



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΤΜΗΜΑ ΟΡΓΑΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

**ΣΤΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΩΝ – ΟΛΙΚΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΜΕ ΔΙΕΘΝΗ
ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ**

Διπλωματική Εργασία

**Η ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΩΣ
ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ
ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΚΛΩΣΤΟΫΦΑΝΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ**

Ιωάννα Χ. Τσιαρή

Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Δρ.Ελένη Διδασκάλου

Πειραιάς, 2026



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ

ΤΜΗΜΑ ΟΡΓΑΝΩΣΗΣ ΚΑΙ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΩΝ

ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ

ΣΤΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΕΠΙΧΕΙΡΗΣΕΩΝ – ΟΛΙΚΗ ΠΟΙΟΤΗΤΑ ΜΕ ΔΙΕΘΝΗ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟ

ΒΕΒΑΙΩΣΗ ΕΚΠΟΝΗΣΗΣ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗΣ ΕΡΓΑΣΙΑΣ

«Δηλώνω υπεύθυνα ότι η διπλωματική μου εργασία για τη λήψη του μεταπτυχιακού τίτλου σπουδών, του Πανεπιστημίου Πειραιώς, στη «Διοίκηση Επιχειρήσεων – Ολική Ποιότητα με Διεθνή Προσανατολισμό με τίτλο:

Η προσέγγιση ανάλυσης κύκλου ζωής ως εργαλείο εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων

έχει συγγραφεί από εμένα αποκλειστικά στο σύνολό της. Δεν έχει υποβληθεί ούτε έχει εγκριθεί στο πλαίσιο κάποιου άλλου μεταπτυχιακού προγράμματος ή προπτυχιακού τίτλου σπουδών, στην Ελλάδα ή στο εξωτερικό, ούτε είναι εργασία ή τμήμα εργασίας ακαδημαϊκού ή επαγγελματικού χαρακτήρα.

Δηλώνω επίσης υπεύθυνα ότι οι πηγές στις οποίες ανέτρεξα για την εκπόνηση της συγκεκριμένης εργασίας, αναφέρονται στο σύνολό τους, κάνοντας πλήρη αναφορά στους συγγραφείς, τον εκδοτικό οίκο ή το περιοδικό, συμπεριλαμβανομένων και των πηγών που ενδεχομένως χρησιμοποιήθηκαν από το διαδίκτυο. Παράβαση της ανωτέρω ακαδημαϊκής μου ευθύνης αποτελεί ουσιώδη λόγο για την ανάκληση του πτυχίου μου»

ΥΠΟΓΡΑΦΗ ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΟΥ ΦΟΙΤΗΤΗ:

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ: ΙΩΑΝΝΑ ΤΣΙΑΠΡΗ

Η ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΑΝΑΛΥΣΗΣ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΩΣ ΕΡΓΑΛΕΙΟ ΕΚΤΙΜΗΣΗΣ ΤΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΩΝ ΕΠΙΠΤΩΣΕΩΝ ΚΛΩΣΤΟΥΦΑΝΤΟΥΡΓΙΚΩΝ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

Ιωάννα Χ. Τσιαρή

Σημαντικοί όροι: Κλωστοϋφαντουργία, Ανάλυση Κύκλου Ζωής, Βαφή υφάσματος, Περιβαλλοντικές επιπτώσεις

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Η κλωστοϋφαντουργία αποτελεί έναν από τους πιο σημαντικούς κλάδους στην παγκόσμια βιομηχανία. Ταυτόχρονα, αποτελεί και έναν από τους πιο ρυπογόνους βιομηχανικούς κλάδους λόγω της υψηλής κατανάλωσης νερού, ενέργειας, αλλά και των χημικών που χρησιμοποιούνται κατά την παραγωγική διαδικασία. Σημαντικό κομμάτι της περιβαλλοντικής ρύπανσης οφείλεται σε επεξεργασίες όπως η βαφή των κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων.

Στόχος της εργασίας είναι η μελέτη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με τη βαφή υφασμάτων χρησιμοποιώντας την προσέγγιση LCA Thinking για την εκτίμηση των αέριων εκπομπών. Η προσέγγιση αυτή συμβάλει στην εξέταση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων όχι ως μεμονωμένων αποτελεσμάτων, αλλά σε σύγκριση με τα επιμέρους στάδια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος ή μιας παραγωγικής διαδικασίας. Στην παρούσα εργασία, η μεθοδολογία LCA αποδεικνύεται ένα χρήσιμο εργαλείο αξιολόγησης των εκπομπών ρύπων διοξειδίου του άνθρακα που προκύπτουν από συγκεκριμένες διεργασίες βαφής.

Στο πλαίσιο της εργασίας πραγματοποιείται βιβλιογραφική ανασκόπηση σχετικά με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κλωστοϋφαντουργίας, την εφαρμογή της LCA στον κλάδο καθώς και κάποιες στρατηγικές βιωσιμότητας που εφαρμόζονται. Τέλος, πραγματοποιείται μελέτη βαφής υφασμάτων πολυεστέρα συμβατικού και ανακυκλωμένου καθώς και βαμβακερού με στόχο την αξιολόγηση και σύγκριση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των τριών αυτών κατηγοριών σύνθεσης, δίνοντας έμφαση στις εκπομπές ρύπων διοξειδίου του άνθρακα.

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Ευχαριστώ την καθηγήτριά μου Δρα Ελένη Διδασκάλου, Καθηγήτρια του Τμήματος Οργάνωσης και Διοίκησης του Πανεπιστημίου Πειραιώς, για την συνεργασία της, την καθοδήγησή της και την υπομονή της κατά τη διάρκεια προετοιμασίας και ολοκλήρωσης της εργασίας.

Ευχαριστώ τον κ.Νίκο Τσουρουγιάννη για την βοήθειά του στην παροχή των πρωτογενών δεδομένων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα εργασία.

Τέλος, ευχαριστώ τον κ.Δημήτρη Ντάβαρη, για την άδεια να χρησιμοποιήσω δεδομένα ελέγχου ποιότητας για τις παρτίδες που μελετήθηκαν στην παρούσα εργασία.

ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

	Σελίδα
Σχήμα 1: Παγκόσμια παραγωγή ινών	1
Σχήμα 2: Διαχωρισμός Υφαντικών Ινών	2
Σχήμα 3: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κλωστοϋφαντουργίας	7
Σχήμα 4: Στάδια βαφής υφάσματος	13
Σχήμα 5: Μέθοδοι επεξεργασίας υγρών αποβλήτων	17
Σχήμα 6: Ανακύκλωση στην κλωστοϋφαντουργία	25
Σχήμα 7: Η μέθοδος ανάλυσης κύκλου ζωής (LCA)	34
Σχήμα 8: Τα όρια του συστήματος	60
Σχήμα 9: Εκπομπές CO ₂ e από ενέργεια ανά kg υφάσματος	75
Σχήμα 10: Συνεισφορά ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας στις εκπομπές CO ₂ e/kg υφάσματος	76

ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΠΙΝΑΚΩΝ

	Σελίδα
Πίνακας 1: Βασικές αρχές κυκλικής οικονομίας και εφαρμογές στην κλωστοϋφαντουργία	24
Πίνακας 2: Χημικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαφή υφάσματος από ανακυκλωμένο πολυεστέρα	62
Πίνακας 3: Χημικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαφή υφάσματος από πολυεστέρα	63-64
Πίνακας 4: Χημικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαφή υφάσματος από βαμβάκι	65-66
Πίνακας 5: Στοιχεία Παρτίδων	68-69
Πίνακας 6: Παραδοχές Υπολογισμών	70
Πίνακας 7: Πίνακας Υπολογισμών LCA	70-71
Πίνακας 8: Υπολογισμοί Χρωστικών	73
Πίνακας 9: Συγκεντρωτικός πίνακας χρωστικών	73

ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΚΡΟΝΥΜΙΩΝ

		Σελίδα
AOPs	Advanced Oxidation Processes – Προηγμένες Διεργασίες Οξειδωσης	16
As	Αρσενικό	21
BCI	Better Cotton Initiative – Πρωτοβουλία για Καλύτερο Βαμβάκι	21
BSCI	Business Social Compliance Initiative – Πρωτοβουλία Κοινωνικής Συμμόρφωσης Επιχειρήσεων	39
Cd	Κάδμιο	21
CH₄	Μεθάνιο	14
CO₂	Διοξείδιο του Άνθρακα	14
CO₂e	Ισοδύναμο Διοξειδίου του Άνθρακα	68
Cr(VI)	Εξασθενές Χρώμιο	21
-COO⁻	Ανιόν Καρβοξυλικού Οξέος	12
EE	European Union - Ευρωπαϊκή Ένωση	6
EEA	European Environment Agency - Ευρωπαϊκός Οργανισμός Περιβάλλοντος	3
EMAS	Eco-Management & Audit Scheme – Σύστημα Οικολογικής Διαχείρισης και Ελέγχου	20
ERG	Environmental Reporting Guidelines – Κατευθυντήριες Οδηγίες Περιβαλλοντικής Αναφοράς	20
FU	Functional Unit – Λειτουργική Μονάδα	58
GHG	GreenHouse Gases – Αέρια Θερμοκηπίου	4
GOTS	Global Organic Textile Standard – Παγκόσμιο Πρότυπο Οργανικών Κλωστοϋφαντουργικών Προϊόντων	22
GRI	Global Reporting Initiative – Παγκόσμια Πρωτοβουλία Αναφοράς	39
GRS	Global Recycled Standard – Παγκόσμιο Πρότυπο για Ανακυκλωμένα Υλικά	22
Hg	Υδράργυρος	21
ISO	International Standards Organization – Διεθνής Οργανισμός Πιστοποίησης	20
KG	Kilogram – Χιλιόγραμμα (Κιλό)	58
LCA	Life Cycle Assessment – Ανάλυση Κύκλου Ζωής	33
LCC	Life Cycle Cost Assessment – Ανάλυση Κόστους Κύκλου Ζωής	37
LCI	Life Cycle Inventory – Καταγραφή Δεδομένων Κύκλου Ζωής	34
LCIA	Life Cycle Impact Assessment – Αξιολόγηση Επιπτώσεων Κύκλου Ζωής	34
N₂O	Υποξείδιο του Αζώτου	7
Na₂CO₃	Ανθρακικό Νάτριο	65
Na₂SO₄	Θειικό Νάτριο	66
NaOH	Καυστική Σόδα	65
NH₃	Αμμωνία	9
NO	Μονοξείδιο του Αζώτου	9
OWF	On Weight of Fabric – Ποσοστό επί του βάρους υφάσματος	67
Pb	Μόλυβδος	21
PET	Πολυ(τερεφθαλικός αιθυλενεστέρας)	29
PFD	Prepared For Dyeing	61
pH	Potential of Hydrogen – Δείκτης Οξύτητας	4
SAI	Social Accountability International) – Διεθνής Οργανισμός Κοινωνικής Υπευθυνότητας	39
SETAC	Society of Environmental Toxicology and Chemistry – Εταιρεία Περιβαλλοντικής Τοξικολογίας και Χημείας	34
S-LCA	Social Life Cycle Assessment – Κοινωνική Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής	38
SMETA	Sedex Members Ethical Trade Audit – Πρωτόκολλο Ελέγχου Ηθικού Εμπορίου Μελών Sedex	39
SO₃²⁻	Θειώδες Ιόν	12

