοφορία και τον όγκο των επιστρεφόμενων προϊόντων, δίνοντας έμφαση στο ρόλο της βέλτιστης τιμολόγησης και των κινήτρων απόδοσης.
Pedram et al. (2017)	Μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού πολλαπλών στόχων μεικτού ακέрайου που ενσωματώνει στόχους EKE, επιλύθηκε με χρήση NSGA-II και ασαφούς θεωρίας συνόλων για επιλογή συμβιβαστικής λύσης.	Η ενσωμάτωση της EKE στον σχεδιασμό του CLSC επηρεάζει σημαντικά τη λήψη αποφάσεων, υποστηρίζοντας βιώσιμες και κοινωνικά υπεύθυνες πρακτικές.

Pazhani et al. (2013)	Μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού μεικτού ακέрайου διπλού στόχου για σχεδιασμό δικτύου CLSC πολλαπλών περιόδων και προϊόντων, χρησιμοποιώντας τεχνικές προγραμματισμού στόχων και συμβιβασμούς.	Το μοντέλο ενισχύει σημαντικά τη λειτουργική αποτελεσματικότητα και τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας σε CLSC, επικυρωμένα μέσω μιας μελέτης περίπτωσης.
Prakash et al. (2017)	Μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού μικτού ακέрайου για σχεδιασμό CLSC υπό τους κινδύνους εφοδιασμού και logistics, δίνοντας έμφαση στην ποιότητα του προμηθευτή και στις διακοπές μεταφοράς.	Η συμπερίληψη παραγόντων κινδύνου στη διαδικασία σχεδιασμού έχει ως αποτέλεσμα μια πιο στιβαρή διαμόρφωση δικτύου, με μέτριο ασφάλιστρο κόστους που βελτιώνει την ανθεκτικότητα.

4.7 Στρατηγικές ανάκτησης και ανακατασκευής προϊόντων

Οι στρατηγικές ανάκτησης προϊόντων και ανακατασκευής είναι κρίσιμα στοιχεία των συστημάτων εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου (CLSC) που στοχεύουν στην εξισορρόπηση των οικονομικών κερδών με την περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Αυτές οι στρατηγικές περιλαμβάνουν τον συστηματικό χειρισμό των επιστρεφόμενων προϊόντων μέσω διαδικασιών όπως η επισκευή, η ανακατασκευή, η ανακύκλωση και η σωστή απόρριψη, ανάλογα με την ποιότητα και τη χρηστικότητα των επιστρεφόμενων αντικειμένων (Liao, 2018; Özkir & Başlıgil, 2011). Ο πρωταρχικός στόχος είναι η ανάκτηση της αξίας των χρησιμοποιημένων προϊόντων με παράλληλη ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και η διατήρηση των πόρων, ευθυγραμμίζοντας με τις αρχές μιας κυκλικής οικονομίας (Govindan et al., 2016; Dutta et al., 2016).

Οι αποτελεσματικές στρατηγικές ανάκτησης προϊόντων απαιτούν ισχυρό σχεδιασμό δικτύου και μοντέλα βελτιστοποίησης που μπορούν να φιλοξενήσουν την πολυπλοκότητα της αντίστροφης εφοδιαστικής. Αυτό περιλαμβάνει όχι μόνο τον

προσδιορισμό των βέλτιστων τοποθεσιών για εγκαταστάσεις συλλογής και ανακατασκευής, αλλά και τη διαχείριση της ροής των επιστρεφόμενων προϊόντων με βάση την ποιότητά τους και τις δυνατότητές τους για ανάκτηση (Fleischmann et al., 2001; Jeihoonian et al., 2016). Μια κρίσιμη πτυχή είναι η διαφοροποίηση της επιστροφής προϊόντων ανά ποιότητα, καθώς οι ποικίλες συνθήκες των επιστρεφόμενων αντικειμένων επηρεάζουν το κόστος και τη σκοπιμότητα διαφορετικών διαδικασιών ανάκτησης (Jeihoonian et al., 2016; Guo et al., 2018). Για παράδειγμα, οι επιστροφές υψηλής ποιότητας μπορούν να ανακατασκευαστούν απευθείας, ενώ τα είδη χαμηλής ποιότητας μπορεί να χρειαστεί να ανακυκλωθούν ή ακόμα και να απορριφθούν, ανάλογα με το επίπεδο υποβάθμισης (Özgir & Başlıgil, 2011; Qiang, 2015).

Η ενσωμάτωση της ανάκτησης προϊόντων στα δίκτυα CLSC απαιτεί επίσης προσεκτική εξέταση των οικονομικών και λειτουργικών παραγόντων. Για παράδειγμα, η ανάπτυξη αποτελεσματικών συστημάτων επαναγοράς μπορεί να δώσει κίνητρα στους καταναλωτές να επιστρέψουν μεταχειρισμένα προϊόντα, αυξάνοντας έτσι τον όγκο των ανακτήσιμων υλικών και υποστηρίζοντας τη συνολική αποτελεσματικότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας (Dutta et al., 2016; Guo et al., 2018). Ωστόσο, το κόστος που σχετίζεται με αυτά τα συστήματα, όπως οι τιμές επαναγοράς και τα έξοδα υλικοτεχνικής υποστήριξης, πρέπει να εξισορροπηθούν με τα οφέλη από τα αυξημένα ποσοστά απόδοσης και τη βελτιωμένη περιβαλλοντική απόδοση (Dutta et al., 2016; Pratharage et al., 2023). Σε ορισμένες περιπτώσεις, η προσφορά κινήτρων επαναγοράς μπορεί να οδηγήσει σε υψηλότερο κόστος απόκτησης, αλλά μπορεί να δικαιολογηθεί από τα επακόλουθα οφέλη όσον αφορά την ανάκτηση πόρων και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Dutta et al., 2016).

Η ανακατασκευή, μια βασική διαδικασία ανάκαμψης στα CLSC, παρουσιάζει ευκαιρίες και προκλήσεις. Επιτρέπει στις εταιρείες να επεκτείνουν τον κύκλο ζωής των προϊόντων και των εξαρτημάτων, μειώνοντας την ανάγκη για νέα υλικά και ελαχιστοποιώντας τα απόβλητα (Govindan et al., 2016; Beamon & Fernandes, 2004). Ωστόσο, η ανακατασκευή απαιτεί ακριβή συντονισμό των διαφόρων δραστηριοτήτων της εφοδιαστικής αλυσίδας, συμπεριλαμβανομένης της συλλογής, της επιθεώρησης, της αποσυναρμολόγησης και της επανασυναρμολόγησης (Fleischmann et al., 2001; Liao, 2018). Η κερδοφορία της ανακατασκευής επηρεάζεται από παράγοντες όπως η ποιότητα των επιστρεφόμενων προϊόντων, το κόστος της επανεπεξεργασίας και η

ζήτηση της αγοράς για ανακατασκευασμένα αγαθά (Govindan et al., 2016; Qiang, 2015). Οι αποτελεσματικές στρατηγικές ανακατασκευής πρέπει να λάβουν υπόψη αυτές τις μεταβλητές, βελτιστοποιώντας την κατανομή των πόρων και την παραγωγική ικανότητα για την κάλυψη των διακυμάνσεων της ζήτησης και των ποιοτικών διακυμάνσεων στα επιστρεφόμενα προϊόντα (Jeihoonian et al., 2016; Guo et al., 2018).

Ο στρατηγικός σχεδιασμός για την ανακατασκευή είναι άλλος ένας κρίσιμος παράγοντας στον σχεδιασμό του CLSC. Αυτό περιλαμβάνει το σχεδιασμό προϊόντων με χαρακτηριστικά που διευκολύνουν την ευκολότερη αποσυναρμολόγηση και επανασυναρμολόγηση, μειώνοντας έτσι τον χρόνο και το κόστος που σχετίζεται με τις διαδικασίες ανακατασκευής (Qiang, 2015; Guo et al., 2018). Για παράδειγμα, τα αρθρωτά σχέδια προϊόντων επιτρέπουν την αντικατάσταση ή την ανακαίνιση μεμονωμένων εξαρτημάτων χωρίς την ανάγκη ανακατασκευής ολόκληρου του προϊόντος, ενισχύοντας την ευελιξία και την αποτελεσματικότητα της διαδικασίας ανάκτησης (Jeihoonian et al., 2016; Qiang, 2015). Η ενσωμάτωση αυτών των αρχών σχεδιασμού μπορεί επίσης να βοηθήσει στη διαχείριση του κινδύνου κανιβαλισμού της ζήτησης, όπου τα ανακατασκευασμένα προϊόντα ανταγωνίζονται τα νέα προϊόντα, επηρεάζοντας δυνητικά τη συνολική κερδοφορία (Ovchinnikov et al., 2014).

Οι περιβαλλοντικοί κανονισμοί και οι πολιτικές διαδραματίζουν σημαντικό ρόλο στη διαμόρφωση των στρατηγικών ανάκτησης προϊόντων εντός των CLSCs (Govindan et al., 2016; Dutta et al., 2016). Τα κυβερνητικά κίνητρα, όπως οι επιδοτήσεις για δραστηριότητες ανακατασκευής ή οι κυρώσεις για μη συμμόρφωση με τους στόχους ανακύκλωσης, μπορούν να ενθαρρύνουν τις εταιρείες να υιοθετήσουν πιο βιώσιμες πρακτικές (Guo et al., 2018). Αυτοί οι κανονισμοί συχνά επιβάλλουν συγκεκριμένα ποσοστά ανάκτησης ή θέτουν όρια στη διάθεση ηλεκτρονικών απορριμμάτων, οδηγώντας έτσι την ανάγκη για αποτελεσματικά συστήματα ανάκτησης και ανακατασκευής (Govindan et al., 2016; Guo et al., 2018). Η συμμόρφωση με τέτοιους κανονισμούς μπορεί επίσης να ενισχύσει τη φήμη μιας εταιρείας και να ευθυγραμμίσει τις δραστηριότητές της με ευρύτερους στόχους βιωσιμότητας (Dutta et al., 2016; Guo et al., 2018).

Επιπλέον, ο ρόλος της τεχνολογίας στη βελτιστοποίηση της ανάκτησης και της ανακατασκευής προϊόντων δεν μπορεί να υπερεκτιμηθεί. Οι προηγμένες τεχνολογίες όπως η τεχνητή νοημοσύνη (AI), το Διαδίκτυο των πραγμάτων (IoT) και η ανάλυση

μεγάλων δεδομένων μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα των λειτουργιών ανάκτησης παρέχοντας δεδομένα σε πραγματικό χρόνο για τις συνθήκες του προϊόντος, βελτιστοποιώντας τη δρομολόγηση και τον προγραμματισμό και προβλέποντας μελλοντικές ροές επιστροφής (Liao, 2018; Jeihoonian et al., 2016). Αυτές οι τεχνολογίες μπορούν επίσης να διευκολύνουν την ανάπτυξη έξυπνων προϊόντων που έχουν σχεδιαστεί για ευκολότερη ανάκτηση και ανακατασκευή, υποστηρίζοντας περαιτέρω τους στόχους των CLSCs (Jeihoonian et al., 2016).

Παρά τα πιθανά οφέλη, εξακολουθούν να υπάρχουν αρκετές προκλήσεις στην εφαρμογή αποτελεσματικών στρατηγικών ανάκτησης και ανακατασκευής προϊόντων. Ένα από τα κύρια ζητήματα είναι η αβεβαιότητα που σχετίζεται με την ποιότητα και το χρονοδιάγραμμα των επιστροφών προϊόντων, γεγονός που μπορεί να περιπλέξει τον προγραμματισμό και την κατανομή των πόρων (Jeihoonian et al., 2016; Dutta et al., 2016). Για να αντιμετωπιστεί αυτό, είναι απαραίτητα ισχυρά στοχαστικά μοντέλα που μπορούν να φιλοξενήσουν την αβεβαιότητα και τη μεταβλητότητα στις ροές επιστροφής (Jeihoonian et al., 2016; Guo et al., 2018). Επιπλέον, το υψηλό αρχικό κόστος της δημιουργίας εγκαταστάσεων ανάκτησης και ανακατασκευής μπορεί να αποτελέσει εμπόδιο, ιδιαίτερα για τις μικρές και μεσαίες επιχειρήσεις (MME) (Beamon & Fernandes, 2004; Dutta et al., 2016). Η ανάπτυξη επεκτάσιμων και οικονομικά αποδοτικών λύσεων που μπορούν να προσαρμοστούν στις ανάγκες διαφορετικών βιομηχανιών είναι ζωτικής σημασίας για την ευρεία υιοθέτηση των CLSC (Jeihoonian et al., 2016; Dutta et al., 2016).

Συμπερασματικά, οι στρατηγικές ανάκτησης προϊόντων και ανακατασκευής αποτελούν αναπόσπαστο κομμάτι της επιτυχούς εφαρμογής των CLSC. Αυτές οι στρατηγικές υποστηρίζουν την κυκλική οικονομία επεκτείνοντας τον κύκλο ζωής προϊόντων και εξαρτημάτων και προσφέρουν επίσης οικονομικά οφέλη μέσω της εξοικονόμησης κόστους και της διατήρησης των πόρων (Govindan et al., 2016; Beamon & Fernandes, 2004). Ωστόσο, η επίτευξη αυτών των πλεονεκτημάτων απαιτεί προσεκτικό σχεδιασμό, ενσωμάτωση προηγμένων τεχνολογιών και ευθυγράμμιση με τις κανονιστικές απαιτήσεις (Jeihoonian et al., 2016; Guo et al., 2018). Υιοθετώντας μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη τις πολυπλοκότητες της ανάκτησης και της ανακατασκευής προϊόντων, οι εταιρείες μπορούν να ενισχύσουν τη βιωσιμότητα και την ανθεκτικότητα των αλυσίδων εφοδιασμού τους, συμβάλλοντας σε

ευρύτερους περιβαλλοντικούς και οικονομικούς στόχους (Govindan et al., 2016; Dutta et al., 2016).