UNEP	United Nations Environment Program – Πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών για το περιβάλλον	50
WMG	Waste Minimization Guide – Οδηγός Ελαχιστοποίησης Αποβλήτων	20
ZDHC	Zero Discharge of Hazardous Chemicals – Μηδενική Απόρριψη Επικίνδυνων Χημικών	21
ΜΑΠ	Μέσα Ατομικής Προστασίας	5
ΜΕΛ	Μονάδα Επεξεργασίας Λυμάτων	67
ΥΠΕΝ	Υπουργείο Περιβάλλοντος & Ενέργειας	69

ΠΕΡΙΕΓΧΟΜΕΝΑ

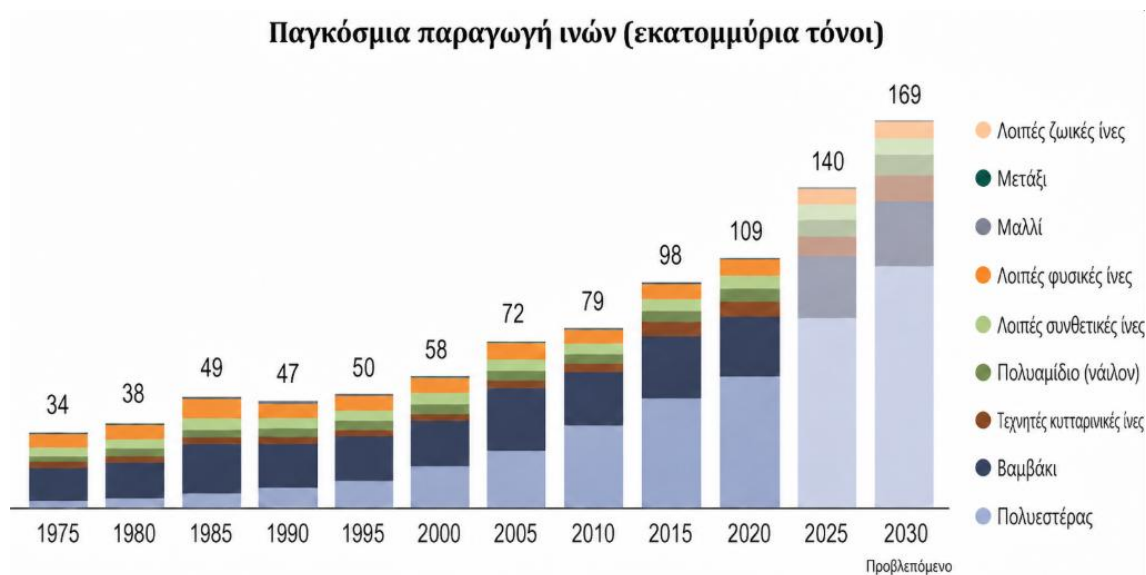
ΠΕΡΙΛΗΨΗ	i
ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ	ii
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΣΧΗΜΑΤΩΝ	iii
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΠΙΝΑΚΩΝ	iv
ΚΑΤΑΣΤΑΣΗ ΑΚΡΟΝΥΜΙΩΝ	v
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Εισαγωγή	1
1.1 Ο κλάδος της κλωστοϋφαντουργίας	1
1.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της Κλωστοϋφαντουργίας	6
1.3 Υγρές επεξεργασίες και απόβλητα	11
1.3.1 Βαφή Υφασμάτων	11
1.3.2 Επεξεργασία αποβλήτων μετά τη διαδικασία της βαφής	14
1.4 Βιωσιμότητα στον κλάδο της κλωστοϋφαντουργίας	17
1.4.1 Κυκλική Οικονομία	23
1.4.2 Ανακύκλωση κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων	25
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment)	33
2.1 Ορισμός και βασικές έννοιες	33
2.2 Πρότυπα ISO 14040 και 14044	35
2.3 Στάδια και είδη της LCA	36
2.4 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί της LCA	39
2.5 Εφαρμογές της LCA στη βιομηχανία	40
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Μελέτες LCA στον κλάδο της κλωστοϋφαντουργίας	47
3.1 Μελέτες LCA στον Κλάδο της κλωστοϋφαντουργίας	47
3.2 Μελέτες LCA σε φυσικές ίνες	50
3.3 Μελέτες LCA σε συνθετικές ίνες	52
3.4 Μελέτες LCA σε βαφικές κατεργασίες	53
3.5 Μελέτες LCA σε ανακυκλωμένα προϊόντα	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – Case Study στην βαφή υφασμάτων	58
4.1 Στόχος και πεδίο μελέτης	58
4.2 Περιγραφή του συστήματος και καταγραφή στοιχείων	58
4.2.1 Βαφή Ανακυκλωμένου Πολυεστέρα	60
4.2.1 Βαφή Πολυεστέρα	62
4.2.3 Βαφή Βαμβακιού	64
4.2.4 Λοιπά στοιχεία για το βαφείο	66

4.3 Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων	67
4.3.1 Ενέργεια και εκπομπές ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα (CO ₂ e)	69
4.3.2 Απογραφή και ποσοτική καταγραφή χρωστικών	72
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ	75
5.1 Αποτελέσματα της μελέτης	75
5.2 Περιορισμοί της μελέτης	77
5.3 Συμπεράσματα	78
5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα	79
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	81

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 – Εισαγωγή

1.1 Ο κλάδος της κλωστοϋφαντουργίας

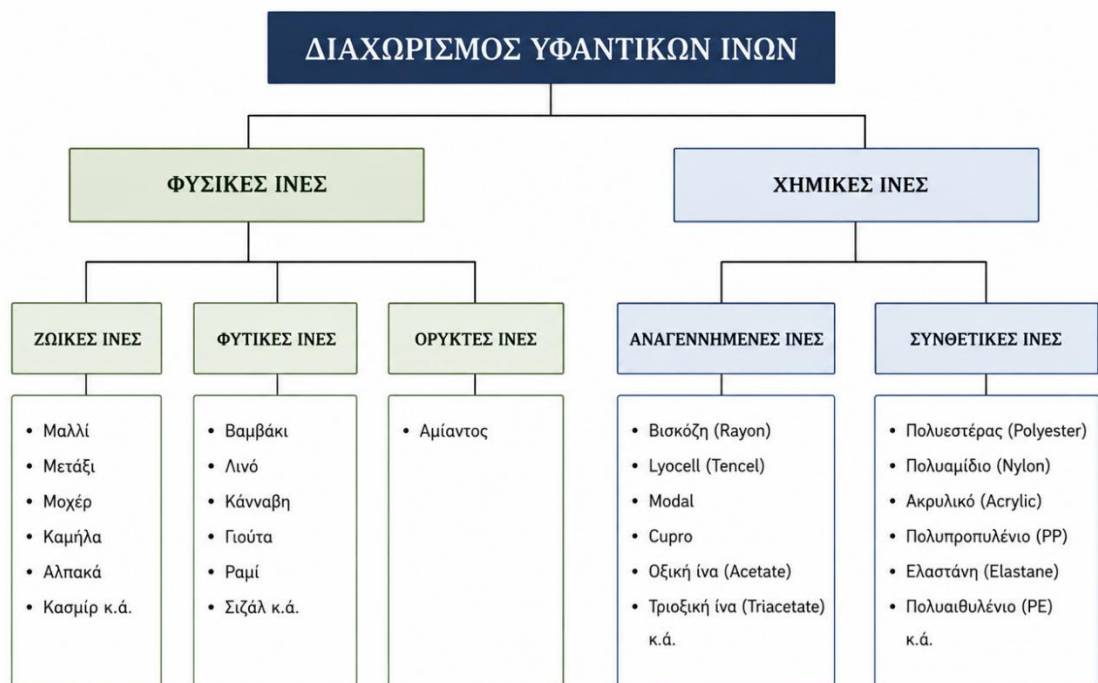
Η κλωστοϋφαντουργία αποτελεί έναν τομέα άρρηκτα συνδεδεμένο με την εξέλιξη του ανθρώπινου είδους. Αρχικά αφορούσε χρηστική επιτακτική ανάγκη, καθώς με τη δημιουργία των πρώτων ενδυμάτων συνέβαλε στην προστασία των μελών του σώματος από εξωτερικούς παράγοντες όπως το κρύο και η βροχή. Με το πέρασμα των χρόνων και με την τεχνολογική εξέλιξη του πλανήτη εκτός από τη βασική ανάγκη της ένδυσης ικανοποιεί και άλλους τομείς όπως οι προσωπικές προτιμήσεις, η μόδα, ενώ εκφράζει και το χαρακτήρα εκείνου που φορά το ένδυμα. Η βιομηχανική εξέλιξη έφερε επανάσταση και στον τομέα της κλωστοϋφαντουργίας, καθώς μπορούσε πλέον να γίνει αυτοματοποιημένη μαζική παραγωγή προϊόντων. Όλα τα είδη κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων έχουν εξελιχθεί σε σημαντικό βαθμό και απαντώνται στην καθημερινότητά μας έχοντας διάφορες χρήσεις, από ένα απλό ένδυμα, σε οικιακό εξοπλισμό, σε μέσα ατομικής προστασίας εργαζομένων, σε ιατρικά βοηθήματα, ακόμα και σε επένδυση αεροπλάνων. Πολλές είναι οι επιστήμες οι οποίες συνεργάζονται σε σημαντικό βαθμό με την κλωστοϋφαντουργία και είτε έχουν ωφεληθεί από αυτή, είτε την έχουν ωφελήσει ομοίως.



Σχήμα 1: Παγκόσμια παραγωγή ινών (Πηγή: Textile Exchange, 2025. Materials Market Report 2025)

Η σημασία του κλάδου αποτυπώνεται και στην παγκοσμίως αυξανόμενη παραγωγή ινών. Σύμφωνα με στοιχεία του Textile Exchange, η παγκόσμια παραγωγή ινών αυξήθηκε από περίπου 109 εκατομμύρια τόνους το 2020 σε περίπου 132 εκατομμύρια τόνους το 2024, γεγονός που καταδεικνύει τη συνεχή αύξηση ζήτησης για κλωστοϋφαντουργικές ίνες. Με τους ρυθμούς που αυξάνεται η παραγωγή των ινών, αναμένεται το 2030 να φτάσει περίπου τους 169 εκατομμύρια τόνους (Textile Exchange, 2025)

Πρωταρχικό δομικό στοιχείο ενός κλωστοϋφαντουργικού προϊόντος αποτελούν οι ίνες, οι οποίες αναλόγως της προέλευσής τους, χωρίζονται σε φυσικές, τεχνητές και συνθετικές. Κύριες κατηγορίες των φυσικών ινών είναι οι φυτικές (βαμβάκι, λινάρι κ.α.), οι ζωικές (μαλλί, μετάξι κ.α.) και οι ορυκτές (αμίαντος). Οι τεχνητές ίνες είναι αναγεννημένες φυσικές ίνες και αποτελούνται από φυσικά πολυμερή (βισκόζη, καουτσούκ κ.α.) ή ανόργανα υλικά (γυαλί). Τελευταία κατηγορία είναι οι συνθετικές ίνες, οι οποίες αποτελούνται από μακρομόρια συνθετικών πολυμερών (πολυεστέρας, πολυαμίδιο, ελαστάνη, κ.α.).



Σχήμα 2: Διαχωρισμός Υφαντικών Ινών (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Στη σημερινή εποχή, η βιομηχανία της κλωστοϋφαντουργίας κατέχει κομβική θέση στην παγκόσμια οικονομία. Η αξία του κλάδου στην παγκόσμια αγορά το 2023 υπολογίζεται ότι ανήλθε στα 1.837,27 δισεκατομμύρια δολάρια ακόμα και μέχρι το 2030

υπολογίζεται ότι τα κέρδη του κλάδου θα αυξάνονται κατά 7,6% ετησίως (Salazar-Sogamoso et al., 2025). Τα νούμερα ανάπτυξης του κλάδου αυξάνονται σημαντικά. Σύμφωνα με τον Ευρωπαϊκό Οργανισμό Περιβάλλοντος [European Environment Agency (EEA)] μέχρι το 2023 θα παρουσιαστεί αύξηση στη χρήση κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων κατά 63% σε παγκόσμια κλίμακα (Fonseca et al., 2023), καθώς υπολογίζεται, ότι η παραγωγή κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων έχει τριπλασιαστεί σε σχέση με όσα παραγότουσαν το 1975 (Rubik et al., 2024).

Σε αντίθεση με τη θετική ανάπτυξη του κλάδου και των εσόδων στην παγκόσμια οικονομία, πρέπει να αναφερθεί ότι ο τομέας της κλωστοϋφαντουργίας έχει σημαντικές επιπτώσεις στην κοινωνία αλλά και στο περιβάλλον (Fidan et al., 2025). Παρ' όλη την τεχνολογική ανάπτυξη, συνεχίζει να αποτελεί έναν τομέα στον οποίο απασχολούνται πολλοί άνθρωποι σε όλο τον κόσμο προσφέροντας χειρωνακτική εργασία, και σε αρκετές περιπτώσεις έχουν παρατηρηθεί μη συμμορφώσεις όσον αφορά τις συνθήκες εργασίας, την υγιεινή και την ασφάλεια των εργαζομένων καθώς επίσης μη συμμορφώσεις που αφορούν τη σύμβαση εργασίας του εκάστοτε εργαζομένου (Becker, 2001).

Όσον αφορά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του κλάδου, υπολογίζεται ότι σχεδόν 7,5 εκατομμύρια τόνοι αποβλήτων απορρέουν από τη βιομηχανία της κλωστοϋφαντουργίας ετησίως στην Ευρώπη, αριθμός ο οποίος αναμένεται να αυξηθεί σημαντικά στο προσεχές μέλλον (Hammar et al., 2024). Το παραπάνω την καθιστά ως έναν από τους κύριους ρυπαντές και παραγωγούς αερίων του θερμοκηπίου (Rubik et al., 2024), υπολογίζοντας ότι εκλύει περίπου το 10% των εκπομπών CO_2 παγκοσμίως, που αντιστοιχεί σε 1,2 δισεκατομμύρια τόνους CO_2 (Fonseca et al., 2023). Μελέτες αναφέρουν, ότι το 2050 ο κλάδος κλωστοϋφαντουργίας θα είναι υπεύθυνος για το 25% των εκπομπών αερίου CO_2 στη γη (Xu et al., 2023).

Η παγκόσμια άνοδος στον υπερκαταναλωτισμό των πάντων επηρέασε και την κλωστοϋφαντουργία δημιουργώντας τον όρο «γρήγορη μόδα» (fast fashion). Η ανάγκη για εστίαση της προσοχής στην ποσότητα και την ταχύτητα αλλά όχι την ποιότητα, έχει οδηγήσει παγκοσμίως σε αλόγιστη κατανάλωση των διαθέσιμων πόρων παραγωγής, καθώς και σε προϊόντα με μικρότερο χρόνο ζωής, αφού σε σύντομο χρονικό διάστημα αντικαθίστανται από νέα, χωρίς να υπάρχει ιδιαίτερη φθορά τους (Hammar et al., 2024). Υπολογίζεται ότι σε διάρκεια ενός έτους, παράγονται 14 τεμάχια ενδυμασίας ανά άτομο. Τα ρούχα έχουν πάψει να αποτελούν ανάγκη επιβίωσης και πλέον τείνουν να χρησιμοποιούνται ως προϊόντα μιας χρήσης. Στη Γερμανία το 1/3 των ενδυμάτων ενός μέσου ανθρώπου είτε έχουν χρησιμοποιηθεί είτε μια φορά, είτε δεν έχουν φορεθεί καθόλου (Rubik et al., 2024). Συνεπώς, υπάρχει μεγάλος αριθμός ρούχων που

απορρίπτονται καθημερινώς τα οποία καταλήγουν συνήθως σε χωματερές (Kishor et al., 2021).

Η υπερβολική αύξηση της ανάγκης για παραγωγή ολοένα και περισσότερων κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων έχει οδηγήσει σε αλόγιστη κατανάλωση των διαθέσιμων περιβαλλοντικών πόρων. Κατεργασίες όπως η βαφή ή το τύπωμα, παρουσιάζουν σημαντικές επιπτώσεις στο περιβάλλον καθώς έχουν μερίδιο ευθύνης για τη μόλυνση του υδροφόρου ορίζοντα, αφού τα απόβλητα τους πολλές φορές δεν επεξεργάζονται σωστά, με αποτέλεσμα να θέτουν σε κίνδυνο ακόμη και την ανθρώπινη υγεία (Fonseca et al., 2023). Χώρες με έντονη παραγωγική δραστηριότητα στον τομέα της κλωστοϋφαντουργίας όπως η Κίνα, η Ινδία και το Μπαγκλαντές κατέχουν τα πρωτεία στη ρύπανση του περιβάλλοντος καθώς εξακολουθούν να χρησιμοποιούν σε σημαντικό βαθμό τον άνθρακα για την κάλυψη των ενεργειακών τους αναγκών (Department of Textiles and Apparel Designing, College of Community Science, AAU Jorhat and Konwar, 2020). Επιπροσθέτως, πρέπει να αναφερθεί ότι σε πολύ μεγάλο ποσοστό δεν γίνεται σωστή διαχείριση των αποβλήτων, καθώς απορρίπτονται παράνομα και χωρίς κάποια επεξεργασία σε χώρους υγειονομικής ταφής ώστε να θαφτούν στη γη, ή σε κρεματόρια προκειμένου να γίνει αποτέφρωση τους κάτι το οποίο όμως οδηγεί σε έκλυση επικίνδυνων αερίων και αερίων του θερμοκηπίου (GHG) στο περιβάλλον. Κατά την παραγωγή συνθετικών ινών γίνεται απελευθέρωση πολύ μεγάλης ποσότητας μικροπλαστικών στο οικοσύστημα. Εξαιτίας της ύπαρξης ελάχιστων λύσεων σε τεχνολογίες ανακύκλωσης ακόμα, εκτιμάται ότι το 87% των ενδυμάτων που έχουν ήδη χρησιμοποιηθεί τουλάχιστον μία φορά, οδηγείται σε ταφή ή καύση, καθώς σε παγκόσμια κλίμακα μόνο το 1% των ενδυμάτων έχει καταγραφεί ότι οδεύει προς ανακύκλωση (Fonseca et al., 2023). Επίσης, η χρήση όλο και περισσότερων υλικών διαφορετικής προέλευσης καθιστά ακόμα πιο δύσκολη τη διαδικασία ανακύκλωσης και συνεπώς την ολοκλήρωση του κύκλου ζωής ενός προϊόντος (Solis et al., 2024). Ο κλάδος της κλωστοϋφαντουργίας καλείται να προσαρμόσει στις παραγωγικές του φάσεις διαδικασίες οι οποίες θα είναι περισσότερο «πράσινες» και βιώσιμες καθώς σύμφωνα με μελέτες αναμένεται το μερίδιο ευθύνης των επιπτώσεων που έχει ο κλάδος στην κλιματική αλλαγή του πλανήτη να αυξηθεί κατά 50% μέχρι το 2030 (Fidan et al., 2024).