Πίνακας 7. Έρευνες για τις στρατηγικές ανάκτησης και ανακατασκευής προϊόντων

Συγγραφέας	Μεθοδολογία	Αποτελέσματα
Liao (2018)	Ανέπτυξε ένα μοντέλο μη γραμμικού προγραμματισμού μεικτού ακέραιου (MINLP) χρησιμοποιώντας έναν υβριδικό γενετικό αλγόριθμο (GA) για αντίστροφη επιμελητεία πολλαπλών κλιμακίων. Επικυρώθηκε μέσω μιας πραγματικής μελέτης περίπτωσης στην Ταϊβάν.	Το μοντέλο ξεπερνά σημαντικά τις υπάρχουσες λειτουργίες αντίστροφης εφοδιαστικής όσον αφορά την κερδοφορία και τη βιωσιμότητα. Η ανάλυση ευαισθησίας επιβεβαιώνει την ευρωστία σε διάφορες παραμέτρους.
Özker and Başlıgil (2011)	Μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού μικτού ακέραιου για σχεδιασμό δικτύου CLSC, εστιάζοντας σε διαδικασίες ανάκτησης υλικού, εξαρτημάτων και προϊόντων. Η αριθμητική ανάλυση αξιολογεί την επίδραση των όγκων και της ποιότητας των επιστροφών στην απόδοση.	Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι οι όγκοι και η ποιότητα των επιστροφών επηρεάζουν σημαντικά την κερδοφορία και τη βιωσιμότητα των δικτύων CLSC. Η στρατηγική ολοκλήρωση των διαδικασιών ανάκτησης προϊόντων είναι κρίσιμης σημασίας.
Fleischmann et al. (2001)	Ανέπτυξε ένα γενικό μοντέλο τοποθεσίας εγκαταστάσεων για το σχεδιασμό δικτύων εφοδιαστικής, που να καλύπτει τις ροές των χρησιμοποιημένων και ανακτημένων προϊόντων. Εφαρμόζεται σε διάφορες μελέτες περιπτώσεων.	Η ενσωμάτωση της ανάκτησης προϊόντων στα δίκτυα logistics εξαρτάται από το πλαίσιο, και απαιτεί διαφορετικές στρατηγικές για αποτελεσματική εφαρμογή.
Prathapage et al. (2023)	Συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με την	Η ανακύκλωση και η ανακατασκευή είναι κυρίαρχες, αλλά

	ανάκτηση προϊόντων στα δίκτυα CLSC, κατηγοριοποίηση επιλογών ανάκτησης και εντοπισμός ερευνητικών κενών.	υποεξερεύνητες πτυχές, όπως η ανακαίνιση, έχουν σημαντικές δυνατότητες. Ανάγκη για σαφέστερους ορισμούς και ευθυγράμμιση των ενδιαφερομένων.
Govindan et al. (2016)	Μικτό ακέραιο μοντέλο πολλαπλών στόχων που βελτιστοποιεί τις οικονομικές, περιβαλλοντικές και κοινωνικές διαστάσεις του CLSC. Μελέτη περίπτωσης από την ηλεκτροπαραγωγική βιομηχανία.	Το μοντέλο εξισορροπεί τα οικονομικά οφέλη με τις περιβαλλοντικές και κοινωνικές ευθύνες. Η ανάλυση ευαισθησίας αποκαλύπτει πληροφορίες σχετικά με τη διαχείριση των ποσοστών ζήτησης και απόδοσης.
Beamon and Fernandes (2004)	Μοντέλο ακέραίου προγραμματισμού πολλαπλών περιόδων για το σχεδιασμό του δικτύου CLSC, που αξιολογεί το κόστος επένδυσης και λειτουργίας με τη μέθοδο της παρούσας αξίας.	Εξειδικευμένοι σχεδιασμοί δικτύων μειώνουν το κόστος και βελτιώνουν τα περιβαλλοντικά αποτελέσματα, τονίζοντας τις διαφορές από τις παραδοσιακές αλυσίδες εφοδιασμού μόνο προς τα εμπρός.
Jeihoonian et al. (2016)	Μοντέλο στοχαστικού προγραμματισμού μικτών ακεραίων δύο σταδίων με μείωση σεναρίου για διαχείριση πολλαπλών επιλογών ανάκτησης υπό αβεβαιότητα.	Η μείωση του σεναρίου και η μεθοδολογία λύσεων παρέχουν λύσεις υψηλής ποιότητας αποτελεσματικά, αντιμετωπίζοντας τη μεταβλητότητα στην ποιότητα των προϊόντων.
Dutta et al. (2016)	Μοντέλο βελτιστοποίησης πολλαπλών περιόδων που ενσωματώνει προσφορές επαναγοράς για την παροχή κινήτρων για αποδόσεις. Αναλύει τις αβεβαιότητες της ζήτησης και της παραγωγικής ικανότητας.	Τα προγράμματα επαναγοράς αυξάνουν τα ποσοστά απόδοσης, ωφελώντας τόσο τους κατασκευαστές όσο και τους λιανοπωλητές στο πλαίσιο συμβάσεων κατανομής εσόδων.
Qiang (2015)	Προσέγγιση μεταβλητής ανισότητας για δίκτυο CLSC δύο περιόδων με ανταγωνιστική δυναμική και σχεδιασμό ανακατασκευής.	Ο στρατηγικός σχεδιασμός ανακατασκευής ενισχύει την ανταγωνιστικότητα και την κερδοφορία, επηρεασμένος από τις

		αντιλήψεις των καταναλωτών και την εξισορρόπηση της παραγωγής.
Guo et al. (2018)	Μοντέλο λειτουργιών που χρησιμοποιεί τη Βελτιστοποίηση Σμήνος Σωματιδίων (PSO) και τον Γενετικό Αλγόριθμο (GA) για βέλτιστες στρατηγικές ανακατασκευής υπό διαταραχές εφοδιασμού.	Η βέλτιστη κατανομή των δυνατοτήτων ανακατασκευής και παραγωγής μετριάζει τις επιπτώσεις της διακοπής του εφοδιασμού. Οι κρατικές επιχορηγήσεις δίνουν κίνητρα για αυξημένες δραστηριότητες ανάκαμψης.

4.8 Συντονισμός εντός των αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου

Ο συντονισμός εντός των αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου (CLSC) είναι ζωτικής σημασίας για την ευθυγράμμιση των στόχων των διαφόρων ενδιαφερομένων που εμπλέκονται στην μελλοντική και αντίστροφη εφοδιαστική, ενισχύοντας τελικά τόσο την οικονομική όσο και την περιβαλλοντική απόδοση. Οι αποτελεσματικοί μηχανισμοί συντονισμού συμβάλλουν στον μετριασμό της εγγενούς πολυπλοκότητας της διαχείρισης των διαδικασιών επιστροφών προϊόντων, ανακύκλωσης και ανακατασκευής, διασφαλίζοντας παράλληλα ότι όλα τα μέρη —κατασκευαστές, έμποροι λιανικής, καταναλωτές και τρίτοι πάροχοι logistics— εργάζονται για κοινούς στόχους (Debo et al., 2004; Heydari et al., 2017). Αυτοί οι μηχανισμοί είναι σημαντικοί για την επίτευξη ενός CLSC που λειτουργεί σωστά που μεγιστοποιεί τη χρήση των πόρων, ελαχιστοποιεί το κόστος και προωθεί βιώσιμες επιχειρηματικές πρακτικές (Zhang et al., 2019; Aydin et al., 2016).

Μία από τις κύριες προκλήσεις στον συντονισμό του CLSC είναι η ευθυγράμμιση των συμφερόντων μεταξύ διαφορετικών εταίρων της εφοδιαστικής αλυσίδας, ο καθένας με τους δικούς του στόχους και περιορισμούς. Για παράδειγμα, οι κατασκευαστές μπορεί να δώσουν προτεραιότητα στη μείωση του κόστους και την αποδοτικότητα της παραγωγής, ενώ οι λιανοπωλητές εστιάζουν στις πωλήσεις και την ικανοποίηση των πελατών και οι καταναλωτές αναζητούν αξία και ευκολία στις επιστροφές προϊόντων (Jian et al., 2021; Aydin et al., 2016). Η παρουσία

αντικρουόμενων στόχων μπορεί να οδηγήσει σε αναποτελεσματικότητα, όπως μη βέλτιστες ροές απόδοσης και κακώς ευθυγραμμισμένα κίνητρα, που μειώνουν τη συνολική κερδοφορία και τη βιωσιμότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας (Debo et al., 2004; Zhang et al., 2019). Για την αντιμετώπιση αυτών των ζητημάτων, έχουν προταθεί διάφοροι μηχανισμοί συντονισμού, συμπεριλαμβανομένων των συμβάσεων κατανομής εσόδων, συμφωνιών επαναγοράς και προγραμμάτων εκπτώσεων ποσότητας, το καθένα σχεδιασμένο να ευθυγραμμίζει εκ νέου τα κίνητρα διαφορετικών ενδιαφερομένων (Heydari et al., 2017; Jian et al., 2021).

Η χρήση συμβατικών συμφωνιών, όπως μοντέλα κατανομής εσόδων και κερδών, έχει αποδειχθεί ότι συντονίζει αποτελεσματικά τις δραστηριότητες της εφοδιαστικής αλυσίδας κατανέμοντας τους κινδύνους και τις ανταμοιβές πιο δίκαια μεταξύ των εταίρων (Zhang et al., 2019; Heydari et al., 2017). Αυτές οι συμβάσεις ενθαρρύνουν τη συνεργασία διασφαλίζοντας ότι όλα τα μέρη επωφελούνται από βελτιώσεις στην απόδοση της αλυσίδας εφοδιασμού. Για παράδειγμα, ένα συμβόλαιο κατανομής εσόδων μπορεί να δώσει κίνητρα στους λιανοπωλητές να συμμετέχουν ενεργά σε προγράμματα επιστροφής και ανακύκλωσης προϊόντων, υποστηρίζοντας έτσι τη συνολική βιωσιμότητα του CLSC (Zhang et al., 2019; Aydin et al., 2016). Ομοίως, τα μοντέλα επιμερισμού των κερδών μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τον μετριασμό των αρνητικών επιπτώσεων των ανησυχιών περί δικαιοσύνης, οι οποίες διαφορετικά μπορούν να οδηγήσουν σε αναποτελεσματικότητα, όπως αυξημένες τιμές λιανικής και μειωμένη περιβαλλοντική απόδοση (Jian et al., 2021).

Οι κυβερνητικές πολιτικές και τα κίνητρα διαδραματίζουν επίσης κεντρικό ρόλο στον συντονισμό των CLSCs δημιουργώντας ένα ευνοϊκό περιβάλλον για βιώσιμες πρακτικές (Heydari et al., 2017). Για παράδειγμα, οι επιδοτήσεις και τα φορολογικά κίνητρα μπορούν να ενθαρρύνουν τους κατασκευαστές να επενδύσουν σε τεχνολογίες ανακατασκευής και ανακύκλωσης, ενώ οι κανονισμοί για την ανάληψη προϊόντων μπορούν να επιβάλλουν την ανάπτυξη αποτελεσματικών δικτύων αντίστροφης εφοδιαστικής (Heydari et al., 2017; Bakajic et al., 2022). Η κρατική παρέμβαση μπορεί να βοηθήσει στην ευθυγράμμιση των ιδιωτικών κινήτρων με τους δημόσιους περιβαλλοντικούς στόχους, προωθώντας έτσι μια πιο βιώσιμη και συντονισμένη αλυσίδα εφοδιασμού.

Οι μηχανισμοί συντονισμού με δυνατότητα τεχνολογίας έχουν γίνει ολοένα και πιο σημαντικοί με την εμφάνιση του Industry 4.0, καθώς τα ψηφιακά εργαλεία όπως το Internet of Things (IoT), το blockchain και τα big data analytics διευκολύνουν μεγαλύτερη ορατότητα και ιχνηλασιμότητα σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού (Bakajic et al., 2022, Singh et al., 2019). Αυτές οι τεχνολογίες επιτρέπουν την ανταλλαγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο μεταξύ των εταιρών της εφοδιαστικής αλυσίδας, βελτιώνοντας τη λήψη αποφάσεων και επιτρέποντας πιο ανταποκρινόμενες και προσαρμοστικές λειτουργίες της εφοδιαστικής αλυσίδας (Singh et al., 2019; Bakajic et al., 2022). Για παράδειγμα, η τεχνολογία blockchain μπορεί να εξασφαλίσει την ακεραιότητα και τη διαφάνεια των πληροφοριών που σχετίζονται με τις επιστροφές προϊόντων και τις διαδικασίες ανακύκλωσης, μειώνοντας έτσι τους κινδύνους απάτης και αναποτελεσματικότητας (Bakajic et al., 2022). Ομοίως, οι συσκευές IoT μπορούν να παρακολουθούν τις συνθήκες των προϊόντων κατά τη μεταφορά και την αποθήκευση, συμβάλλοντας στη βελτιστοποίηση της διαχείρισης του αποθέματος και στη μείωση των απορριμμάτων (Singh et al., 2019).

Ωστόσο, η ενσωμάτωση προηγμένων τεχνολογιών στον συντονισμό του CLSC απαιτεί μια ολιστική προσέγγιση που υπερβαίνει την απλή υιοθέτηση νέων εργαλείων. Περιλαμβάνει την επανεξέταση των παραδοσιακών διαδικασιών και δομών της αλυσίδας εφοδιασμού για την πλήρη αξιοποίηση των δυνατοτήτων των ψηφιακών τεχνολογιών (Singh et al., 2019· Toktaş-Palut, 2022). Για παράδειγμα, μια ολοκληρωμένη στρατηγική ψηφιακού μετασχηματισμού θα πρέπει να περιλαμβάνει την ανάπτυξη νέων επιχειρηματικών μοντέλων, την αναδιαμόρφωση των δικτύων εφοδιαστικής αλυσίδας και την εκπαίδευση των εργαζομένων ώστε να χρησιμοποιούν αυτές τις τεχνολογίες αποτελεσματικά (Singh et al., 2019). Επιπλέον, τα οφέλη της ψηφιοποίησης πρέπει να σταθμίζονται έναντι πιθανών προκλήσεων, όπως οι κίνδυνοι ασφάλειας δεδομένων, το υψηλό κόστος της εφαρμογής της τεχνολογίας και η ανάγκη για σημαντικές αλλαγές στην οργανωτική κουλτούρα και δυνατότητες (Singh et al., 2019; Toktaş-Palut, 2022).