Από την κατεργασία του υφάσματος, σε σημαντικό βαθμό απελευθερώνονται στον υδροφόρο ορίζοντα μεγάλες ποσότητες από επεξεργασμένο νερό το οποίο είναι πιθανό να περιέχει άλατα, αλκάλια, οξέα και άλλα διάφορα χημικά, καθώς επίσης να μην έχει σωστό pH. Τα ψάρια, και διάφορα άλλα υδρόβια ζώα, είναι σίγουρο ότι θα καταναλώσουν ποσότητα από αυτό το επεξεργασμένο νερό (Periyasamy, 2024). Ως εκ τούτου, είναι πολύ πιθανό οι υδρόβιοι οργανισμοί να οδηγηθούν σε υποξία, και στη συνέχεια σε

θάνατο, γεγονός που σταδιακά βάζει σε κίνδυνο ακόμη και τη μακροχρόνια ύπαρξή τους (Chen et al., 2021). Εκτός από τους ζωντανούς ζωικούς μικροοργανισμούς, σε πολύ μεγάλο βαθμό επηρεάζονται και οι φυτικοί οργανισμοί όπως τα φύκια, και μάλιστα με σημαντικές επιπτώσεις καθώς είναι πιο ευαίσθητα από άλλα υδρόβια είδη. Οι χρωστικές και τα χημικά που χρησιμοποιούνται για την κατεργασία της βαφής αποτελούνται σε μεγάλο ποσοστό από αρωματικούς δακτυλίους οι οποίοι, αποδεδειγμένα από έρευνες ετών, προκαλούν και στα ζώα αλλά και στους ανθρώπους διάφορες ασθένειες όπως δερματικά προβλήματα, διαταραχές στο κεντρικό νευρικό σύστημα, και σε πολλές περιπτώσεις καρκινογενέσεις. Σημαντικά επηρεάζονται από τα χημικά που χρησιμοποιούνται για τη διαδικασία της βαφής και όσοι εργαζόμενοι έρχονται σε άμεση επαφή, καθώς τα σωματίδια χρώματος που αιωρούνται μπορούν είτε να καταποθούν, είτε να γίνει εισπνοή τους. Πιο συγκεκριμένα, η κατηγορία χρωμάτων αντιδράσεως (Reactive), μπορεί να προκαλέσει στους εργαζόμενους (αν δεν ληφθούν τα κατάλληλα μέτρα προστασίας) δερματίτιδα, επιπεφυκίτιδα ακόμη και άσθμα (Periyasamy, 2024), ενώ χρώματα της κατηγορίας διασποράς (Disperse) όπως το Disperse Red 1, Μπορεί να προκαλέσουν ακόμη και μεταλλάξεις στο DNA (Chequer et al., 2009).

Η όποια βελτίωση του προβλήματος δεν μπορεί να εστιαστεί μόνο στο στάδιο των κατεργασιών παραγωγής αλλά θα πρέπει να ληφθεί υπόψη όλη η αλυσίδα διακίνησης ενός προϊόντος ακόμη και στις πωλήσεις. Ακόμη, πρέπει να δοθεί και η πρέπουσα προσοχή και σε επαγγελματικά ενδύματα (στολές πυροσβεστών, ιατρών κ.α.) ή Μέσα Ατομικής Προστασίας (ΜΑΠ), καθώς διαδραματίζουν επίσης ρόλο, αφού κατέχουν σημαντικό ποσοστό χρήσης παγκοσμίως. Για το 2015, το μερίδιο της αγοράς της κλωστοϋφαντουργίας το οποίο αφορούσε επαγγελματικά ενδύματα ήταν περίπου 5% της ευρωπαϊκής αγοράς του κλάδου. Επιπροσθέτως, σημαντική παρουσία στον κλάδο έχουν και τα λευκά είδη ξενοδοχείων και όχι μόνο, όπως πετσέτες, τραπεζομάντηλα, κουρτίνες κ.α., των οποίων τα κέρδη ανήλθαν σύμφωνα με μελέτη του 2015 μεταξύ 4,3 και 4,9 δισεκατομμυρίων ευρώ (Rubik et al., 2024).

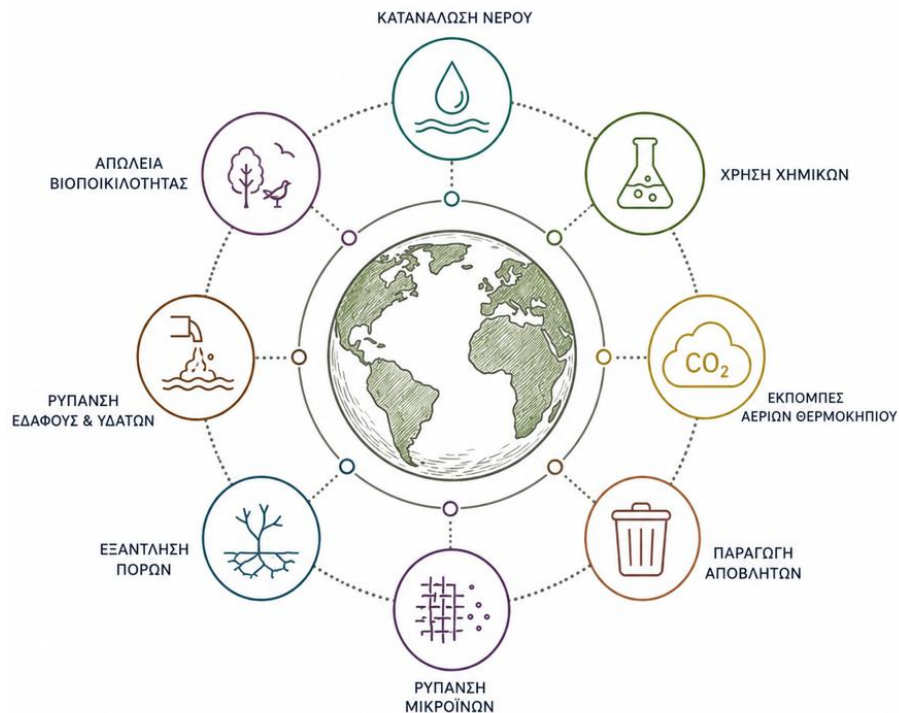
Τα τελευταία χρόνια, προκειμένου να διατηρηθεί ζωντανός ο κλάδος κλωστοϋφαντουργίας οι τάσεις επιτάσσουν την αλλαγή και τη στροφή σε δράσεις με τελικό στόχο την εφαρμογή συγκεκριμένων «πράσινων» βιώσιμων πρακτικών οι οποίες θα έχουν εφαρμογή σε όλη την αλυσίδα του προϊόντος (Fonseca et al., 2023).

1.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της Κλωστοϋφαντουργίας

Ο κλάδος της κλωστοϋφαντουργίας συμπεριλαμβάνεται στις πρώτες θέσεις με τις μεγαλύτερες αλυσίδες ανεφοδιασμού, παγκοσμίως, ανάμεσα σε όλες τις άλλες βιομηχανίες. Στον αντίποδα όμως βρίσκεται στις χαμηλότερες θέσεις στο θέμα των τοξικών εκπομπών που εκλύονται από τις διεργασίες του, αλλά και τις μεγάλες καταναλώσεις των διαθέσιμων πόρων. Ως επί το πλείστον για την παραγωγή των περισσότερων ειδών ένδυσης απαιτούνται μεγάλα αποθέματα ενέργειας και νερού, ενώ κατά την παραγωγή τους ελευθερώνονται αέρια του θερμοκηπίου, και υγρά απόβλητα τα οποία περιέχουν υπολείμματα χρώματος και άλλες χημικές ενώσεις (Xu et al., 2024).

Όπως και άλλοι κλάδοι, ο συγκεκριμένος κλάδος έρχεται αντιμέτωπος με σημαντικά εμπόδια στην προσπάθεια μετριασμού των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προέρχονται από ορισμένες κατεργασίες του (Hammar et al., 2024). Τα τελευταία 20 χρόνια έχει σημειωθεί ραγδαία αύξηση της παραγωγής κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων καταγράφοντας σχεδόν διπλασιασμό στα νούμερα καθώς το 2021 η παραγωγή κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων σε παγκόσμια κλίμακα ανήλθε σε 113 εκατομμύρια τόνους σε σχέση με τα αντίστοιχα νούμερα του 2000 που ήταν 58 εκατομμύρια τόνοι. Συγκεκριμένα η αύξηση χρήσης οδηγεί σε αντίστοιχη αύξηση κλωστοϋφαντουργικών αποβλήτων (Abagnato et al., 2024). Όπως έχει καταγραφεί στη βιβλιογραφία, 2017, σε παγκόσμια κλίμακα ο κλάδος κλωστοϋφαντουργίας και της ένδυσης, παρήγαγε 1715 εκατομμύρια τόνους εκπομπών CO_2 και 92 εκατομμύρια τόνους αποβλήτων, καταναλώνοντας παράλληλα 79 δισεκατομμύρια κυβικά μέτρα νερό (Fidan et al., 2024). Σύμφωνα με έρευνα της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (κομισιόν), 5,8 εκατομμύρια τόνοι κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων απορρίπτονται κάθε χρόνο μόνο στην (ΕΕ) Ευρωπαϊκή Ένωση, γεγονός το οποίο οδήγησε την Ευρωπαϊκή Επιτροπή να κρίσει τον κλάδο της κλωστοϋφαντουργίας σε κλάδο ο οποίος πρέπει να μελετηθεί σοβαρά στα πλαίσια της κυκλικής οικονομίας (European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability., 2010). Επίσης, σημειώνεται ότι μόνο το 15% των κλωστοϋφαντουργικών αποβλήτων διαχειρίζονται με αποτελεσματικούς τρόπους (Shirvanimoghaddam et al., 2020). Συνεπώς υπάρχει αδήριτη ανάγκη για την ανάπτυξη νέων τεχνολογιών για τη σωστή διαχείριση των κλωστοϋφαντουργικών αποβλήτων προκειμένου να υπάρξει βελτίωση του αποτυπώματος του κλάδου (Sun et al., 2024).

ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΙΚΕΣ ΕΠΙΠΤΩΣΕΙΣ ΤΗΣ ΚΛΩΣΤΟΥΦΑΝΤΟΥΡΓΙΑΣ



Σχήμα 3: Περιβαλλοντικές επιπτώσεις της κλωστοϋφαντουργίας (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Σε μεγάλο βαθμό οι πράσινες και βιώσιμες πρακτικές παραγωγής απουσιάζουν από τον κλάδο της κλωστοϋφαντουργίας σε όλα τα στάδια παραγωγής, από την πρώτη ύλη έως και την τελική απόρριψη των προϊόντων, και αυτό έχει ως απόρροια να καταγράφονται μια σειρά από περιβαλλοντικές επιπτώσεις όπως η κλιματική αλλαγή από εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου που απορρέουν από την υπέρμετρη χρήση ενέργειας (Rubik et al., 2024), η μόλυνση του περιβάλλοντος, η μόλυνση του υδροφόρου ορίζοντα από τα χημικά και τα χρώματα, η αλόγιστη χρήση υδάτινων και ενεργειακών πόρων, η μόλυνση του εδάφους με την παράνομη απόρριψη επικίνδυνων μη κατάλληλα επεξεργασμένων αποβλήτων και τη χρήση φυτοφαρμάκων (Ellen MacArthur Foundation, 2017), ο σχηματισμός της τρύπας του όζοντος, ο ευτροφισμός του γλυκού νερού, και η μείωση των ορυκτών πόρων (Fidan et al., 2024).

Στο πρόβλημα της κλιματικής αλλαγής καθοριστικό ρόλο έχει η αύξηση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου. Ο κλάδος είναι υπεύθυνος για έκλυση 8-10% των παγκόσμιων εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Edirisinghe et al., 2024). Η συσσώρευση στην ατμόσφαιρα αερίων όπως διοξειδίου του άνθρακα CO_2 , μεθανίου CH_4 , υποξειδίου του αζώτου N_2O , και αρκετών ακόμη παίζουν σημαντικό ρόλο στην

ύπαρξη του φαινομένου (Ussiri and Lal, 2017). Η επεξεργασία η οποία συντελεί περισσότερο στο φαινόμενο του θερμοκηπίου είναι η βαφή του υφάσματος με ποσοστό 38,4% και ακολουθεί η ινοποίηση με ποσοστό 29,2%. Κατά τη βαφή είτε νήματος είτε υφάσματος, δαπανώνται μεγάλες ποσότητες ενέργειας και παράγεται αξιοσημείωτος όγκος ατμού. Το διοξείδιο του άνθρακα εκπέμπεται στην ατμόσφαιρα από καύση ορυκτών καυσίμων τα οποία χρησιμοποιούνται ως πηγή ενέργειας για τους λέβητες στη βιομηχανία. Η ύπαρξη μεθανίου συναντάται κυρίως κατά τη μεταφορά των προϊόντων και το υποξείδιο του αζώτου από δραστηριότητες όπως η επεξεργασία κλωστοϋφαντουργικών αποβλήτων (Islam et al., 2024b).

Σε ότι αφορά τη μόλυνση του υδροφόρου ορίζοντα, η κλωστοϋφαντουργία κατέχει τη δεύτερη θέση ανάμεσα στις υπόλοιπες βιομηχανίες αφού ευθύνεται περίπου για το 20% της μόλυνσης το οποίο προέρχεται από διεργασίες βαφής και μετεκατεργασίες των υφασμάτων (Yalcin-Enis et al., 2019). Τα υγρά απόβλητα της κλωστοϋφαντουργίας που προέρχονται από τις διαδικασίες της βαφής, του τυπώματος και του φινιρίσματος, αποτελούν δύσκολα απόβλητα προς επεξεργασία λόγω του όγκου και του χρωματισμού τους. Τη δεδομένη στιγμή υπάρχουν 2 γνωστές μέθοδοι για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων και την τμηματική επαναχρησιμοποίησή τους: η συνολική επεξεργασία και αξιοποίηση των λυμάτων, και ο διαχωρισμός τους αναλόγως την προέλευση και την συγκέντρωσή τους με σκοπό την ανάκτηση μέρους τους για επαναχρησιμοποίηση. Στην πρώτη μέθοδο τα απόβλητα όλης της παραγωγικής διαδικασίας συλλέγονται προς επεξεργασία σε μια εγκατάσταση, το οποίο την καθιστά μέθοδο πιο εύκολα διαχειρίσιμη. Παρόλη την ευκολία στη διαχείριση του συστήματος όμως το κόστος εμφανίζεται να είναι αρκετά υψηλό λόγω της διαφορετικής συγκέντρωσης και μορφολογίας των αποβλήτων. Επίσης, σε ότι αφορά την πρώτη μέθοδο, λόγω της αυξημένης δυσκολίας της επεξεργασίας τους, της χρήσης χημικών αλλά και ενέργειας για αυτή την επεξεργασία, εκλύονται υπολογίσιμες ποσότητες αερίων όπως υποξείδιο του αζώτου και μεθάνιο (Mao et al., 2024). Στη δεύτερη μέθοδο, η οποία εμφανίζεται ως πιο αποδοτική, διαχωρίζονται τα υγρά απόβλητα με βάση τη συγκέντρωσή τους, σε λύματα υψηλής και χαμηλής συγκέντρωσης. Ακολουθώντας λαμβάνουν χώρα φυσικοχημικές αλλά και βιολογικές διαδικασίες κατά τις οποίες τα λύματα με υψηλή συγκέντρωση υπόκεινται σε επιπλέον καθαρισμό με τη βοήθεια των διαδικασιών διήθησης και ώσμωσης. Το τελικό προϊόν μετά την ολοκλήρωση της επεξεργασίας είναι νερό έτοιμο προς επαναχρησιμοποίηση στο βαφείο (Clark, 2011). Η δεύτερη μέθοδος αυτή του διαχωρισμού των αποβλήτων τείνει να είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη σε παγκόσμια κλίμακα (Mao et al., 2024).

Σε ότι αφορά το φαινόμενο του ευτροφισμού, αυτό αποτελεί ένα σημαντικό περιβαλλοντικό φαινόμενο κατά το οποίο παρατηρείται αξιοσημείωτη αύξηση της

συγκέντρωσης θρεπτικών στοιχείων στον υδροφόρο ορίζοντα κάτι το οποίο οδηγεί στη μείωση του οξυγόνου που απαντάται στο νερό και αυτό κατά συνέπεια οδηγεί στην αλλοίωση της βιοποικιλότητας σε αυτό καθώς αυξάνονται με ραγδαίο ρυθμό τα φύκια. Ο φώσφορος και το άζωτο είναι δύο στοιχεία τα οποία αποτελούν τις κύριες αιτίες που οδηγούν σε ευτροφισμό, και σε δεύτερο βαθμό συμβάλλουν και άλλες χημικές ενώσεις όπως η αμμωνία (NH_3), το μονοξείδιο του αζώτου (NO), καθώς ακόμη και το υποξείδιο του αζώτου (Ansari et al., 2011).

Όσον αφορά τη μόλυνση του εδάφους, αυτή προέρχεται κατά κύριο λόγο από την καύση, ή την ταφή των κλωστοϋφαντουργικών αποβλήτων στη γη. Για λόγους τεχνικών θεμάτων, ευκολίας αλλά και για μεγαλύτερη οικονομία, συνηθίζονται οι παραπάνω δύο πρακτικές, γεγονός το οποίο ενέχει κινδύνους για την υγεία αλλά και αυξάνει σε μεγάλο βαθμό τη μόλυνση του περιβάλλοντος (Sun et al., 2024).

Τα υγρά απόβλητα τα οποία απορρέουν από τις διεργασίες στο μεγαλύτερο μέρος τους περιέχουν περίσσεια χρώματος η οποία δεν απορροφήθηκε από το προϊόν, καθώς και άλλα χημικά τα οποία χρησιμοποιούνται ως βοηθητικοί παράγοντες κατά τη διαδικασία της βαφής. Από τις 800.000 τόνους βαφής που υπολογίζεται ότι παράγονται ετησίως, περίπου το 10-15% δεν απορροφάται από το προϊόν και διαχέεται στο περιβάλλον. Τη δεδομένη στιγμή, παγκοσμίως, έχουν αναπτυχθεί πάνω από 10.000 διαφορετικά συνθετικά είδη βαφών, με το 70% αυτών να ανήκουν στην οικογένεια των αζωχρωμάτων. Τα υγρά απόβλητα τα οποία ελευθερώνονται από τις βιομηχανίες χωρίς να έχουν υποστεί κάποια επεξεργασία συνήθως περιέχουν σε μεγάλο βαθμό πλήθος οργανικών ενώσεων, χρώμα, οξέα, αλκάλια (Periyasamy, 2023), αρωματικές ενώσεις, φορμαλδεΐδη, φθοράνθρακες και πολύ συχνά διάφορα άλλα επιβλαβή και επικίνδυνα χημικά. Σε διάφορες χώρες της Ασίας όπως Ινδία, το Μπαγκλαντές, το Βιετνάμ και η Ινδονησία, παρατηρείται το φαινόμενο οι αγρότες να χρησιμοποιούν βιομηχανικά υγρά απόβλητα τα οποία δεν έχουν υποστεί κάποια επεξεργασία, για καθημερινές εργασίες όπως το πότισμα των γεωργικών εκτάσεων τους, γεγονός το οποίο έχει σοβαρές επιπτώσεις τόσο στις καλλιέργειες (όσον αφορά την ποιότητα αλλά και την ποσότητα) όσο και στο ίδιο το καλλιεργούμενο έδαφος (Periyasamy, 2024).