Μια άλλη κρίσιμη πτυχή του συντονισμού του CLSC είναι η διαχείριση της ποιότητας των προϊόντων και των ροών επιστροφής. Ο αποτελεσματικός συντονισμός απαιτεί μηχανισμούς που μπορούν να διαχειριστούν τη μεταβλητότητα στην ποιότητα των επιστρεφόμενων προϊόντων, γεγονός που επηρεάζει σημαντικά την

αποτελεσματικότητα των διαδικασιών ανάκτησης και ανακατασκευής (Zhang et al., 2019; Aydın et al., 2016). Για παράδειγμα, ένα συμβόλαιο κατανομής εσόδων μπορεί να σχεδιαστεί για να λαμβάνει υπόψη την ποιότητα των επιστρεφόμενων προϊόντων, ενθαρρύνοντας τους λιανοπωλητές να επικεντρωθούν στη συλλογή επιστροφών υψηλής ποιότητας που είναι πιο κατάλληλες για ανακατασκευή (Zhang et al., 2019). Επιπλέον, ο στρατηγικός σχεδιασμός γραμμής προϊόντων, ο οποίος περιλαμβάνει ανακατασκευασμένα προϊόντα μαζί με νέα, μπορεί να βοηθήσει τους κατασκευαστές να διαχειριστούν τη ζήτηση για διαφορετικές κατηγορίες προϊόντων, ενώ βελτιστοποιούν τα ποσοστά επιστροφής (Aydın et al., 2016).

Ο συντονισμός εντός των CLSC επεκτείνεται επίσης στο σχεδιασμό και τη διαχείριση δικτύων πολλαπλών κλιμακίων, όπου οι αποφάσεις που σχετίζονται με τη θέση και τη λειτουργία των εγκαταστάσεων πρέπει να λαμβάνονται με τρόπο που να υποστηρίζει τόσο την μπροστινή όσο και την αντίστροφη εφοδιαστική (Debo et al., 2004 Prakash et al. , 2017). Ο συντονισμός πολλαπλών κλιμακίων περιλαμβάνει συγχρονισμό δραστηριοτήτων σε πολλαπλά στάδια της εφοδιαστικής αλυσίδας, συμπεριλαμβανομένης της παραγωγής, της διανομής, της συλλογής και της ανακατασκευής, για την ελαχιστοποίηση του κόστους και τη μεγιστοποίηση της αποδοτικότητας των πόρων (Debo et al., 2004; Prakash et al., 2017). Για παράδειγμα, οι αποφάσεις για την τοποθεσία των εγκαταστάσεων θα πρέπει να λαμβάνουν υπόψη παράγοντες όπως η εγγύτητα με προμηθευτές και πελάτες, το κόστος μεταφοράς και τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο των δραστηριοτήτων εφοδιαστικής (Prakash et al., 2017). Ο αποτελεσματικός συντονισμός σε επίπεδο πολλαπλών κλιμακίων μπορεί να οδηγήσει σε σημαντικές βελτιώσεις στην απόδοση της εφοδιαστικής αλυσίδας, ιδιαίτερα όσον αφορά τη μείωση του χρόνου παράδοσης, του κόστους απογραφής και των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου (Debo et al., 2004; Prakash et al., 2017).

Από την μελέτη της σχετικής βιβλιογραφίας προκύπτει ότι ο συντονισμός είναι μια θεμελιώδης πτυχή της διαχείρισης του CLSC που απαιτεί την ενσωμάτωση διαφόρων μηχανισμών, συμπεριλαμβανομένων των συμβατικών συμφωνιών, των κυβερνητικών πολιτικών, των ψηφιακών τεχνολογιών και του σχεδιασμού πολλαπλών βαθμίδων (Debo et al., 2004; Heydari et al., 2017; Bakajic et al., 2022). Ο επιτυχημένος συντονισμός ευθυγραμμίζει τα κίνητρα των διαφορετικών εταίρων της εφοδιαστικής αλυσίδας και υποστηρίζει επίσης την επίτευξη ευρύτερων στόχων βιωσιμότητας

ενισχύοντας την αποδοτικότητα και την αποτελεσματικότητα των διαδικασιών ανάκτησης, ανακύκλωσης και ανακατασκευής (Zhang et al., 2019; Aydin et al., 2016). Καθώς οι αλυσίδες εφοδιασμού γίνονται όλο και πιο περίπλοκες και διασυνδεδεμένες, η ικανότητα συντονισμού δραστηριοτήτων μεταξύ πολλών ενδιαφερομένων και γεωγραφικών μερών είναι απαραίτητη για την επίτευξη μακροπρόθεσμης βιωσιμότητας και ανταγωνιστικότητας στην παγκόσμια αγορά (Debo et al., 2004; Singh et al., 2019).

Πίνακας 8. Έρευνες για τον συντονισμό εντός των αλυσίδων εφοδιασμού κλειστού βρόχου

Συγγραφέας	Μεθοδολογία	Αποτελέσματα
Debo et al. (2004)	Αναλύθηκαν οι διαδικασίες λήψης αποφάσεων που σχετίζονται με τις επιστροφές προϊόντων σε CLSC χρησιμοποιώντας μελέτες περιπτώσεων και παραδείγματα.	Οι αναποτελεσματικότητες προκύπτουν από την έλλειψη συντονισμού, που οδηγεί σε μη βέλτιστες ροές απόδοσης και κακώς ευθυγραμμισμένα κίνητρα.
Jian et al. (2021)	Χρησιμοποίησε ένα μοντέλο παιχνιδιού Stackelberg για να αναλύσει τη λήψη αποφάσεων και τον συντονισμό με ένα συμβόλαιο κατανομής κερδών.	Η σύμβαση κατανομής κερδών μετριάζει τον αρνητικό αντίκτυπο των ανησυχιών περί δικαιοσύνης, βελτιώνοντας την απόδοση της αλυσίδας εφοδιασμού.
Zhang et al. (2019)	Ανέπτυξαν ένα μοντέλο για CLSC δύο καναλιών με σύμβαση κατανομής εσόδων για τη διαχείριση των επιστροφών προϊόντων.	Η σύμβαση κατανομής εσόδων ενισχύει τα κέρδη και ενθαρρύνει την ανακύκλωση. Οι υπερβολικές βελτιώσεις ποιότητας μπορεί να αποβούν μούμερανγκ.
Heydari et al. (2017)	Τα μοντέλα θεωρίας παιγνίων ανέλυσαν τον συντονισμό σε αντίστροφες αλυσίδες εφοδιασμού με κυβερνητικά κίνητρα.	Τα κυβερνητικά κίνητρα ενισχύουν τον συντονισμό και τα κέρδη, πιο αποτελεσματικό όταν παρέχεται στους κατασκευαστές.
Aydin et al. (2016)	Μοντέλο βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων που χρησιμοποιεί το NSGA-II για σχεδιασμό σειράς προϊόντων,	Ο αποτελεσματικός συντονισμός αυξάνει την κερδοφορία και τα ποσοστά ανάκτησης προϊόντων, υποστηρίζοντας τους στόχους βιωσιμότητας.

	συμπεριλαμβανομένων ανακατασκευασμένων προϊόντων.	
Bakajic et al. (2022)	Ποιοτική έρευνα βασισμένη σε περιπτώσιολογικές μελέτες και συνεντεύξεις σχετικά με τις τεχνολογίες Industry 4.0 σε CLSCs.	Οι ψηφιακές τεχνολογίες όπως το IoT και το blockchain ενισχύουν την ορατότητα και την ιχνηλασιμότητα, βελτιώνοντας τον συντονισμό.
Arshinder et al. (2008)	Συστηματική βιβλιογραφική ανασκόπηση του SCC, παρουσιάζοντας ένα πλαίσιο για την κατηγοριοποίηση προκλήσεων και μηχανισμών.	Το SCC βελτιώνει σημαντικά την απόδοση της εφοδιαστικής αλυσίδας μέσω καλύτερης ενοποίησης και συνεργασίας.
Singh et al. (2019)	Ανέπτυξαν έναν δείκτη συντονισμού χρησιμοποιώντας τη θεωρητική προσέγγιση γραφημάτων, αξιολογώντας την αποτελεσματικότητα του SCC με το Industry 4.0.	Πολλές εταιρείες εστιάζουν εσωτερικά αντί να ενσωματώνουν τεχνολογίες Industry 4.0 σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού.
Toktaş-Palut (2022)	Συγκριτική ανάλυση των παραδοσιακών αλυσίδων εφοδιασμού έναντι του κλάδου 4.0 χρησιμοποιώντας κατανομή εσόδων με βάση τη διαπραγμάτευση Nash.	Οι αλυσίδες εφοδιασμού Industry 4.0 με συντονισμό ξεπερνούν τις παραδοσιακές όσον αφορά τη βιωσιμότητα και την ηγετική θέση στην αγορά.
Zhao et al. (2010)	Ανέπτυξαν ένα μοντέλο συμβολαίου προαίρεσης χρησιμοποιώντας τη θεωρία παιγνίων συνεργασίας για την επίλυση διενέξεων κατασκευαστή-πωλητή λιανικής.	Τα συμβόλαια προαίρεσης βελτιώνουν τον συντονισμό και ευθυγραμμίζουν τα συμφέροντα, ξεπερνώντας τα παραδοσιακά μοντέλα χονδρικής τιμολόγησης.

4.9 Διαχείριση Κινδύνων σε Συστήματα CLSC

Η διαχείριση κινδύνου σε συστήματα εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου (CLSC) είναι μια πολύπλευρη πρόκληση που απαιτεί την αντιμετώπιση μιας σειράς αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με διακοπές της εφοδιαστικής αλυσίδας, τις διακυμάνσεις της ζήτησης, τη μεταβλητότητα της ποιότητας και τη συμμόρφωση με τους κανονισμούς. Η αποτελεσματική διαχείριση κινδύνου στα CLSC περιλαμβάνει την ενσωμάτωση στρατηγικών, επιχειρησιακών και οικονομικών παραμέτρων για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας και της βιωσιμότητας ολόκληρου του δικτύου της εφοδιαστικής αλυσίδας (Prakash et al., 2017; Cardoso et al., 2013).

Ένας από τους κύριους κινδύνους στα CLSCs σχετίζεται με διακοπές εφοδιασμού, οι οποίες μπορεί να προκύψουν τόσο από εσωτερικές όσο και από εξωτερικές πηγές, όπως ζητήματα ποιότητας προμηθευτή, καθυστερήσεις μεταφοράς και απροσδόκητες αλλαγές στη ζήτηση ή τις επιστροφές προϊόντων (Prakash et al., 2017; Amin & Zhang, 2013). Η συμπερίληψη πολλαπλών κλιμακίων και η ανάγκη συντονισμού μεταξύ των διαφόρων σταδίων του κύκλου ζωής των προϊόντων καθιστούν τα CLSC ιδιαίτερα ευάλωτα σε αυτές τις διαταραχές. Για τον μετριασμό τέτοιων κινδύνων, οι ερευνητές έχουν προτείνει μοντέλα βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων που ενσωματώνουν διάφορα μέτρα κινδύνου, όπως διακύμανση, δείκτη μεταβλητότητας και υπό όρους αξία σε κίνδυνο (conditional value-at-risk, CVaR), για να συλλάβουν διαφορετικές διαστάσεις της αβεβαιότητας της εφοδιαστικής αλυσίδας (Cardoso et al., 2013, Amin & Zhang, 2013). Αυτά τα μοντέλα επιτρέπουν στους υπεύθυνους λήψης αποφάσεων να αξιολογήσουν τις αντισταθμίσεις μεταξύ κερδοφορίας και κινδύνου, διευκολύνοντας τον στρατηγικό σχεδιασμό με πιο ενημερωμένο τρόπο.

Η αβεβαιότητα ζήτησης είναι μια άλλη σημαντική πρόκληση στη διαχείριση κινδύνου CLSC. Οι διακυμάνσεις της ζήτησης για νέα και ανακατασκευασμένα προϊόντα μπορεί να οδηγήσουν σε αναντιστοιχίες μεταξύ προσφοράς και ζήτησης, με αποτέλεσμα ανισορροπίες αποθεμάτων και λειτουργικές ανεπάρκειες (Amin & Zhang, 2013; Bandyal et al., 2013). Ο στοχαστικός προγραμματισμός και οι προσεγγίσεις που βασίζονται σε σενάρια χρησιμοποιούνται συχνά για να χειριστούν τέτοιες

αβεβαιότητες, επιτρέποντας στις αλυσίδες εφοδιασμού να αναπτύξουν ισχυρές διαμορφώσεις που μπορούν να προσαρμοστούν σε ποικίλες συνθήκες ζήτησης (Amin & Zhang, 2013; Özceylan et al., 2014). Ενσωματώνοντας αυτές τις προσεγγίσεις στο σχεδιασμό CLSC, οι εταιρείες μπορούν να διαχειριστούν καλύτερα την εγγενή αστάθεια στις επιστροφές προϊόντων και τη ζήτηση για ανακατασκευασμένα προϊόντα, μειώνοντας έτσι τους κινδύνους που σχετίζονται με τη διαχείριση αποθεμάτων και τον προγραμματισμό παραγωγής.

Η μεταβλητότητα ποιότητας των επιστρεφόμενων προϊόντων προσθέτει ένα άλλο επίπεδο πολυπλοκότητας στη διαχείριση κινδύνου στα CLSC. Οι διακυμάνσεις στην κατάσταση των επιστρεφόμενων αντικειμένων μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την αποτελεσματικότητα των διαδικασιών ανάκτησης και ανακατασκευής, επηρεάζοντας τόσο το κόστος όσο και τη διαθεσιμότητα των προϊόντων (Özgir & Başligil, 2013; Kenne et al., 2012). Για την αντιμετώπιση αυτού του ζητήματος, μοντέλα ανάπτυξης συναρτήσεων προηγμένης ποιότητας (quality function deployment, QFD) σε συνδυασμό με τη θεωρία ασαφών συνόλων έχουν προταθεί για την αξιολόγηση προμηθευτών και υπεργολάβων με βάση την ικανότητά τους να πληρούν τα πρότυπα ποιότητας υπό αβέβαιες συνθήκες (Amin & Zhang, 2013). Αυτά τα μοντέλα βοηθούν στην επιλογή των πιο αξιόπιστων συνεργατών για εργασίες ανάκτησης, μετριάζοντας έτσι τους κινδύνους που σχετίζονται με αποδόσεις κακής ποιότητας.

Η ενοποίηση της διαχείρισης κινδύνου με την εξισορρόπηση της γραμμής αποσυναρμολόγησης και τη βελτιστοποίηση δικτύου έχει αποδειχθεί ότι βελτιώνει σημαντικά τη συνολική απόδοση και τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας των CLSC (Özceylan et al., 2014). Συντονίζοντας τον στρατηγικό σχεδιασμό του δικτύου με τις λειτουργίες τακτικής αποσυναρμολόγησης, οι εταιρείες μπορούν να επιτύχουν σημαντικές μειώσεις κόστους και λειτουργική αποτελεσματικότητα. Αυτή η ολοκληρωμένη προσέγγιση ελαχιστοποιεί τους κινδύνους που σχετίζονται με την αναποτελεσματική κατανομή πόρων και επίσης ενισχύει τη βιωσιμότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας βελτιστοποιώντας την ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση πολύτιμων υλικών και εξαρτημάτων (Özceylan et al., 2014; Özgir & Başligil, 2013).

Η διαχείριση χρηματοοικονομικού κινδύνου είναι εξίσου σημαντική στα CLSC, καθώς οι εταιρείες πρέπει να αντιμετωπίζουν τις οικονομικές αβεβαιότητες που

σχετίζονται με επενδύσεις σε εγκαταστάσεις ανακατασκευής, τις διακυμάνσεις στην αξία των ανακτημένων υλικών και το κόστος που σχετίζεται με τη συμμόρφωση με τους περιβαλλοντικούς κανονισμούς (Bandaly et al., 2013; Kenne et al., 2013 al., 2012). Οι στρατηγικές διαχείρισης χρηματοοικονομικού κινδύνου, όπως η χρήση συμβάσεων προαίρεσης, οι συμφωνίες κατανομής εσόδων και τα ευέλικτα μοντέλα τιμολόγησης, μπορούν να βοηθήσουν τις επιχειρήσεις να κατανέμουν τους κινδύνους πιο ομοιόμορφα στην αλυσίδα εφοδιασμού, διασφαλίζοντας ότι όλα τα ενδιαφερόμενα μέρη παραμένουν ευθυγραμμισμένα με τους στόχους τους (Bandaly et al., 2013; Zhao et al., 2010). Επιπλέον, η ενσωμάτωση οικονομικών παραμέτρων στο σχεδιασμό του δικτύου CLSC μπορεί να ενισχύσει την ανθεκτικότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας παρέχοντας ένα απόθεμα ασφαλείας έναντι των οικονομικών κραδασμών και της αστάθειας της αγοράς (Amin & Zhang, 2013; Özceylan et al., 2014).

Οι κυβερνητικές πολιτικές και τα κίνητρα διαδραματίζουν επίσης κρίσιμο ρόλο στη διαμόρφωση στρατηγικών διαχείρισης κινδύνου στα CLSC. Κανονισμοί όπως η εκτεταμένη ευθύνη παραγωγού (EPR) και οι κρατικές επιδοτήσεις για δραστηριότητες ανακύκλωσης και ανακατασκευής μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τα προφίλ κινδύνου των CLSC (Heydari et al., 2017). Αυτές οι πολιτικές μπορούν είτε να μετριάσουν τους κινδύνους παρέχοντας οικονομική στήριξη και ενθαρρύνοντας βιώσιμες πρακτικές είτε να εισάγουν νέους κινδύνους μέσω του κόστους συμμόρφωσης και των κανονιστικών αβεβαιοτήτων. Ως εκ τούτου, είναι σημαντικό για τις επιχειρήσεις να παραμείνουν συντονισμένες με τις ρυθμιστικές αλλαγές και να προσαρμόσουν τις στρατηγικές διαχείρισης κινδύνου ανάλογα (Heydari et al., 2017; Guo et al., 2018).

Ο ρόλος της τεχνολογίας στην ενίσχυση των ικανοτήτων διαχείρισης κινδύνου στα CLSC θα πρέπει επίσης να σημειωθεί. Οι προηγμένες τεχνολογίες όπως το blockchain, το IoT και η ανάλυση δεδομένων παρέχουν άνευ προηγουμένου ορατότητα στις λειτουργίες της εφοδιαστικής αλυσίδας, επιτρέποντας την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο και την πιο προληπτική διαχείριση κινδύνου (Bakajic et al., 2022; Singh et al., 2019). Για παράδειγμα, η τεχνολογία blockchain μπορεί να βελτιώσει την ιχνηλασιμότητα και τη διαφάνεια σε ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού, μειώνοντας τους κινδύνους που σχετίζονται με την παραχάραξη και την απάτη (Bakajic et al., 2022). Ομοίως, οι συσκευές IoT μπορούν να παρακολουθούν την κατάσταση των

προϊόντων καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους, παρέχοντας πολύτιμα δεδομένα για την προγνωστική συντήρηση και τον μετριασμό του κινδύνου στις διαδικασίες ανακατασκευής (Singh et al., 2019).

Εκτός από τις τεχνολογικές λύσεις, οργανωτικές στρατηγικές όπως η συλλογική διαχείριση κινδύνου και ο ολοκληρωμένος προγραμματισμός μπορούν να ενισχύσουν περαιτέρω την ανθεκτικότητα των CLSC. Με την προώθηση της στενότερης συνεργασίας μεταξύ των εταίρων της εφοδιαστικής αλυσίδας και την ενσωμάτωση της διαχείρισης κινδύνου Εκτός από τις βασικές επιχειρηματικές διαδικασίες, οι εταιρείες μπορούν να αναπτύξουν πιο ευέλικτα και ανταποκρινόμενα δίκτυα εφοδιαστικής αλυσίδας που είναι καλύτερα εξοπλισμένα για να χειρίζονται διακοπές (Bandaly et al., 2013; Heydari et al., 2017). Οι διαδικασίες συνεργατικού σχεδιασμού, πρόβλεψης και αναπλήρωσης (Collaborative planning, forecasting, and replenishment, CPFR), για παράδειγμα, μπορούν να βοηθήσουν στο συγχρονισμό των δραστηριοτήτων της εφοδιαστικής αλυσίδας, μειώνοντας τον κίνδυνο υπερπαραγωγής και αποθεμάτων, ενώ βελτιώνουν τη συνολική απόδοση της εφοδιαστικής αλυσίδας (Heydari et al., 2017).

Συμπερασματικά, η αποτελεσματική διαχείριση κινδύνου στα συστήματα CLSC απαιτεί μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που ενσωματώνει στρατηγικούς, λειτουργικούς και οικονομικούς κινδύνους. Υιοθετώντας προηγμένες τεχνικές μοντελοποίησης, αξιοποιώντας τεχνολογικές καινοτομίες και ενισχύοντας τη συνεργασία μεταξύ των εταίρων της εφοδιαστικής αλυσίδας, οι επιχειρήσεις μπορούν να ενισχύσουν την ανθεκτικότητα και τη βιωσιμότητα των CLSC τους (Prakash et al., 2017; Cardoso et al., 2013). Καθώς η πολυπλοκότητα και η αβεβαιότητα των παγκόσμιων αλυσίδων εφοδιασμού συνεχίζουν να αυξάνονται, η ανάπτυξη ισχυρών πλαισίων διαχείρισης κινδύνου θα είναι απαραίτητη για τις εταιρείες που επιδιώκουν να ευδοκιμήσουν σε αυτό το δυναμικό περιβάλλον. Τέτοια πλαίσια προστατεύουν από πιθανές διαταραχές και επιτρέπουν επίσης στις επιχειρήσεις να αξιοποιήσουν τις ευκαιρίες που παρουσιάζει μια πιο βιώσιμη και κυκλική οικονομία (Amin & Zhang, 2013; Bandaly et al., 2013).

Πίνακας 9. Έρευνες για την Διαχείριση Κινδύνων σε Συστήματα CLSC

Συγγραφέας	Μεθοδολογία	Αποτελέσματα
Prakash et al. (2017)	Αναπτύχθηκε ένα μοντέλο γραμμικού προγραμματισμού μεικτού αέριου (MILP) για ένα δίκτυο CLSC πολλαπλών κλιμακίων υπό σενάρια κινδύνου.	Η ενσωμάτωση της διαχείρισης κινδύνου βελτίωσε σημαντικά την ανθεκτικότητα με αύξηση του κόστους μόνο κατά 10-13%.
Cardoso et al. (2013)	Η βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων με χρήση της μεθόδου ε-περιορισμού, αξιολόγησε τέσσερα μέτρα κινδύνου (διακύμανση, δείκτης μεταβλητότητας, κίνδυνος καθοδικής πλευράς και CVaR).	Το CVaR ήταν πιο αποτελεσματικό στην αποτύπωση σεναρίων ακραίου κινδύνου, στην εξισορρόπηση του ENPV και του κινδύνου.
Amin and Zhang (2013)	Ανέπτυξαν ένα μοντέλο τριών σταδίων χρησιμοποιώντας QFD και στοχαστικό μη γραμμικό προγραμματισμό μικτών αέριων για τη διαμόρφωση CLSC.	Η ολοκληρωμένη προσέγγιση βελτίωσε την ποιότητα λήψης αποφάσεων, αντιμετωπίζοντας αποτελεσματικά την αβέβαιη ζήτηση και την επιλογή προμηθευτών.
Amin and Zhang (2013)	Ανέπτυξαν ένα μοντέλο MILP χρησιμοποιώντας στοχαστικό προγραμματισμό που βασίζεται σε σενάρια για να χειριστεί τις αβεβαιότητες ζήτησης και απόδοσης.	Μοντέλο αποτελεσματικής διαχείρισης αβεβαιοτήτων, παρέχοντας μια ισχυρή διαμόρφωση δικτύου CLSC.
Bandaly et al. (2013)	Ανασκόπηση των προσεγγίσεων διαχείρισης λειτουργικού και χρηματοοικονομικού κινδύνου στο SCRM, κατηγοριοποίηση ανά τομείς κινδύνου.	Οι ολοκληρωμένες προσεγγίσεις είναι απαραίτητες για τη διαχείριση πολύπλοκων, αλληλένδετων κινδύνων της εφοδιαστικής αλυσίδας.
Kenne et al. (2012)	Βέλτιστο μοντέλο που βασίζεται στη θεωρία ελέγχου για υβριδικό σύστημα κατασκευής-ανακατασκευής υπό αβεβαιότητα αστοχίας μηχανής.	Η βέλτιστη πολιτική ελέγχου εξαρτάται από τις παραμέτρους κόστους και τις αβεβαιότητες αστοχίας του μηχανήματος.

Lundin (2012)	Μελέτη περίπτωσης σχετικά με τον επανασχεδιασμό μιας αλυσίδας εφοδιασμού μετρητών που εκτίθεται σε διαρθρωτικές και διαδικαστικές λανθασμένες ευθυγραμμίσεις.	Οι αλλαγές σχεδιασμού μείωσαν το κόστος αλλά οδήγησαν επίσης σε αναποτελεσματικότητα λόγω κακής ευθυγράμμισης κινήτρων.
Özceylan et al. (2014)	Μη γραμμικό μοντέλο προγραμματισμού μεικτού αέριου αριθμού που ενσωματώνει τη βελτιστοποίηση δικτύου CLSC και την εξισορρόπηση της γραμμής αποσυναρμολόγησης.	Σημαντικές μειώσεις κόστους επιτυγχάνονται με την εξέταση του στρατηγικού σχεδιασμού CLSC και της τακτικής αποσυναρμολόγησης μαζί.
Özker and Başligil (2013)	Μοντέλο βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων για δίκτυο CLSC υπό αβεβαιότητα με τρεις επιλογές ανάκτησης.	Μοντελοποίηση αποτελεσματικά ισορροπημένης κερδοφορίας, βιωσιμότητας και ικανοποίησης πελατών στο CLSC.

4.10 Καινοτομία στα συστήματα εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου

Η καινοτομία στα συστήματα εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου (CLSC) είναι απαραίτητη για την επίτευξη τόσο οικονομικής όσο και περιβαλλοντικής βιωσιμότητας. Η ενσωμάτωση καινοτόμων πρακτικών, όπως οι βελτιώσεις διαδικασιών, η ανάπτυξη πράσινων προϊόντων και οι τεχνολογικές εξελίξεις, μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την απόδοση των CLSC μειώνοντας το κόστος, αυξάνοντας την αποδοτικότητα και ελαχιστοποιώντας τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Guin & Pal, 2024; Genc & De Giovanni, 2020). Η αποτελεσματική εφαρμογή αυτών των καινοτομιών απαιτεί στρατηγική ευθυγράμμιση των λειτουργιών της εφοδιαστικής αλυσίδας, επενδύσεις στην τεχνολογία και εστίαση σε βιώσιμες πρακτικές που εκτείνονται σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής του προϊόντος.

Ένας από τους βασικούς τομείς όπου η καινοτομία διαδραματίζει κρίσιμο ρόλο είναι η ανακατασκευή και η αντίστροφη εφοδιαστική. Η ενσωμάτωση της καινοτομίας της διαδικασίας στις δραστηριότητες ανακατασκευής μπορεί να οδηγήσει σε σημαντική εξοικονόμηση κόστους και βελτιωμένα περιβαλλοντικά αποτελέσματα. Για παράδειγμα, καινοτομίες στις διαδικασίες ανακατασκευής, όπως η αυτοματοποιημένη αποσυναρμολόγηση και οι προηγμένες τεχνικές ανάκτησης υλικών, μπορούν να μειώσουν το μεταβλητό κόστος και να μειώσουν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των παραγωγικών δραστηριοτήτων (Reimann et al., 2019; Modak et al., 2018). Ωστόσο, η επιτυχία αυτών των καινοτομιών εξαρτάται συχνά από τον συντονισμό μεταξύ των εταίρων της εφοδιαστικής αλυσίδας και τη δυναμική ισχύος εντός του δικτύου. Για παράδειγμα, η αποκεντρωμένη λήψη αποφάσεων μπορεί μερικές φορές να οδηγήσει σε υπερεπένδυση στην καινοτομία των διαδικασιών, η οποία, αν και δυνητικά ωφέλιμη για το περιβάλλον, μπορεί να μην ευθυγραμμίζεται πάντα με τους οικονομικούς στόχους (Reimann et al., 2019).

Η πράσινη καινοτομία, η οποία περιλαμβάνει την ανάπτυξη φιλικών προς το περιβάλλον προϊόντων και διαδικασιών, είναι ένας άλλος κρίσιμος τομέας εστίασης στα CLSC. Η ενσωμάτωση πράσινων προϊόντων στην αλυσίδα εφοδιασμού και η χρήση κινήτρων όπως κουπόνια για επιστροφές προϊόντων μπορεί να ενισχύσει τη συμμετοχή των καταναλωτών στην αντίστροφη εφοδιαστική και να υποστηρίξει μια κυκλική οικονομία (Guin & Pal, 2024). Ωστόσο, η αποτελεσματικότητα αυτών των στρατηγικών συχνά επηρεάζεται από τις συνθήκες της αγοράς και τις αντιλήψεις των καταναλωτών για τα πράσινα προϊόντα. Μελέτες έχουν δείξει ότι οι στρατηγικοί μηχανισμοί συντονισμού, όπως οι συμβάσεις προαίρεσης και οι συμφωνίες επιμερισμού του κόστους, μπορούν να βελτιστοποιήσουν την απόδοση της εφοδιαστικής αλυσίδας ευθυγραμμίζοντας τα κίνητρα όλων των ενδιαφερομένων, ενισχύοντας έτσι τη μεγαλύτερη υιοθέτηση πρακτικών πράσινης καινοτομίας (Guin & Pal, 2024; Chen et al., 2021).