Αναφορικά με τις επιπτώσεις που έχουν στο νερό και στη μόλυνση του υδροφόρου ορίζοντα, οι αζωχρωστικές ουσίες αποδεδειγμένα εμποδίζουν τη διείσδυση μέρους του φωτός στο νερό, γεγονός που απορρέει στην επιβράδυνση της ανάπτυξης κυρίως των φυκιών και άλλων θαλάσσιων οργανισμών αφού η διαδικασία της φωτοσύνθεσης δεν μπορεί να επιτευχθεί σωστά. Επιπροσθέτως, οι θαλάσσιοι οργανισμοί καταναλώνουν τις βαφές και τα διάφορα χημικά που υπάρχουν στα υγρά απόβλητα που πέφτουν στη

θάλασσα γεγονός το οποίο μετατρέπει σε διάφορα επιβλαβή υποπροϊόντα της τις ουσίες αυτές, και τις καθιστά επιβλαβείς παράγοντες τόσο για τους ίδιους τους οργανισμούς αλλά ακόμη και για τους θηρευτές τους. Τα αζωχρώματα καταφέρνουν να εισχωρήσουν στον ανθρώπινο οργανισμό κυρίως μέσα από δύο οδούς: την κατάποση και την επαφή με το δέρμα. Από τη στιγμή που εισχωρήσουν στον ανθρώπινο οργανισμό και φτάσουν μέχρι τον γαστρεντερικό σωλήνα, τα χρώματα μετατρέπονται σε αμινοξέα μέσω της εντερικής χλωρίδας, και αποκτούν τοξικές ιδιότητες για τον οργανισμό έχοντας σοβαρές επιπτώσεις σε όργανα του ανθρώπου. Δερματικές παθήσεις όπως δερματίτιδες ακόμη και καρκίνος είναι μερικές από τις επιπτώσεις που εμφανίζονται στην υγεία του ανθρώπου μετά από έκθεση σε βλαβερά αζωχρώματα (Periyasamy, 2024).

Τα τελευταία χρόνια προκειμένου να μειωθούν όλα τα παραπάνω, έχουν αρχίσει να εφαρμόζονται «πράσινες» πρακτικές στη βιομηχανία, με σκοπό τη βελτιστοποίηση της χρήσης πόρων, τη μείωση της αλόγιστης κατανάλωσης νερού και τον περιορισμό της εκπομπής αερίων του θερμοκηπίου. Σκοπός είναι όλοι οι τομείς στην παραγωγή ενός προϊόντος να εφαρμόσουν «πράσινες» πρακτικές, από τη διαχείριση των πρώτων υλών μέχρι και τη συμμόρφωση με περιβαλλοντικούς κανονισμούς τους οποίους θα πρέπει η εκάστοτε βιομηχανία να ακολουθεί (Xu et al., 2024).

Υπάρχει ένας δείκτης ο οποίος ονομάζεται Περιβαλλοντικό Αποτύπωμα προϊόντος, και ο οποίος έχει δημιουργηθεί ώστε να αναδεικνύει το μέγεθος επιρροής που έχει στο περιβάλλον η δημιουργία ενός προϊόντος σε όλο τον κύκλο ζωής του, λαμβάνοντας υπόψη πολλαπλά κριτήρια όπως η επίδραση που μπορεί να έχει στην υπερθέρμανση του πλανήτη, η τοξικότητα που προκαλεί στον ανθρώπινο οργανισμό, ο ευτροφισμός, κ.α.. Ο συγκεκριμένος δείκτης λαμβάνει υπόψη του αρκετούς παράγοντες προκειμένου να μελετηθούν πολυπρισματικά οι όποιες επιπτώσεις υπάρχουν, χρησιμοποιώντας διάφορες κλίμακες για την ποσοτικοποίηση τους. Προκειμένου να μπορεί να υπάρξει μέτρο σύγκρισης μεταξύ διαφορετικών προϊόντων, είναι απαραίτητη η μετατροπή των επιπτώσεων σε έναν ενιαίο δείκτη για την ποσοτικοποίηση του. Πολλά μοντέλα έχουν κατά καιρούς προταθεί για το παραπάνω, με τα δύο επικρατέστερα να έχουν να κάνουν με την κατανομή της προέλευσης των επιπτώσεων. Το πρώτο μοντέλο αφορά τον προσανατολισμό στο πρόβλημα (problem oriented), και το δεύτερο τον προσανατολισμό με βάση την επίπτωση που προκαλεί (damage oriented) (Qianwen et al., 2024). Συνεπώς, η αξιολόγηση και η μελέτη των επιπτώσεων αποτελεί ένα απαραίτητο βήμα για την εφαρμογή των αρχών της πράσινης και κυκλικής οικονομίας. Μέσα από τα παραπάνω, οι βιομηχανίες μπορούν ευκολότερα να εφαρμόσουν πράσινες πρακτικές προκειμένου να εξοικονομήσουν σημαντικούς πόρους και να μειώσουν τα βλαβερά προς το περιβάλλον απόβλητα τους (Edirisinghe et al., 2024).

1.3 Υγρές επεξεργασίες και απόβλητα

1.3.1 Βαφή Υφασμάτων

Σε όλο τον κλάδο της κλωστοϋφαντουργίας λαμβάνοντας υπόψη τον κύκλο ζωής των προϊόντων, οι διεργασίες οι οποίες είναι κορυφαίες στην κατανάλωση νερού είναι η βαφή και το τύπωμα, έχοντας το μερίδιο του 72% της συνολικής κατανάλωσης σε νερό ανάμεσα στις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε όλο τον κλάδο (Panda et al., 2021), σε αντίθεση για παράδειγμα με το στάδιο της νηματοποίησης το οποίο έχει σαφώς λιγότερη κατανάλωση σε νερό αλλά και ηλεκτρική ενέργεια (Edirisinghe et al., 2024). Κατά τις διεργασίες της βαφής αλλά και του φινιρίσματος του προϊόντος (όπου του αποδίδονται συγκεκριμένα επιθυμητά χαρακτηριστικά), η μέση κατανάλωση του νερού μπορεί να κυμανθεί από 50 έως και 400 λίτρα ανά κιλό προϊόντος (Cinperi et al., 2019). Επίσης η μεγάλη κατανάλωση σε ηλεκτρικό ρεύμα αλλά και σε θερμότητα που χρειάζονται οι βαφικές και εκτυπωτικές μηχανές προκειμένου να λειτουργήσουν σωστά, έχουν σοβαρές περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Rubik et al., 2024). Αναλόγως τη σύνθεση του κάθε προϊόντος, οι παραπάνω παράγοντες μπορεί να αυξομειωθούν σε μεγάλο βαθμό.

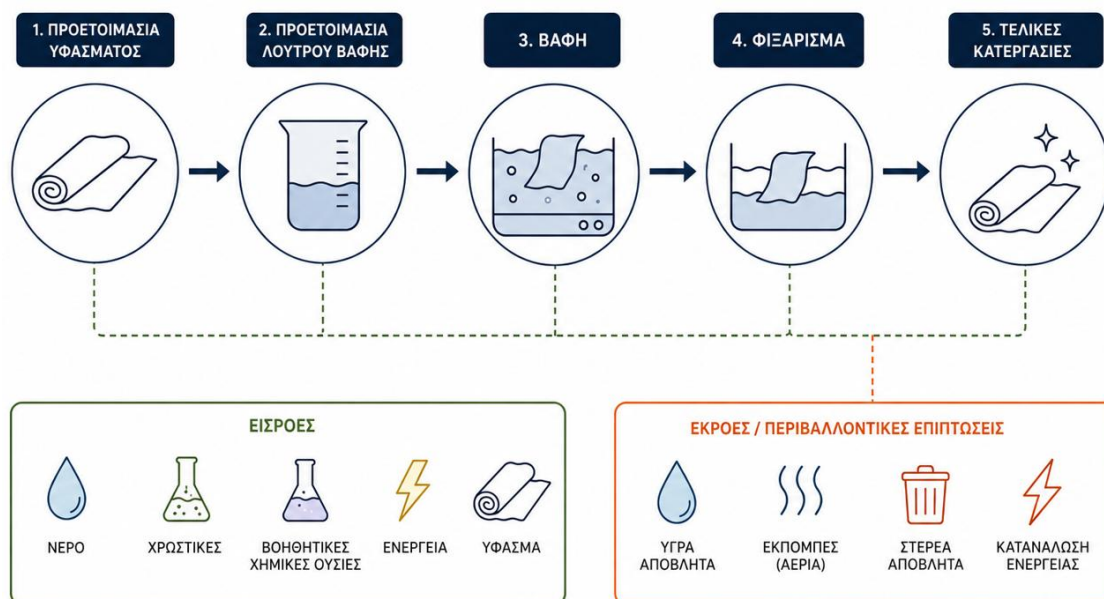
Η διαδικασία βαφής υφάσματος, έχει τις ρίζες της στα προϊστορικά ακόμη χρόνια. Ο άνθρωπος είχε βρει φυσικές και ζωικές χρωστικές οι οποίες υπήρχαν στο περιβάλλον προκειμένου να δίνει χρώμα στα ενδύματά του, όπως για παράδειγμα το φυσικό indigo το οποίο προερχόταν από το φυτό *Indigofera tinctoria*. Με την εξέλιξη της τεχνολογίας στο πέρασμα των χρόνων και την ανακάλυψη των πρώτων δι-αζω-νικών ενώσεων το 1859, άρχισε η διαδικασία της βαφής των κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων να γίνεται σημαντικός παράγοντας (Clark, 2011). Ως βαφές χαρακτηρίζονται οργανικές ενώσεις οι οποίες έχουν την ικανότητα να βάψουν σταθερά και μόνιμα ενδύματα, υφάσματα, νήματα, υφάνσιμες ίνες καθώς και την πρώτη ύλη από την οποία προέρχονται τα παραπάνω. Αξίζει να σημειωθεί ότι πρόκειται κατά κύριο λόγο για υδατοδιαλυτές ενώσεις και για το λόγο αυτό μπορούν εύκολα να εισχωρήσουν τόσο στο περιβάλλον όσο και μέσα σε κάποιον ανθρώπινο οργανισμό. Στον αντίποδα όμως, οι πολύπλοκες αρωματικές ενώσεις από τις οποίες αποτελούνται δυσχεραίνουν την αποικοδόμησή τους και τις καθιστούν αδρανείς, κάτι το οποίο δυσκολεύει σε μεγάλο βαθμό την περαιτέρω επεξεργασία τους μετά τη χρήση για την οποία προορίζονται αρχικά και κατά συνέπεια τη μόλυνση του περιβάλλοντος, αν δεν απορριφθούν σωστά (Βασιλειάδης, 1993).