Η υιοθέτηση τεχνολογιών Industry 4.0, όπως το Internet of Things (IoT), το blockchain και η προηγμένη ανάλυση δεδομένων, έχει τη δυνατότητα να φέρει επανάσταση στα CLSC βελτιώνοντας την ορατότητα, την ιχνηλασιμότητα και τον συντονισμό σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού (Bakajic et al., 2022). Αυτές οι τεχνολογίες επιτρέπουν την παρακολούθηση σε πραγματικό χρόνο των ροών

προϊόντων και διευκολύνουν τη λήψη αποφάσεων βάσει δεδομένων, η οποία μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την αποτελεσματικότητα των λειτουργιών αντίστροφης εφοδιαστικής και ανάκτησης προϊόντων. Ωστόσο, η μετάβαση σε ένα CLSC με δυνατότητα τεχνολογίας απαιτεί ένα ολοκληρωμένο πλαίσιο εφαρμογής που αντιμετωπίζει οργανωτικές προκλήσεις, όπως εσφαλμένες παραδοχές και αντίσταση στην αλλαγή (Bakajic et al., 2022). Μια στρατηγική προσέγγιση για την υιοθέτηση τεχνολογίας είναι απαραίτητη για την αξιοποίηση αυτών των καινοτομιών για την επίτευξη βιώσιμης και αποτελεσματικής διαχείρισης της εφοδιαστικής αλυσίδας.

Η καινοτομία διαδραματίζει επίσης κρίσιμο ρόλο στη βελτιστοποίηση του σχεδιασμού των δικτύων CLSC. Η ανάπτυξη νέων μηχανισμών συντονισμού, όπως οι μηχανισμοί επιβράβευσης-τιμωρίας (reward-penalty mechanisms, RPM) και οι συμβάσεις κατανομής κερδών, μπορεί να βελτιώσει την αποτελεσματικότητα των διαδικασιών συλλογής και ανακύκλωσης απορριμμάτων (Wang et al., 2015). Αυτοί οι μηχανισμοί δίνουν κίνητρα για υψηλότερα ποσοστά συλλογής και ενθαρρύνουν τους ενδιαφερόμενους να υιοθετήσουν βιώσιμες πρακτικές. Για παράδειγμα, η ανάθεση μεγαλύτερης ευθύνης στον ηγέτη του CLSC υπό υψηλή ένταση RPM έχει αποδειχθεί ότι βελτιώνει τα ποσοστά συλλογής και την κοινωνική ευημερία, ιδιαίτερα στη διαχείριση απορριμμάτων ηλεκτρικού και ηλεκτρονικού εξοπλισμού (waste electrical and electronic equipment, WEEE) (Wang et al., 2015). Τέτοιες καινοτόμες προσεγγίσεις στο σχεδιασμό και το συντονισμό δικτύων μπορούν να βοηθήσουν τις επιχειρήσεις να πλοηγηθούν στην πολυπλοκότητα των συστημάτων CLSC και να επιτύχουν καλύτερα περιβαλλοντικά και οικονομικά αποτελέσματα.

Εκτός από τις καινοτομίες σε διαδικασίες και προϊόντα, στρατηγικές καινοτομίες όπως τα ευέλικτα μοντέλα τιμολόγησης και οι προσαρμοσμένες συμφωνίες αδειοδότησης μπορούν επίσης να επηρεάσουν σημαντικά την απόδοση του CLSC. Για παράδειγμα, η επιλογή της στρατηγικής αδειοδότησης τεχνολογίας - είτε με πάγια χρέωση είτε με δικαιώματα- μπορεί να επηρεάσει την αποτελεσματικότητα των επιστροφών προϊόντων και των εργασιών ανακατασκευής (Xianprei et al., 2017). Η αδειοδότηση με πάγια χρέωση, για παράδειγμα, μπορεί να κυριαρχεί υπό ορισμένες προϋποθέσεις, βελτιώνοντας την κερδοφορία και τον συντονισμό της αλυσίδας εφοδιασμού. Η στρατηγική χρήση αυτών των μηχανισμών αδειοδότησης επιτρέπει στις εταιρείες να διαχειρίζονται καλύτερα τα δικαιώματα πνευματικής ιδιοκτησίας και να

αξιοποιούν την τεχνολογία για να βελτιώσουν τόσο την οικονομική όσο και την περιβαλλοντική απόδοση των CLSC.

Επιπλέον, οι λιτές πρακτικές (lean practices) που καθοδηγούνται από την καινοτομία μπορούν να οδηγήσουν σε βελτιώσεις στρατηγικών και διαδικασιών σε CLSC. Με την ενσωμάτωση των λιτών αρχών με καινοτόμες πρακτικές, οι επιχειρήσεις μπορούν να μειώσουν τα απόβλητα, να βελτιώσουν την ανταπόκριση στις ανάγκες των καταναλωτών και να ενισχύσουν τη βιωσιμότητα των λειτουργιών της εφοδιαστικής αλυσίδας (Genc & De Giovanni, 2020). Για παράδειγμα, όταν εφαρμόζονται τόσο στρατηγικές όσο και καινοτομίες διαδικασιών, η αλυσίδα εφοδιασμού παρουσιάζει σημαντικά κέρδη κερδοφορίας και βιωσιμότητας. Ωστόσο, εάν μπορεί να δοθεί προτεραιότητα μόνο σε μία καινοτομία, θα πρέπει να επιλέγονται στρατηγικά λιτά προγράμματα ώστε να ευθυγραμμίζονται με τη συμπεριφορά των καταναλωτών και να μεγιστοποιούν την αξία του κύκλου ζωής του προϊόντος. Αυτή η ολοκληρωμένη προσέγγιση για τις λιτές πρακτικές και τις πρακτικές καινοτομίας υπογραμμίζει τη δυνατότητα των επιχειρήσεων να επιτύχουν μακροπρόθεσμη βιωσιμότητα και ανταγωνιστικό πλεονέκτημα στις λειτουργίες της αλυσίδας εφοδιασμού τους.

Η αποτελεσματική διαχείριση καινοτομίας σε CLSC περιλαμβάνει επίσης την αντιμετώπιση της πολυπλοκότητας των λειτουργιών πολλαπλών καναλιών, όπως αυτές που αφορούν τόσο φυσικά όσο και διαδικτυακά κανάλια πωλήσεων. Ο συντονισμός της ποιότητας των προϊόντων, της τιμολόγησης και της διαχείρισης επιστροφών σε πολλά κανάλια μπορεί να είναι δύσκολος, ιδιαίτερα όταν αντιμετωπίζει κανείς διαφορετικούς τύπους επιστροφών προϊόντων, όπως ελαττωματικά είδη και απορρίμματα (Zhang et al., 2019). Καινοτόμοι μηχανισμοί συντονισμού, όπως οι συμβάσεις κατανομής εσόδων, μπορούν να συμβάλουν στον μετριασμό αυτών των προκλήσεων ευθυγραμμίζοντας τα κίνητρα όλων των ενδιαφερομένων και βελτιστοποιώντας τη διανομή των κερδών. Ωστόσο, η επίτευξη της σωστής ισορροπίας μεταξύ βελτιώσεων ποιότητας και διαχείρισης κόστους είναι απαραίτητη, καθώς οι υπερβολικές επενδύσεις στην ποιότητα των προϊόντων μπορεί μερικές φορές να οδηγήσουν σε μείωση των αποδόσεων (Zhang et al., 2019).

Ο ρόλος της συμπεριφοράς των καταναλωτών και της δυναμικής της αγοράς είναι επίσης κρίσιμος στη διαμόρφωση της επιτυχίας των καινοτόμων πρακτικών στα CLSC. Η κατανόηση των αντιλήψεων των καταναλωτών για τα ανακατασκευασμένα

προϊόντα και η ανάπτυξη αποτελεσματικών στρατηγικών μάρκετινγκ μπορεί να ενισχύσει την υιοθέτηση αυτών των προϊόντων και να υποστηρίξει πρότυπα βιώσιμης κατανάλωσης (Chen et al., 2021). Καθώς η ικανοποίηση των καταναλωτών με τα ανακατασκευασμένα προϊόντα αυξάνεται, οι μηχανισμοί επιμερισμού του κόστους μπορούν να βοηθήσουν στην πιο δίκαιη κατανομή του κόστους καινοτομίας μεταξύ των εταίρων της εφοδιαστικής αλυσίδας, προωθώντας έτσι μεγαλύτερη συνεργασία και ευθυγράμμιση των στόχων (Chen et al., 2021). Αυτό υπογραμμίζει την ανάγκη για μια προσέγγιση με επίκεντρο τον καταναλωτή στη διαχείριση της καινοτομίας σε CLSC, όπου οι στρατηγικές ανάπτυξης προϊόντων και μάρκετινγκ είναι στενά ευθυγραμμισμένες με τις προτιμήσεις των καταναλωτών και τις τάσεις της αγοράς.

Συνολικά, η καινοτομία στα CLSCs περιλαμβάνει ένα ευρύ φάσμα πρακτικών, από καινοτομίες διαδικασιών και προϊόντων έως στρατηγικές και τεχνολογικές εξελίξεις. Η επιτυχής ενσωμάτωση αυτών των καινοτομιών απαιτεί μια ολιστική προσέγγιση που λαμβάνει υπόψη τις πολύπλοκες αλληλεπιδράσεις μεταξύ των εταίρων της εφοδιαστικής αλυσίδας, τη δυναμική της αγοράς και τη συμπεριφορά των καταναλωτών (Guin & Pal, 2024; Bakajic et al., 2022). Υιοθετώντας μια συντονισμένη και στρατηγική προσέγγιση για την καινοτομία, οι επιχειρήσεις μπορούν να βελτιώσουν την απόδοση και τη βιωσιμότητα των αλυσίδων εφοδιασμού τους, συμβάλλοντας τελικά σε μια πιο ανθεκτική και κυκλική οικονομία. Καθώς το τοπίο των παγκόσμιων αλυσίδων εφοδιασμού συνεχίζει να εξελίσσεται, ο ρόλος της καινοτομίας στην προώθηση βιώσιμων και αποτελεσματικών πρακτικών εφοδιαστικής αλυσίδας θα γίνεται όλο και πιο κρίσιμος για τις επιχειρήσεις που επιδιώκουν να παραμείνουν ανταγωνιστικές και κοινωνικά υπεύθυνες απέναντι στις αυξανόμενες περιβαλλοντικές και οικονομικές προκλήσεις (Genc & De Giovanni, 2020, Chen et al., 2021).

Πίνακας 10. Έρευνες για την καινοτομία στα συστήματα εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου

Συγγραφέας	Μεθοδολογία	Αποτελέσματα
Guin and Pal (2024)	Ανέπτυξαν μαθηματικά μοντέλα για διάφορες στρατηγικές συντονισμού (συγκεντρωμένες, Stackelberg, συμβάσεις επιλογής και επιμερισμού κόστους) σε ένα CLSC διπλού καναλιού υπό αβεβαιότητα.	Το μοντέλο συμβάσεων προαίρεσης, με την κατάλληλη τιμολόγηση, προσέφερε την υψηλότερη κερδοφορία υπό την αβεβαιότητα της αγοράς.
Bakajic et al. (2022)	Ποιοτική μελέτη με χρήση συνεντεύξεων με επαγγελματίες σε μεταποιητικές επιχειρήσεις για τη διερεύνηση της υιοθέτησης των τεχνολογιών Industry 4.0 σε CLSCs.	Οι τεχνολογίες Industry 4.0 βελτιώνουν την ορατότητα και την ιχνηλασιμότητα, αλλά απαιτούν ευθυγραμμισμένες οργανωτικές στρατηγικές.
Chen et al. (2021)	Ανέπτυξαν μαθηματικά μοντέλα για τρεις δομές ισχύος (MLM, NM, RLM) για την ανάλυση της τιμολόγησης και του επιμερισμού κόστους για την καινοτομία στην ανακατασκευή.	Το μοντέλο NM παρείχε τον καλύτερο συντονισμό, ενώ το RLM απαιτούσε τον υψηλότερο επιμερισμό του κόστους των λιανοπωλητών, χωρίς να επηρεάζεται από την αντίληψη των καταναλωτών.
Reimann et al. (2019)	Αναλυτικό μοντέλο για τη μελέτη αποφάσεων καινοτομίας διαδικασιών και ανακατασκευής σε κεντρικά έναντι αποκεντρωμένων δικτύων CLSC.	Η αποκέντρωση μπορεί να οδηγήσει σε υπερεπενδύσεις, αλλά ωφελεί το περιβάλλον μειώνοντας τη συνολική παραγωγή.
Xianpei et al. (2017)	Μοντέλο Cournot duopoly για την ανάλυση των επιπτώσεων της αδειοδότησης σταθερών τελών και δικαιωμάτων εκμετάλλευσης στις αποφάσεις παραγωγής και είσπραξης σε ένα CLSC δύο περιόδων.	Η αδειοδότηση με δικαιώματα ευνοούσε το πλεόνασμα των καταναλωτών και το περιβάλλον, ενώ η αδειοδότηση με σταθερή χρέωση ήταν καλύτερη για υψηλές χρεώσεις.

Genc and De Giovanni (2020)	Μοντέλο θεωρίας παιγνίων για προγράμματα που βασίζονται στην καινοτομία σε ένα CLSC με αλληλεπιδράσεις προμηθευτών και κατασκευαστών.	Οι στρατηγικές και οι καινοτομίες διεργασιών μαζί ενισχύουν σημαντικά την κερδοφορία και τη βιωσιμότητα.
Modak et al. (2018)	Πλαίσιο παιχνιδιού Stackelberg για την ανάλυση τριών στρατηγικών συλλογής σε ένα CLSC δύο βαθμίδων: υπό την ηγεσία του λιανοπωλητή, του κατασκευαστή και του τρίτου μέρους.	Η συλλογή από τρίτους οδηγεί σε μη βέλτιστα αποτελέσματα. Προσδιορίστηκε το βέλτιστο όριο προσπάθειας συλλογής.
Wang et al. (2015)	Αναπτύχθηκαν μοντέλα CLSC με και χωρίς κρατική παρέμβαση χρησιμοποιώντας μηχανισμούς επιβράβευσης-ποινών (RPM) κάτω από διαφορετικές δομές εξουσίας.	Το RPM αυξάνει τα ποσοστά συλλογής και μειώνει τις τιμές των προϊόντων, ιδιαίτερα σε CLSC που οδηγούνται από συλλέκτες.
Gao et al. (2016)	Θεωρητικά μοντέλα παιγνίων για τη μελέτη των αποφάσεων τιμολόγησης και προσπάθειας σε CLSC κάτω από διάφορες δομές ισχύος καναλιών (κατασκευαστής, λιανοπωλητής, Nash).	Η κυριαρχία των λιανοπωλητών αυξάνει τα κέρδη των λιανοπωλητών. Η συμμετρική δομή ισχύος ωφελεί ολόκληρη την CLSC και τους καταναλωτές.

Συμπεράσματα

Το κεφάλαιο των συμπερασμάτων στοχεύει να συνθέσει τα βασικά ευρήματα από την ολοκληρωμένη ανασκόπηση της βιβλιογραφίας για συστήματα εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου (CLSC), που περιλαμβάνει διάφορες διαστάσεις όπως βελτιστοποίηση αντίστροφης εφοδιαστικής, βιωσιμότητα, ενοποίηση κυκλικής οικονομίας, ψηφιοποίηση, οικονομικές και χρηματοοικονομικές πτυχές, σχεδιασμός δικτύου, ανάκτηση προϊόντων, συντονισμός, διαχείριση κινδύνων και καινοτομία.

Αρχικά, η βελτιστοποίηση της αντίστροφης εφοδιαστικής σε CLSC είναι θεμελιώδης για τη βελτίωση τόσο της οικονομικής όσο και της περιβαλλοντικής απόδοσης. Οι αποτελεσματικές διαδικασίες αντίστροφης εφοδιαστικής μειώνουν το κόστος, ελαχιστοποιούν τα απόβλητα και βελτιώνουν την αποδοτικότητα των πόρων, επιτρέποντας την αποτελεσματική συλλογή, ταξινόμηση και επεξεργασία των επιστρεφόμενων προϊόντων. Η ενσωμάτωση μοντέλων βελτιστοποίησης πολλαπλών στόχων, που λαμβάνουν υπόψη το κόστος, την ποιότητα και τη βιωσιμότητα, έχει αποδειχθεί αποτελεσματική για την επίτευξη ισορροπημένων αποτελεσμάτων σε πολύπλοκα δίκτυα αντίστροφης εφοδιαστικής. Επιπλέον, η αντιμετώπιση αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με τις επιστροφές προϊόντων —όπως η ποιότητα και η ποσότητα— μέσω ισχυρής βελτιστοποίησης και σχεδιασμού βάσει σεναρίων είναι απαραίτητη για τη διατήρηση της ανθεκτικότητας της αλυσίδας εφοδιασμού. Στρατηγικές όπως το cross-docking και η βελτιστοποίηση δρομολόγησης οχημάτων έχουν αναγνωρισθεί ως πρακτικές προσεγγίσεις για τη μείωση του κόστους μεταφοράς και τη βελτίωση των επιπέδων εξυπηρέτησης.

Εξάλλου, η αειφορία βρίσκεται στον πυρήνα των CLSCs, με πρωταρχικό στόχο τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων με παράλληλη διατήρηση της οικονομικής βιωσιμότητας. Η εφαρμογή των CLSC υποστηρίζει τη μετάβαση σε μια κυκλική οικονομία προωθώντας την επαναχρησιμοποίηση, την ανακατασκευή και την ανακύκλωση προϊόντων, ελαχιστοποιώντας έτσι τα απόβλητα και εξοικονομώντας πόρους. Η χρήση προηγμένων τεχνικών μοντελοποίησης, όπως η αξιολόγηση του κύκλου ζωής (LCA) και η βελτιστοποίηση πολλαπλών στόχων, ήταν καθοριστικής σημασίας για την αξιολόγηση και τη βελτίωση της περιβαλλοντικής απόδοσης των

CLSC. Οι προσαρμοσμένες προσεγγίσεις είναι απαραίτητες για διαφορετικούς κλάδους, καθώς οι προκλήσεις ανά τομέα μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά τον σχεδιασμό και τη λειτουργία βιώσιμων CLSC. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις, ιδίως όσον αφορά τη διαχείριση των αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με τις επιστροφές προϊόντων και την ποιότητα των ανακυκλωμένων υλικών. Προχωρώντας προς τα εμπρός, απαιτείται μια πιο ολοκληρωμένη προσέγγιση που συνδυάζει την τεχνολογική καινοτομία με υποστηρικτικά ρυθμιστικά πλαίσια για να ξεπεραστούν αυτές οι προκλήσεις και να αξιοποιηθεί πλήρως το δυναμικό των βιώσιμων CLSC.

Εξάλλου, η ενσωμάτωση των αρχών της κυκλικής οικονομίας στα CLSC είναι ζωτικής σημασίας για τη δημιουργία βιώσιμων συστημάτων παραγωγής και κατανάλωσης. Αυτή η ολοκλήρωση απαιτεί επανεξέταση των παραδοσιακών μοντέλων γραμμικής αλυσίδας εφοδιασμού και υιοθέτηση στρατηγικών που επεκτείνουν τον κύκλο ζωής των προϊόντων, όπως η ανακατασκευή, η ανακύκλωση και η παράταση ζωής του προϊόντος. Οι ψηφιακές τεχνολογίες όπως το blockchain και το IoT διαδραματίζουν καθοριστικό ρόλο στην ενίσχυση της διαφάνειας και της ιχνηλασιμότητας, επιτρέποντας πιο αποτελεσματική ανάκτηση πόρων και ενισχύοντας τη συνεργασία σε ολόκληρη την αλυσίδα εφοδιασμού. Ωστόσο, η επίτευξη πραγματικής κυκλικότητας στα CLSC περιλαμβάνει την υπέρβαση σημαντικών προκλήσεων, συμπεριλαμβανομένης της μεταβλητότητας στις αποδόσεις προϊόντων και της έλλειψης τυποποιημένων μετρήσεων για τη μέτρηση της απόδοσης της κυκλικής οικονομίας. Η αποτελεσματική υποστήριξη πολιτικής και η συνεργασία μεταξύ των ενδιαφερομένων είναι ουσιαστικής σημασίας για τη δημιουργία κυκλικών οικοσυστημάτων που μπορούν να διατηρήσουν μακροπρόθεσμα οικονομικά και περιβαλλοντικά οφέλη.

Επιπρόσθετα, η ψηφιοποίηση των CLSC μέσω τεχνολογιών Industry 4.0 έχει δυνατότητες μετασχηματισμού, επιτρέποντας πιο αποτελεσματικές, διαφανείς και ανθεκτικές λειτουργίες της εφοδιαστικής αλυσίδας. Τεχνολογίες όπως το IoT, το blockchain και τα big data analytics βελτιώνουν τις δυνατότητες παρακολούθησης και λήψης αποφάσεων σε πραγματικό χρόνο, ενισχύοντας τη συνολική απόδοση των διαδικασιών αντίστροφης εφοδιαστικής και ανάκτησης. Η παραγωγή προσθέτων προσφέρει οφέλη επιτρέποντας την τοπική παραγωγή και μειώνοντας τα απόβλητα υλικών. Ωστόσο, η υιοθέτηση αυτών των τεχνολογιών απαιτεί σημαντικές επενδύσεις

και οργανωτικές αλλαγές, καθώς και την ανάπτυξη ενός ειδικευμένου εργατικού δυναμικού ικανού να διαχειρίζεται ψηφιακά συστήματα. Για να αξιοποιήσουν πλήρως τα οφέλη της ψηφιοποίησης, οι επιχειρήσεις πρέπει να υιοθετήσουν μια ολιστική στρατηγική που να ενσωματώνει την τεχνολογική καινοτομία με τις παραδοσιακές πρακτικές διαχείρισης της αλυσίδας εφοδιασμού.

Θα πρέπει να τονιστεί ότι η οικονομική και χρηματοοικονομική βιωσιμότητα των CLSC εξαρτάται από την εξισορρόπηση της εξοικονόμησης κόστους από την ανάκτηση και την ανακατασκευή υλικών με τις επενδύσεις που απαιτούνται για υποδομές και τεχνολογία. Οι δομές κινήτρων, όπως οι φόροι άνθρακα και οι επιδοτήσεις για βιώσιμες πρακτικές, διαδραματίζουν κρίσιμο ρόλο στον επηρεασμό των οικονομικών αποτελεσμάτων των CLSC. Η αποτελεσματική πρόβλεψη ζήτησης και η διαχείριση των αποθεμάτων είναι επίσης απαραίτητες για τον μετριασμό των χρηματοοικονομικών κινδύνων που σχετίζονται με τη μεταβλητότητα των αποδόσεων των προϊόντων. Επιπλέον, διαχείριση των ανταλλαγών μεταξύ new και reman Οι πωλήσεις των κατασκευασμένων προϊόντων είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση της κερδοφορίας. Η ανάπτυξη ισχυρών οικονομικών μοντέλων που ενσωματώνουν περιβαλλοντικά ζητήματα μπορεί να υποστηρίξει την καλύτερη λήψη αποφάσεων και να ενισχύσει την οικονομική βιωσιμότητα των CLSC.

Ο σχεδιασμός αποτελεσματικών και ανθεκτικών δικτύων CLSC είναι μια σύνθετη εργασία που απαιτεί εξισορρόπηση πολλαπλών στόχων, συμπεριλαμβανομένης της αποδοτικότητας κόστους, των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και της διαχείρισης κινδύνου. Η ενσωμάτωση τόσο της προς τα εμπρός, όσο και της αντίστροφης εφοδιαστικής στο σχεδιασμό του δικτύου είναι απαραίτητη για τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών ανάκτησης και ανακατασκευής. Ο αποτελεσματικός σχεδιασμός της τοποθεσίας των εγκαταστάσεων, σε συνδυασμό με στρατηγικές για τη διαχείριση της μεταβλητότητας της ποιότητας των προϊόντων, μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την αποτελεσματικότητα του δικτύου. Επιπλέον, η ενσωμάτωση της διαχείρισης κινδύνου στο σχεδιασμό του δικτύου συμβάλλει στον μετριασμό των επιπτώσεων των διαταραχών της εφοδιαστικής αλυσίδας. Η χρήση προηγμένων τεχνικών βελτιστοποίησης και πραγματικών εφαρμογών έχει αποδειχθεί πολλά υποσχόμενη, αλλά απαιτείται περαιτέρω έρευνα για την ανάπτυξη μοντέλων που να είναι ταυτόχρονα ισχυρά και πρακτικά για βιομηχανική χρήση.

Εξάλλου, η ανάκτηση και η ανακατασκευή προϊόντων είναι ζωτικής σημασίας στοιχεία των CLSC, προσφέροντας ευκαιρίες για την ανάκτηση της αξίας του προϊόντος και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η επιτυχία αυτών των στρατηγικών εξαρτάται από τον αποτελεσματικό χειρισμό των επιστρεφόμενων προϊόντων, τη βελτιστοποίηση των διαδικασιών ανακατασκευής και τον στρατηγικό σχεδιασμό των προϊόντων για ευκολότερη αποσυναρμολόγηση και επανασυναρμολόγηση. Ωστόσο, εξακολουθούν να υπάρχουν προκλήσεις όπως η διαχείριση της ποιότητας των επιστροφών και η εξισορρόπηση του κόστους και των οφελών των εργασιών ανάκτησης. Οι προηγμένες τεχνολογίες και οι υποστηρικτικοί κανονισμοί μπορούν να διευκολύνουν την αποτελεσματικότερη ανάκτηση προϊόντων, αλλά οι εταιρείες πρέπει επίσης να αναπτύξουν δυνατότητες στρατηγικής διαχείρισης πόρων και σχεδιασμού για δυνατότητα ανακατασκευής για να συνειδητοποιήσουν πλήρως τα οφέλη αυτών των στρατηγικών.

Ο συντονισμός μεταξύ των εταίρων της εφοδιαστικής αλυσίδας είναι απαραίτητος για την αποτελεσματική λειτουργία των CLSC, καθώς ευθυγραμμίζει τους στόχους των διαφόρων ενδιαφερομένων που εμπλέκονται στην μελλοντική και αντίστροφη εφοδιαστική. Οι συμβατικές συμφωνίες, όπως τα μοντέλα κατανομής εσόδων και κατανομής κερδών, έχουν αποδειχθεί αποτελεσματικές στην ευθυγράμμιση των κινήτρων και στην προώθηση της συνεργασίας. Ο ρόλος των ψηφιακών τεχνολογιών στην ενίσχυση του συντονισμού δεν μπορεί να υποτιμηθεί, καθώς επιτρέπουν την ανταλλαγή δεδομένων σε πραγματικό χρόνο και βελτιώνουν τη διαφάνεια σε όλη την αλυσίδα εφοδιασμού. Ωστόσο, η επιτυχής εφαρμογή αυτών των τεχνολογιών απαιτεί μια ολοκληρωμένη στρατηγική ψηφιακού μετασχηματισμού που ενσωματώνει νέα εργαλεία με υπάρχουσες διαδικασίες. Οι κυβερνητικές πολιτικές και τα κίνητρα διαδραματίζουν επίσης κρίσιμο ρόλο στη διευκόλυνση του συντονισμού δημιουργώντας ένα ευνοϊκό περιβάλλον για βιώσιμες πρακτικές.

Εξάλλου, η διαχείριση κινδύνου στα CLSC είναι εγγενώς πολύπλοκη λόγω της διπλής ροής υλικών και προϊόντων. Οι αποτελεσματικές στρατηγικές διαχείρισης κινδύνου περιλαμβάνουν την ενσωμάτωση οικονομικών, λειτουργικών και στρατηγικών παραμέτρων για την ενίσχυση της ανθεκτικότητας της εφοδιαστικής αλυσίδας. Οι προηγμένες τεχνικές μοντελοποίησης, όπως ο στοχαστικός προγραμματισμός και η ανάλυση σεναρίων, βοηθούν στην αντιμετώπιση

αβεβαιοτήτων που σχετίζονται με διακοπές προσφοράς και διακυμάνσεις ζήτησης. Η διακύμανση της ποιότητας των επιστρεφόμενων προϊόντων θέτει πρόσθετες προκλήσεις, που απαιτούν ισχυρές διαδικασίες αξιολόγησης και επιλογής για προμηθευτές και υπεργολάβους. Η ενοποίηση των ψηφιακών τεχνολογιών και ο συνεργατικός σχεδιασμός μπορούν να ενισχύσουν περαιτέρω την ανθεκτικότητα των CLSC, επιτρέποντας στις εταιρείες να διαχειρίζονται καλύτερα τους κινδύνους και να αξιοποιούν ευκαιρίες σε ένα δυναμικό περιβάλλον.