Υπάρχουν διάφορες κατηγορίες στις οποίες ταξινομούνται οι βαφές. Ένας βασικός πρωτεύων διαχωρισμός είναι ο διαχωρισμός τους σε φυσικές και συνθετικές. Λόγω της τεράστιας διαθεσιμότητας πλέον σε συνθετικές βαφές (πάνω από 10.000) έχουν καταστεί ως η βασική ομάδα κατά κύριο λόγο, επιλογή απαντώνται σε πληθώρα

και είναι και οικονομικές. Σύμφωνα με τη χημεία διαχωρίζονται με βάση το ηλεκτρικό φορτίο που απελευθερώνεται κατά τη διάλυσή τους στο λουτρό και οδηγεί στις ακόλουθες τρεις ομάδες: ανιονικές βαφές [περιλαμβάνει τα χρώματα αντιδράσεως (reactive), τα όξινα χρώματα (acidic) και τα χρώματα απευθείας βαφής (direct)], τις κατιονικές βαφές [περιλαμβάνει τα βασικά/αλκαλικά χρώματα), και τέλος τις μη ιονίζουσες βαφές [περιλαμβάνει τα χρώματα διασποράς (disperse)]. Τα όξινα χρώματα είναι ανιονικές ομάδες χημικών τα οποία στη χημική τους δομή περιέχουν όξινες ομάδες όπως το θειώδες ιόν (SO_3^{2-}) και το ανιόν καρβοξυλικού οξέος ($-COO^-$), ενώ τα βασικά χρώματα είναι κατιονικά και αποτελούνται από τεταρτοταγείς αμινικές ομάδες. Τα αζωχρώματα υπερτερούν σε χρήση στην κλωστοϋφαντουργία έναντι οποιασδήποτε άλλης κατηγορίας χρωμάτων, με ποσοστό χρήσης πάνω από 60%. Ονομάζονται αζωχρώματα εξαιτίας της δομικής τους σύνθεσης καθώς περιλαμβάνουν τουλάχιστον μια αζω-ομάδα (Periyasamy, 2024). Η χρήση αζωχρωμάτων σε υφάσματα τα οποία προορίζονται για ένδυση έχει πλέον απαγορευτεί στην Ευρωπαϊκή Ένωση (Xu et al., 2024).

Οι κατηγορίες σύνθεσης υφάσματος οι οποίες θα αναφερθούν στην παρούσα εργασία είναι το βαμβάκι και πολυεστέρας. Το βαμβάκι όπως λαμβάνεται από το φυτό είναι υδρόφοβο καθώς οι ίνες του καλύπτονται από κεριά, τα οποία πριν την βαφή πρέπει να απομακρυνθούν ώστε να γίνει υδρόφιλο. Η κατεργασία με την οποία μπορεί να γίνει το παραπάνω ονομάζεται αποκήρωση, κατά την οποία με αύξηση της θερμοκρασίας σε σημείο βρασμού για πολλές ώρες και με κατάλληλους διαλύτες το κεριά απομακρύνεται. Επιπλέον προ κατεργασίες που μπορούν να λάβουν χώρα είτε πριν είτε μετά τη βαφή βαμβακιού είναι η λεύκανση (η οποία γίνεται με προσθήκη υπεροξειδίου του υδρογόνου και οξέος, το οποίο μετά πρέπει να απομακρυνθεί εξ' ολοκλήρου για να μην καταστρέψει το βαμβάκι), το καψάλισμα (κατεργασία που καίει και απομακρύνει το χνούδι), το αποκολλάρισμα, και ο μερσερισμός. Η βαφή του βαμβακιού γίνεται σε έως 80°C με χρώματα απευθείας βάφοντα κατά κύριο λόγο, αλλά μπορεί να πραγματοποιηθεί και με χρώματα αντιδράσεως. Ο πολυεστέρας αποτελεί μια πολυκρυσταλλική δομή η οποία δεν περιέχει δραστικές ομάδες για τη βαφή. Για τον παραπάνω λόγο γίνεται η χρήση φορέων, οι οποίοι είναι ουσίες που διευκολύνουν τη διάχυση του χρώματος μέσα στα μόρια των ινών. Η βαφή του πολυεστέρα γίνεται με χρώματα διασποράς, σε υπό πίεση κλειστό βαφείο σε θερμοκρασίες έως 130°C. Για τη βαφή υφασμάτων χρησιμοποιούνται μηχανές όπως Jigger, Foulard και Jet. Η επιλογή της κατάλληλης μηχανής αφορά τη σύνθεση του υλικού καθώς σε κάποιες περιπτώσεις πρέπει να γίνεται κίνηση του πανιού, σε άλλες μόνο του λουτρού βαφής και σε κάποιες περιπτώσεις και των δύο ώστε να επιτευχθεί ομοιόμορφο αποτέλεσμα (Βασιλειάδης, 1993).

ΣΤΑΔΙΑ ΒΑΦΗΣ ΥΦΑΣΜΑΤΟΣ



Σχήμα 4: Στάδια βαφής υφάσματος (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Το φινιρίσμα αποτελεί μία κατηγορία διεργασίας κατά την οποία προσδίδονται στο βαμμένο υλικό ορισμένες επιθυμητές ιδιότητες ώστε να φτάσει την τελική απαιτούμενη εμφάνιση. Επιγραμματικά, διαδικασίες φινιρίσματος οι οποίες είναι πιθανόν να λάβουν χώρα μέσα σε ένα βαφείο είναι οι παρακάτω: πλύσιμο, στύψιμο, στέγνωμα, σταθεροποίηση διαστάσεων, καψάλισμα, ξύρισμα, πιληματοποίηση, χνούδιασμα, δεκάτισμα, σιδέρωμα, καλάνδρα, μερσερισμός, καρβονισμός, κολλάρισμα, αδιαβροχοποίηση, αποκομμίωση, προστασία από φωτιά, προστασία από έντομα, προστασία από πιληματοποίηση, προστασία από το τσαλάκωμα. Για τις παραπάνω κατεργασίες απαιτούνται ποσά ενέργειας και χημικών, τα οποία με τη σειρά τους επηρεάζουν επιπρόσθετα το περιβάλλον (Βασιλειάδης, 1993). Όσον αφορά την εκτύπωση σε υφάσματα αυτή πραγματοποιείται κατά κύριο λόγο είτε με κυλίνδρους, είτε ψηφιακά, αναλόγως την κατηγορία σύνθεσης του υφάσματος. Αποτελεί επίσης διαδικασία η οποία έχει σημαντικό αντίκτυπο στο περιβάλλον καθώς είναι ενεργοβόρα και επίσης απαιτεί μια σειρά από μετεκατεργασίες να γίνουν για τη στερέωση του χρώματος, όπως ξήρανση, άτμισμα, ξηρή θέρμανση, χημική στερέωση, έκπλυση, και ωρίμανση.

Τα υγρά υπολείμματα και απόβλητα που απορρέουν από τις διαδικασίες της βαφής και του τυπώματος αποτελούν βασικό παράγοντα μόλυνσης για τη βιομηχανία της

κλωστοϋφαντουργίας (Mao et al., 2024). Κατά τις διεργασίες της βαφής των προϊόντων γίνεται χρήση νερού, ατμού, φυσικού αερίου, ηλεκτρισμού, χημικών και χρωμάτων για τη βαφή, παράγοντες οι οποίοι συνυπολογίζονται ως υπεύθυνοι για την οξίνιση του εδάφους αλλά και την υπερθέρμανση του πλανήτη. Για παράδειγμα, η χρήση καυστικής σόδας κατά τη βαφή, όπως έχει αποτυπωθεί στην διεθνή βιβλιογραφία, αυξάνει τα επίπεδα τοξικότητας της θαλάσσιας ζωής. Επιπροσθέτως, οι ρύποι οι οποίοι εκλύονται από τα μηχανήματα αποδεδειγμένα έχουν συμβάλει στην υπερθέρμανση του πλανήτη καθώς ελευθερώνουν αέρια όπως το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), μεθάνιο (CH_4) και υποξείδιο του αζώτου (N_2O) (Islam et al., 2024b). Αδήριτη ανάγκη αποτελεί η επεξεργασία των υγρών αποβλήτων τα οποία παράγονται από κλωστοϋφαντουργικές διεργασίες πριν την απόρριψή τους στον υδροφόρο ορίζοντα. Τα τελευταία χρόνια όλο και περισσότερες μελέτες εστιάζονται στον τρόπο με τον οποίο μπορεί να γίνει αποδοτικός καθαρισμός και αφαίρεση των χρωστικών από τα υγρά απόβλητα. Αποτελεί επιτακτική ανάγκη τα υγρά απόβλητα τα οποία πέφτουν στον υδροφόρο ορίζοντα να έχουν καθαριστεί από χρωστικές καθώς οι τελευταίες έχουν την ικανότητα να εισχωρήσουν και να συσσωρευτούν στις τροφικές αλυσίδες μέσα από το νερό και το χώμα. Η συσσώρευση τους στο ανθρώπινο σώμα μπορεί να οδηγήσει σε καρκινογενέσεις και ανωμαλίες στα χρωμοσώματα. Προκειμένου όλα τα παραπάνω να αποφευχθούν θα πρέπει τα μολυσμένα και επιβλαβή χημικά να απομακρύνονται μέσω επεξεργασίας από τα υγρά απόβλητα πριν την απόρριψη των τελευταίων στον υδροφόρο ορίζοντα (Periyasamy, 2024).