Τέλος, είναι εύλογο ότι η καινοτομία είναι η κινητήρια δύναμη για την ανάπτυξη και τη βελτιστοποίηση των CLSC. Οι καινοτομίες διεργασιών, όπως η αυτοματοποιημένη αποσυναρμολόγηση και η προηγμένη ανάκτηση υλικών, μπορούν να μειώσουν σημαντικά το κόστος και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Οι καινοτομίες πράσινων προϊόντων και η υιοθέτηση τεχνολογιών Industry 4.0 ενισχύουν την αποτελεσματικότητα και τη βιωσιμότητα των CLSC. Η αποτελεσματική διαχείριση αυτών των καινοτομιών απαιτεί στρατηγική ευθυγράμμιση μεταξύ των εταίρων της εφοδιαστικής αλυσίδας και μια ολοκληρωμένη προσέγγιση που αντιμετωπίζει τη δυναμική της αγοράς και τη συμπεριφορά των καταναλωτών. Προάγοντας μια κουλτούρα καινοτομίας και υιοθετώντας μια συντονισμένη προσέγγιση, οι επιχειρήσεις μπορούν να ενισχύσουν την ανθεκτικότητα και την ανταγωνιστικότητα των αλυσίδων εφοδιασμού τους, συμβάλλοντας τελικά σε μια πιο βιώσιμη και κυκλική οικονομία.

Τα συμπεράσματα από αυτήν την περιεκτική βιβλιογραφική ανασκόπηση υπογραμμίζουν την κρίσιμη σημασία της ενσωμάτωσης της βιωσιμότητας, της καινοτομίας και της ανθεκτικότητας σε συστήματα εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου. Η αποτελεσματική διαχείριση της αντίστροφης εφοδιαστικής, του σχεδιασμού δικτύου και του κινδύνου είναι απαραίτητη για τη βελτιστοποίηση τόσο των οικονομικών όσο και των περιβαλλοντικών αποτελεσμάτων. Η ψηφιοποίηση και οι προηγμένες τεχνολογίες προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες μετασχηματισμού των CLSC, αλλά η επιτυχής εφαρμογή τους απαιτεί στρατηγική ευθυγράμμιση και επένδυση σε δυνατότητες. Η ενοποίηση των αρχών της κυκλικής οικονομίας, που υποστηρίζονται από αποτελεσματικό συντονισμό και καινοτομία, μπορεί να δημιουργήσει βιώσιμες και ανθεκτικές αλυσίδες εφοδιασμού που συμβάλλουν σε ευρύτερους περιβαλλοντικούς και οικονομικούς στόχους. Η συνεχής έρευνα και η

συνεργασία μεταξύ των ενδιαφερομένων είναι ζωτικής σημασίας για την αντιμετώπιση των περίπλοκων προκλήσεων και την αξιοποίηση των ευκαιριών που παρουσιάζουν οι CLSC για την επιδίωξη της βιώσιμης ανάπτυξης.

Περιορισμοί

Η παρούσα έρευνα περιορίζεται κυρίως από την εξάρτησή της σε δευτερογενή δεδομένα από την υπάρχουσα βιβλιογραφία, η οποία ενδέχεται να μην καταγράφει τις τελευταίες εξελίξεις και καινοτομίες σε συστήματα εφοδιαστικής αλυσίδας κλειστού βρόχου. Η ταχεία εξέλιξη τεχνολογιών όπως το blockchain, το IoT και τα big data analytics σημαίνει ότι ορισμένα από τα συμπεράσματα μπορεί να είναι ξεπερασμένα καθώς γίνονται νέες εξελίξεις. Επιπλέον, η μελέτη εστιάζει σε γενικές τάσεις και στρατηγικές σε διάφορους κλάδους, δυνητικά παραβλέποντας τις προκλήσεις και τις λύσεις του εκάστοτε τομέα. Η έλλειψη εμπειρικής επικύρωσης για ορισμένα από τα προτεινόμενα μοντέλα και πλαίσια περιορίζει επίσης τη δυνατότητα εφαρμογής της μελέτης σε σενάρια πραγματικού κόσμου. Επιπλέον, η μελέτη δεν εξετάζει εκτενώς τους κοινωνικο-πολιτιστικούς παράγοντες που επηρεάζουν την υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών, οι οποίες θα μπορούσαν να είναι κρίσιμες για την κατανόηση του πλήρους πεδίου εφαρμογής του CLSC σε διαφορετικές περιοχές και αγορές.

Προτάσεις για περαιτέρω έρευνα

Η μελλοντική έρευνα θα πρέπει να επικεντρωθεί στην εμπειρική επικύρωση των προτεινόμενων μοντέλων και πλαισίων σε διάφορα βιομηχανικά πλαίσια για την καλύτερη κατανόηση της πρακτικής εφαρμογής και των περιορισμών τους. Οι μελέτες θα μπορούσαν να διερευνήσουν την ενσωμάτωση αναδυόμενων τεχνολογιών όπως η τεχνητή νοημοσύνη και η μηχανική μάθηση για την ενίσχυση της αποτελεσματικότητας και της προσαρμοστικότητας των CLSC. Επιπλέον, η έρευνα θα πρέπει να διερευνήσει τον ρόλο της συμπεριφοράς των καταναλωτών και της δυναμικής της αγοράς στη διαμόρφωση της επιτυχίας των πρακτικών βιώσιμης αλυσίδας εφοδιασμού. Συγκριτικές μελέτες σε διαφορετικές περιοχές και κλάδους θα μπορούσαν να παρέχουν βαθύτερες γνώσεις σχετικά με τους κοινωνικο-πολιτιστικούς παράγοντες που επηρεάζουν την υιοθέτηση του CLSC. Επιπλέον, η ανάπτυξη τυποποιημένων μετρήσεων για τη μέτρηση της απόδοσης της κυκλικής οικονομίας και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των CLSC θα υποστήριζε πιο συνεπείς και

αξιόπιστες αξιολογήσεις των αποτελεσμάτων βιωσιμότητας. Η συλλογική έρευνα που περιλαμβάνει υπεύθυνους χάραξης πολιτικής, επαγγελματίες του κλάδου και ακαδημαϊκούς μελετητές θα μπορούσε επίσης να συμβάλει στη γεφύρωση του χάσματος μεταξύ θεωρίας και πράξης, διευκολύνοντας την ευρύτερη υιοθέτηση βιώσιμων μοντέλων CLSC.

Βιβλιογραφία

Abbey, J. D., & Guide, V. D. R. (2018). A typology of remanufacturing in closed-loop supply chains. *International Journal of Production Research*, 56(6), 1-11.

Abbey, J. D., Meloy, M. G., Guide, V. D. R., & Atalay, S. (2015). Remanufactured products in closed-loop supply chains for consumer goods. *Production and Operations Management*, 24(3), 488-503.

Abdel-Basset, M., Gamal, A., Elhoseny, M., Chakraborty, R. K., & Ryan, M. (2021). A conceptual hybrid approach from a multicriteria perspective for sustainable third-party reverse logistics provider identification. *Sustainability*, 13(9), 4615.

Accorsi, R., Bortolini, M., Baruffaldi, G., Pilati, F., & Ferrari, E. (2017). Internet-of-things paradigm in food supply chains control and management. *Procedia Manufacturing*, 11, 889-895.

Afshari, H., Jaber, M. Y., & Searcy, C. (2019). Investigating the effects of learning and forgetting on the feasibility of adopting additive manufacturing in supply chains. *Computers & Industrial Engineering*, 128, 576-590.

Agrawal, S., Singh, R. K., & Murtaza, Q. (2016). Disposition decisions in reverse logistics: Graph theory and matrix approach. *Journal of Cleaner Production*, 137, 93-104.

Akcali, E., Çetinkaya, S., & Uster, H. (2009). Network design for reverse and closed-loop supply chains: An annotated bibliography of models and solution approaches. *Networks*, 53(3), 231-248.

Al-Ashhab, M. S. (2022). Multi-objective sustainable supply chain network design and planning considering transportation and energy source selection using a lexicographic procedure. *Computers & Industrial Engineering*, 172, 108528.

Allwood, J. M. (2014). Squaring the circular economy: The role of recycling within a hierarchy of material management strategies. In *Handbook of Recycling* (pp. 445-477).

Al-Refaie, A., Jarrar, Y., & Lepkova, N. (2021). Sustainable design of a multi-echelon closed loop supply chain under uncertainty for durable products. *Sustainability*, 13(19), 11126.

Amin, S. H., & Zhang, G. (2013). A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. *Applied Mathematical Modelling*, 37(6), 4165–4176.

Amin, S. H., & Zhang, G. (2013). A three-stage model for closed-loop supply chain configuration under uncertainty. *International Journal of Production Research*, 51(5), 1405-1425.

Arshinder, K., Kanda, A., & Deshmukh, S. G. (2008). Supply chain coordination: Perspectives, empirical studies and research directions. *International Journal of Production Economics*, 115(2), 316-335.

Aydin, R., Kwong, C. K., & Ji, P. (2016). Coordination of the closed-loop supply chain for product line design with consideration of remanufactured products. *Journal of Cleaner Production*, 114, 286-298.

Baghizadeh, K., Pahl, J., & Hu, G. (2021). Closed-loop supply chain design with sustainability aspects and network resilience under uncertainty: Modelling and application. *Mathematical Problems in Engineering*.

Bai, C., & Sarkis, J. (2013). Flexibility in reverse logistics: A framework and evaluation approach. *Journal of Cleaner Production*, 47, 306-318.

Bakajic, M., Tran, T. M., & Valminen, T. (2022). Technology-enabled coordination in closed-loop supply chains. Presented at EUROMA 2022.

Bandaly, D., Shanker, L., Kahyaoglu, Y., & Satir, A. (2013). Supply chain risk management — II: A review of operational, financial and integrated approaches. *Risk Management*, 15(1), 1-31.

Barney, J. (1991). Firm resources and sustained competitive advantage. *Journal of Management*, 17(1), 99-120.

Beamon, B. M., & Fernandes, C. (2004). Supply-chain network configuration for product recovery. *Production Planning & Control*, 15(3), 270-281.

Behzadianfar, M., Eydi, A., & Shahrokhi, M. (2022). A sustainable closed loop supply chain design problem in an intuitionistic fuzzy environment for dairy products. *Soft Computing*, 26(3), 1417-1435.

Berning, A., & Venter, C. (2015). Sustainable supply chain engagement in a retail environment. *Sustainability*, 7(5), 6246-6263.

Bhattacharjee, S., & Cruz, J. (2015). Economic sustainability of closed loop supply chains: A holistic model for decision and policy analysis. *Decision Support Systems*, 77, 67-86.

Brandenburg, M., Govindan, K., Sarkis, J., & Seuring, S. (2014). Quantitative models for sustainable supply chain management: Developments and directions. *European Journal of Operational Research*, 233(2), 299-312.

Bratt, C., Sroufe, R., & Broman, G. (2021). Implementing strategic sustainable supply chain management. *Sustainability*, 13(15), 8132.

Brintrup, A. M., Pak, J., Ratiney, D., Pearce, T., & others. (2019). Supply chain data analytics for predicting supplier disruptions: A case study in complex asset manufacturing. *International Journal of Production Research*, 58(46109), 1-12.

Bumblauskas, D., Mann, A., Dugan, B., & Rittmer, J. (2020). A blockchain use case in food distribution: Do you know where your food has been? *International Journal of Information Management*, 52, 102008.

Cannella, S., Bruccoleri, M., & Framinan, J. M. (2016). Closed-loop supply chains: What reverse logistics factors influence performance? *International Journal of Production Economics*, 175, 35-49.

Cardoso, S. R., Barbosa-Povoa, A. P., & Relvas, S. (2013). Risk management in the design and planning of closed-loop supply chains. *Computer Aided Chemical Engineering*, 32, 475-480.

Chen, H., Dong, Z., Li, G., & He, K. (2021). Remanufacturing process innovation in closed-loop supply chain under cost-sharing mechanism and different power structures. *Computers & Industrial Engineering*, 162, 107743.

Choi, T.-M., Feng, L., & Li, R. (2020). Information disclosure structure in supply chains with rental service platforms in the blockchain technology era. *International Journal of Production Economics*, 221, 107473.

Chopra, S., & Meindl, P. (2019). *Supply chain management: Strategy, planning, and operation* (7th ed.). Pearson.

Christopher, M. (2016). *Logistics and supply chain management* (5th ed.). Pearson.

Dabees, A., Barakat, M., Elbarky, S., & Lisec, A. (2023). A Framework for Adopting a Sustainable Reverse Logistics Service Quality for Reverse Logistics Service Providers: A Systematic Literature Review. *Sustainability*, 15(3), 1755.

Das, K. (2020). Planning environmental and economic sustainability in closed-loop supply chains. *OSCM Publications*, 13(1).

De Giovanni, P. (2022). Leveraging the circular economy with a closed-loop supply chain and a reverse omnichannel using blockchain technology and incentives. *International Journal of Operations & Production Management*, 42(7), 959-994.

De Man, J. C., & Strandhagen, J. O. (2017). An Industry 4.0 research agenda for sustainable business models. *Procedia CIRP*, 63, 721-726.

Debo, L. G., Savaskan, R. C., & Van Wassenhove, L. N. (2004). Coordination in closed-loop supply chains. In R. Dekker, M. Fleischmann, K. Inderfurth, & L. N. Van Wassenhove (Eds.), *Reverse logistics*. Springer, Berlin, Heidelberg.

Dou, G., & Cao, K. (2020). A joint analysis of environmental and economic performances of closed-loop supply chains under carbon tax regulation. *Computers & Industrial Engineering*, 146, 106624.

Dutta, P., Das, D., Schultmann, F., & Froehling, M. (2016). Design and planning of a closed-loop supply chain with three-way recovery and buy-back offer. *Journal of Cleaner Production*, 135(8).

Easwaran, G., & Uster, H. (2010). A closed-loop supply chain network design problem with integrated forward and reverse channel decisions. *IIE Transactions*, 42(11), 779-792.

Esenduran, G., Kemahlioğlu-Ziya, E., & Swaminathan, J. M. (2017). Impact of take-back regulation on the remanufacturing industry. *Production and Operations Management*, 26(5), 924-944.

European Commission. (2019). A European Green Deal: Striving to be the first climate-neutral continent. European Commission.

European Commission. (2019). Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) Directive. Retrieved from https://ec.europa.eu/environment/topics/waste-and-recycling/weee_en

European Commission. (2020). A new Circular Economy Action Plan for a cleaner and more competitive Europe. European Commission.

Fallah, H., Eskandari, H., & Pishvae, M. S. (2015). Competitive closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 37-50.

Farooque, M., Zhang, A., Thürer, M., Qu, T., & Huisin, D. (2019). Circular supply chain management: A definition and structured literature review. *Journal of Cleaner Production*, 228, 882-900.

Fleischmann, M., Beullens, P., Bloemhof-Ruwaard, J., & Van Wassenhove, L. (2001). The impact of product recovery on logistics network design. *Production and Operations Management*, 10(2), 156-173.

Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J., Dekker, R., van der Laan, E., van Nunen, J. A. E. E., & Van Wassenhove, L. N. (1997). Quantitative models for reverse logistics: A review. *European Journal of Operational Research*, 103(1), 1-17.

Gao, J., Han, H., Hou, L., & Wang, H. (2016). Pricing and effort decisions in a closed-loop supply chain under different channel power structures. *Journal of Cleaner Production*, 112, 2043-2057.

Gehin, A., Zwolinski, P., & Brissaud, D. (2008). A tool to implement sustainable end-of-life strategies in the product development phase. *Journal of Cleaner Production*, 16(5), 566-576.

Genc, T. S., & De Giovanni, P. (2020). Closed-loop supply chain games with innovation-led lean programs and sustainability. *International Journal of Production Economics*, 219, 440-456.

Genovese, A., Acquaye, A. A., Figueroa, A., & Koh, S. C. L. (2017). Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy: Evidence and some applications. *Omega*, 66, 344-357.

Georgiadis, P., & Besiou, M. (2009). Environmental and economic sustainability of WEEE closed-loop supply chains with recycling: A system dynamics analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 47(5), 475-493.

Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems. *Journal of Cleaner Production*, 114, 11-32.

Gopal, K., Begam, S. R., Srivastava, A. P., & Paul, S. (2023). Environmental and economic benefits of closed-loop supply chains: A case study of recycling and re-manufacturing of materials and components. *E3S Web of Conferences*, 430.

Govindan, K., Jha, P. C., & Garg, K. (2016). Product recovery optimization in closed-loop supply chain to improve sustainability in manufacturing. *International Journal of Production Research*, 54(5), 1463-1486.

Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 240(3), 603-626.

Guide, V. D. R., & Van Wassenhove, L. N. (2009). The evolution of closed-loop supply chain research. *Operations Research*, 57(1), 10-18.

Guin, S., & Pal, B. (2024). Dual channel closed-loop supply chain coordination with exchange policy, sales efforts and green innovation under uncertain market. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 1–24.

Guo, J., He, L., & Gen, M. (2018). Optimal strategies for the closed-loop supply chain with the consideration of supply disruption and subsidy policy. *Computers & Industrial Engineering*, 128.

Heydari, J., Govindan, K., & Jafari, A. (2017). Reverse and closed loop supply chain coordination by considering government role. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 52, 379-398.

Holgado, M., & Aminoff, A. (2019). Closed-loop supply chains in circular economy business models. In *Sustainable Design and Manufacturing 2019* (pp. 203-213).

Huang, L., Murong, L., & Wang, W. (2020). Green closed-loop supply chain network design considering cost control and CO₂ emission. *Modern Supply Chain Research and Applications*, ahead-of-print.

Ivanov, D., & Dolgui, A. (2020). Viability of intertwined supply networks: Extending the supply chain resilience angles towards survivability. *International Journal of Production Research*, 58(10), 2904-2915.

Jabbarzadeh, A., Haughton, M., & Khosrojerdi, A. (2018). Closed-loop supply chain network design under disruption risks: A robust approach with real world application. *Computers & Industrial Engineering*, 116, 116-129.

Jeihoonian, M., Kazemi Zanjani, M., & Gendreau, M. (2016). Closed-loop supply chain network design under uncertain quality status: Case of durable products. *International Journal of Production Economics*.

Jeihoonian, M., Zanjani, M. K., & Gendreau, M. (2014). Closed-loop supply chain network design: A case of durable products with different quality status. *Applied Mathematical Modelling*, 38(15-16).

Jian, J., Li, B., Zhang, N., & Su, J. (2021). Decision-making and coordination of green closed-loop supply chain with fairness concern. *Journal of Cleaner Production*, 298, 126779.

Kache, F., & Seuring, S. (2017). Challenges and opportunities of digital information at the intersection of Big Data Analytics and supply chain management. *International Journal of Operations & Production Management*, 37(1), 10-36.

Kangi, F., Pasandideh, S. H. R., Mehdizadeh, E., & Soleimani, H. (2024). The optimization of an integrated forward and reverse logistics network based on routing and cross-docking strategy. *Journal of Applied Research on Industrial Engineering*, 11(2), 251-282.

Kenne, J. P., Dejax, P., & Gharbi, A. (2012). Production planning of a hybrid manufacturing–remanufacturing system under uncertainty within a closed-loop supply chain. *International Journal of Production Economics*, 135(1), 81-93.

Lambert, D. M., & Cooper, M. C. (2000). Issues in supply chain management. *Industrial Marketing Management*, 29(1), 65-83.

Lapko, Y., Trianni, A., Nuur, C., & Masi, D. (2022). Circular ecosystems: A review. *Cleaner and Circular Bioeconomy*, 3, 100031.

Liao, T.-Y. (2018). Reverse logistics network design for product recovery and remanufacturing. *Applied Mathematical Modelling*, 60(17).

Lundin, J. (2012). Redesigning a closed-loop supply chain exposed to risks. *International Journal of Production Economics*, 140(2), 596-603.

Mentzer, J. T., DeWitt, W., Keebler, J. S., Min, S., Nix, N. W., Smith, C. D., & Zacharia, Z. G. (2001). Defining supply chain management. *Journal of Business Logistics*, 22(2), 1-25.

Mitra, S. (2012). Inventory management in a two-echelon closed-loop supply chain with correlated demands and returns. *Computers & Industrial Engineering* 62(4), 870–879

Modak, N. M., Modak, N., Panda, S., & Sana, S. S. (2018). Analyzing structure of two-echelon closed-loop supply chain for pricing, quality and recycling management. *Journal of Cleaner Production*, 171, 512-528.

Morgan, T. R., Tokman, M., Richey, R. G., & Defee, C. (2018). Resource commitment and sustainability: A reverse logistics performance process model. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 48(2).

Niero, M., & Olsen, S. I. (2016). Circular economy: To be or not to be in a closed product loop? A Life Cycle Assessment of aluminium cans with inclusion of alloying elements. *Resources, Conservation and Recycling*, 114, 18-31.

Nikolic, D., & Kostic-Stankovic, M. (2022). Improving the economic sustainability of the fashion industry: A conceptual model proposal. *Sustainability*, 14(8), 4726.

OECD. (2020). COVID-19 and global value chains: Policy options to build more resilient production networks. OECD.

Ovchinnikov, A., Blass, V., & Raz, G. (2014). Economic and environmental assessment of remanufacturing strategies for product + service firms. *Production and Operations Management*, 23(5), 744-761.

Özceylan, E., Paksoy, T., & Bektaş, T. (2014). Modeling and optimizing the integrated problem of closed-loop supply chain network design and disassembly line balancing. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 61, 142-164.

Özker, V., & Başlıgil, H. (2011). Modelling product-recovery processes in closed-loop supply-chain network design. *International Journal of Production Research*, 50(8), 1-16.

Özker, V., & Başlıgil, H. (2013). Multi-objective optimization of closed-loop supply chains in uncertain environment. *Journal of Cleaner Production*, 41, 114-125.

Pagell, M., & Wu, Z. (2009). Building a more complete theory of sustainable supply chain management using case studies of 10 exemplars. *Journal of Supply Chain Management*, 45(2), 37-56.

- Pazhani, S., & Ravi, R. (2018). A bi-criteria model for closed-loop supply chain network design. *International Journal of Operational Research*, 1(1), 1-12.
- Pazhani, S., Ramkumar, N., Narendran, T. T., & Ganesh, K. (2013). A bi-objective network design model for multi-period, multi-product closed-loop supply chain. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 30(4), 264-280.
- Pedram, A., Pedram, P., Yusoff, N. B., & Sorooshian, S. (2017). Development of closed-loop supply chain network in terms of corporate social responsibility. *PLoS One*, 12(4), e0174951.
- Pietrulla, F. (2022). Cleaner and Circular Bioeconomy. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 182-196.
- Prajapati, H., Kant, R., & Shankar, R. (2019). Bequeath life to death: State-of-art review on reverse logistics. *Journal of Cleaner Production*, 211, 503-520.
- Prakash, S., Soni, G., & Rathore, A. P. S. (2017). Embedding risk in closed-loop supply chain network design: Case of a hospital furniture manufacturer. *Journal of Modelling in Management*, 12(5).
- Prakash, S., Soni, G., & Rathore, A. P. S. (2017). Multi-echelon closed-loop supply chain network design and configuration under supply risks and logistics risks. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 28(1), 1-23.
- Prathapage, H., Ivanov, D., & Sgarbossa, F. (2023). Product recovery options in closed loop supply chain networks: A literature review. In *Advances in Production Management Systems. Production Management Systems for Responsible Manufacturing, Service, and Logistics Futures* (pp. 607-619).
- Qiang, Q. (2015). The closed-loop supply chain network with competition and design for remanufactureability. *Journal of Cleaner Production*, 105, 348-356.
- Ramezani, M., Kimiagari, A. M., & Karimi, B. (2014). Closed-loop supply chain network design: A financial approach. *Applied Mathematical Modelling*, 38(15-16).

Reimann, M., Yu, X., & Yu, Z. (2019). Managing a closed-loop supply chain with process innovation for remanufacturing. *European Journal of Operational Research*, 276(2), 510-518.

Richnák, P., & Gubová, K. (2021). Green and reverse logistics in conditions of sustainable development in enterprises in Slovakia. *Sustainability*, 13(2), 581.

Saberi, S., Kouhizadeh, M., Sarkis, J., & Shen, L. (2019). Blockchain technology and its relationships to sustainable supply chain management. *International Journal of Production Research*, 57(7), 2117-2135.

Sarkis, J. (2012). A boundaries and flows perspective of green supply chain management. *Supply Chain Management: An International Journal*, 17(2), 202-216.

Shaharudin, M. R., Zailani, S., Tan, K.-C., & Cross, J. (2023). Fostering closed-loop supply chain orientation by leveraging strategic green capabilities for circular economy performance: empirical evidence from Malaysian electrical and electronics manufacturing firms. *Environment, Development and Sustainability*.

Singh, R. K., Kumar, P., & Chand, M. (2019). Evaluation of supply chain coordination index in context to Industry 4.0 environment. *Benchmarking: An International Journal*, ahead-of-print(4).

Sosnowski, P. C., & Cyplik, P. (2022). Closed loop supply chains and circular economy – the possibilities of interplay. *LogForum*, 18(4), 505-513.

Stahel, W. R. (2016). The circular economy. *Nature*, 531(7595), 435-438.

Stević, Ž., Tanackov, I., Puška, A., Jovanov, G., Vasiljević, J., & Lojaničić, D. (2021). Development of modified SERVQUAL–MCDM model for quality determination in reverse logistics. *Sustainability*, 13(10), 5734.

Stindt, D., & Sahamie, R. (2014). Review of research on closed loop supply chain management in the process industry. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 26(1-2).

Strange, R., & Zucchella, A. (2017). Industry 4.0, global value chains and international business. *Multinational Business Review*, 25(3), 174-184.

Sun, J., Zhou, W., Dejian, H., & Fuh, J. Y. H. (2015). An overview of 3D printing technologies for food fabrication. *Food and Bioprocess Technology*, 8(8), 1605-1615.

Sundin, E., & Lee, H. M. (2011). In what way is remanufacturing good for the environment? Proceedings of the 7th International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing (EcoDesign), 551-556.

Sylim, P., Liu, F., Marcelo, A., & Fontelo, P. (2018). Blockchain technology for detecting falsified and substandard drugs in distribution: Pharmaceutical supply chain intervention. *JMIR Research Protocols*, 7(9), e10163.

Teece, D. J., Pisano, G., & Shuen, A. (1997). Dynamic capabilities and strategic management. *Strategic Management Journal*, 18(7), 509-533.

Toktaş-Palut, P. (2022). Analyzing the effects of Industry 4.0 technologies and coordination on the sustainability of supply chains. *Sustainable Production and Consumption*, 30, 341-358.

Tosarkani, B. M., & Amin, S. H. (2018). A multi-objective model to configure an electronic reverse logistics network and third-party selection. *Journal of Cleaner Production*, 198, 662-682.

Vogt Duberg, J., Sundin, E., & Tang, O. (2024). Assessing the profitability of remanufacturing initiation: A literature review. *Journal of Remanufacturing*, 14, 69-92.

Wang, W., Zhang, Y., Zhang, K., Bai, T., & Shang, J. (2015). Reward–penalty mechanism for closed-loop supply chains under responsibility-sharing and different power structures. *International Journal of Production Economics*, 170, 178-190.

Winkler, H. (2011). Closed-loop production systems—A sustainable supply chain approach. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 4(3), 243-246.

Xiang, Z., & Xu, M. (2019). Dynamic cooperation strategies of the closed-loop supply chain involving the internet service platform. *Journal of Cleaner Production*, 220, 1180-1193.

Xianpei, H., Govindan, K., Lei, X., & Peng, D. (2017). Quantity and collection decisions in a closed-loop supply chain with technology licensing. *European Journal of Operational Research*, 256(3), 820-829.

Zhang, Z., Liu, S., & Niu, B. (2019). Coordination mechanism of dual-channel closed-loop supply chains considering product quality and return. *Journal of Cleaner Production*, 248, 119273.

Zhao, Y., Wang, S., Cheng, T. C. E., & Yang, X. (2010). Coordination of supply chains by option contracts: A cooperative game theory approach. *European Journal of Operational Research*, 207(2), 668-675.

Zhu, Q., Sarkis, J., & Lai, K. H. (2012). Green supply chain management innovation diffusion and its relationship to organizational improvement: An ecological modernization perspective. *Journal of Engineering and Technology Management*, 29(1), 168-185.

Zhu, Q., Sarkis, J., & Lai, K.-h. (2008). Green supply chain management implications for “closing the loop.” *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(1), 1-18.