1.3.2 Επεξεργασία αποβλήτων μετά τη διαδικασία της βαφής

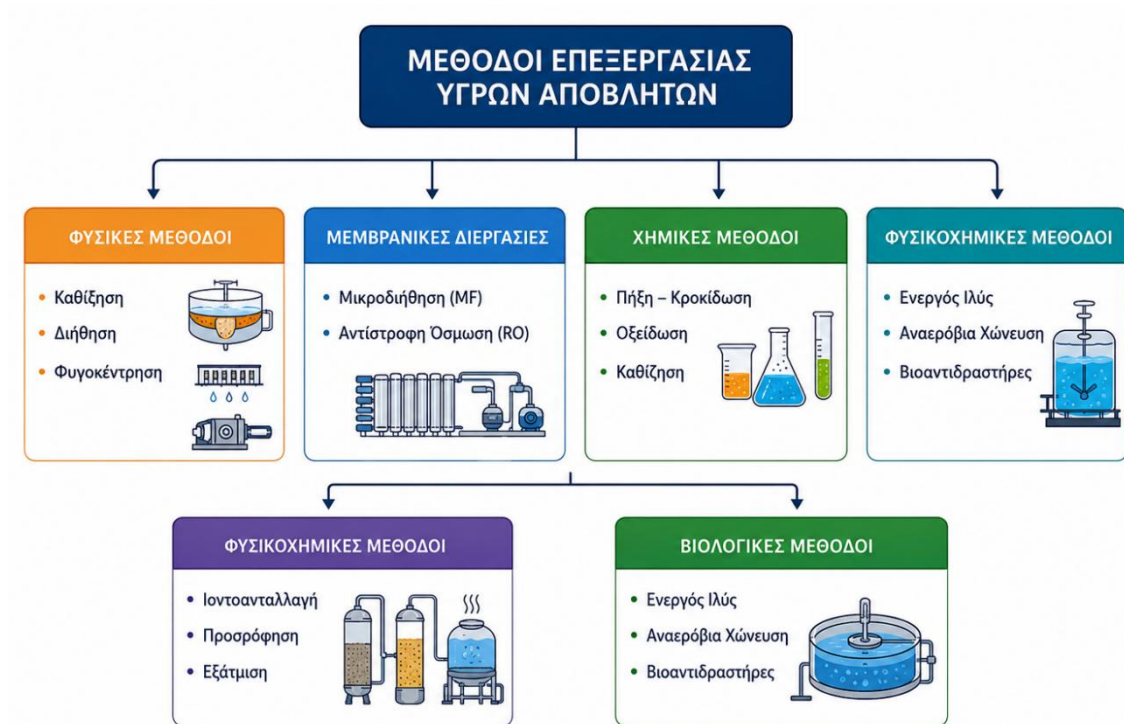
Την παρούσα χρονική περίοδο, οι μέθοδοι οι οποίοι υπάρχουν και εφαρμόζονται για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων, χωρίζονται σε τρεις διακριτές κατηγορίες: στον βιολογικό διαχωρισμό, στον χημικό διαχωρισμό, και στον φυσικό διαχωρισμό. Για παράδειγμα μία από τις τεχνικές που χρησιμοποιούνται κατά τον φυσικό διαχωρισμό είναι η χρήση μιας ειδικής μεμβράνης η οποία συγκρατεί συγκεκριμένες κατηγορίες αποβλήτων. Στην κατηγορία των χημικών μεθόδων μπορούν να αναφερθούν μέθοδοι όπως η οξείδωση, η πήξη και η φωτοχημική οξείδωση. Τέλος, όσον αφορά την κατηγορία των βιολογικών μεθόδων πραγματοποιούνται διαδοχικές αερόβιες και αναερόβιες διεργασίες για τη διάσπαση οργανικών ουσιών. Απαιτείται επίσης προσοχή στη διαχείριση των παραπάνω μεθόδων καθώς κατά την πραγμάτωση ορισμένων από των παραπάνω διαδικασιών λαμβάνουν χώρα επιπρόσθετες διαδικασίες, όπως για παράδειγμα κατά την οξείδωση πραγματοποιούνται λεύκανση, χλωρίωση και οζονοποίηση, οι οποίες απαιτούν για την αποπεράτωσή τους συγκεκριμένα χημικά όπως

όζον, υπεροξειδίο του υδρογόνου, υπερμαγγανικό κάλιο, χλώριο, διοξειδίο του χλωρίου, κ.α., τα οποία θα πρέπει να διαχειριστούν με την απαραίτητη προσοχή ώστε να μην καταλήξουν και τα ίδια ως ρυπογόνοι παράγοντες (Periyasamy, 2024).

Ακολουθεί σύντομη παρουσίαση ορισμένων μεθόδων επεξεργασίας των αποβλήτων:

Η προσρόφηση είναι φυσικοχημική διεργασία κατά την οποία ουσίες προσκολλώνται στην επιφάνεια ενός στερεού υλικού και βοηθάνε στην μετατροπή των ρύπων από την υγρή σε στερεή φάση. Είναι σημαντική διεργασία για την επεξεργασία των λυμάτων μετά τις διαδικασίες της βαφής. Σημαντικός παράγοντας για να επιτευχθεί αυτό είναι να γίνει σωστή επιλογή της ουσίας που θα οδηγήσει στην προσρόφηση. Ένας ικανός αριθμός από γεωργικά προϊόντα αλλά και απόβλητα τα οποία προέρχονται από βρώσιμα προϊόντα όπως η φλούδα της μπανάνας, τα φύλλα από το λάχανο, φλούδες από εσπεριδοειδή, το κοτσάνι από καλαμπόκι, το κέλυφος των φιστικιών, υπολείμματα ζαχαροκάλαμου, και χιτοζάνη έχει μελετηθεί ότι είναι ικανά να οδηγήσουν στη διαδικασία της προσρόφησης, συμβάλλοντας στην απομάκρυνση ορισμένων ρύπων. Η συγκεκριμένη τεχνική έχει αρκετά πλεονεκτήματα όπως ότι είναι οικονομική και αποδοτική, ότι είναι εύκολη για να πραγματοποιηθεί και ότι δεν είναι τοξική. Είναι αξιοσημείωτο ότι τα παραπάνω υλικά έχουν την ικανότητα να απορροφούν κατηγορίες βαφών (συγκεκριμένα τα χρώματα αντιδράσεως) (Periyasamy, 2024). Κατά τον αποχρωματισμό με βιολογική επεξεργασία, υπάρχουν ορισμένοι μικροοργανισμοί οι οποίοι αποδομούν τα μόρια των χρωμοφόρων ομάδων που περιέχονται στις χρωστικές. Επίσης, έχουν την ικανότητα να μετατρέπουν τις χρωστικές σε ανόργανες ενώσεις, συνήθως διοξειδίο του άνθρακα και νερό. Ο ρυθμός απομάκρυνσης εξαρτάται από διάφορους παράγοντες όπως η συγκέντρωση οξυγόνου, η θερμοκρασία, και η αναλογία της χρωστικής στο υγρό απόβλητο. Ακόμη ένας τρόπος είναι ο βιολογικός αποχρωματισμός με ένζυμα τα οποία ανήκουν ως επί το πλείστον στην κατηγορία των οξειδοαναγωγικών ενζύμων όπως οι υπεροξειδάσες, οι τυροσινάσες και οι λακκάσες. Τα παραπάνω, χρησιμοποιούνται για τον αποχρωματισμό εδαφών λόγω της αποτελεσματικότητας και της ικανότητάς τους να αποικοδομούν οργανικά απόβλητα. Τα προαναφερθέντα ένζυμα παράγονται από μύκητες, βακτήρια και φυτά και συνεπώς μπορούν να απαντηθούν σε αρκετά οικοσυστήματα. Έχει υπολογιστεί ότι ο αποχρωματισμός των λυμάτων μπορεί να γίνει ακόμη και σε ποσοστό 90% με τη χρήση ενζύμων. Στον αντίποδα υπάρχουν και μειονεκτήματα στη χρήση τους αφού έχουν μεταβλητή δραστηριότητα και μεταβάλλονται αναλόγως το pH, τη θερμοκρασία και τις περιβαλλοντικές συνθήκες (Periyasamy, 2024). Τα βακτήρια αποτελούν ακόμη μια κατηγορία μικροοργανισμών που χρησιμοποιούνται σε διαδικασίες αποχρωματισμού καθώς με τη συνεισφορά τους στην απομάκρυνση των χρωστικών ουσιών μειώνεται η

τοξικότητα των λυμάτων κατά 30% (Jadhav et al., 2010). Ο διαχωρισμός λυμάτων με μεμβράνες χρησιμοποιείται ευρέως για απόβλητα τα οποία παράγονται από βασικές διεργασίες. Κατά τη διαδικασία διήθησης, οι πόροι της μεμβράνης διαχωρίζουν αποτελεσματικά τις οργανικές ενώσεις. Τα στάδια που απαρτίζουν τη συγκεκριμένη διαδικασία είναι η υπερδιήθηση (UF), η νανοδιήθηση (NF), η αντίστροφη ώσμωση (RO) και η πρόσθια ώσμωση (Periyasamy, 2024). Η ανταλλαγή ιόντων μεταξύ ενός υλικού σε υγρή φάση και ενός σε στερεή φάση είναι μέθοδος η οποία επίσης χρησιμοποιείται χωρίς να προκαλεί εμφανή αλλαγή στη δομή του στερεού. Χρησιμοποιείται συχνά για την απομάκρυνση ανόργανων αλάτων και αμινοξέων, οργανικών οξέων κι άλλων μικρών ενώσεων (Hassan and Carr, 2018). Κατά τη διαδικασία της εξάτμισης τα υγρά απόβλητα θερμαίνονται και κυκλοφορούν ξανά και ξανά μέσα στο σύστημα ώστε να επιτευχθεί υψηλή συγκέντρωση αλάτων. Σκοπός του συμπυκνωτή που υπάρχει στο σύστημα είναι ο ατμός που δημιουργείται να μπορεί να συλλέγεται και να χρησιμοποιείται ξανά ώστε το νερό να γίνεται καθαρότερο. Επόμενη μέθοδος είναι οι προηγμένες διεργασίες οξειδωσης (AOPs), οι οποίες έχουν κάνει την εμφάνισή τους στον τομέα της κλωστοϋφαντουργίας τα τελευταία χρόνια. Εφαρμόζονται για την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων καθώς λόγω των πολύ δραστικών μορίων που διαθέτουν διασπούν τους ρύπους γρήγορα. Απομακρύνουν τους οργανικούς και ανόργανους ρύπους ενώ αυξάνουν σημαντικά και την βιοαποδομησιμότητα του υγρού. Μερικές από τις προηγμένες διεργασίες οξειδωσης είναι η οξειδωση Fenton, ο αποχρωματισμός μέσω οξειδωσης με υπεροξείδιο του υδρογόνου και καταλύτες, και ο οζονισμός. Τέλος, η διαχείριση της ιλύος (γνωστή και ως λυματολάσπη) συμβαίνει σε αναερόβιες συνθήκες, κατά την οποία η οργανική ύλη αποδομείται απουσίας οξυγόνου, παράγοντας βιοαέριο και σταθεροποιημένα υπολείμματα. Τα κύρια χαρακτηριστικά της συγκεκριμένης μεθόδου είναι η μείωση της μάζας των αποβλήτων και ο σχηματισμός μεθανίου. Στη συνέχεια εφαρμόζονται διάφορες τεχνικές επεξεργασίας όπως θερμική προ επεξεργασία, ενζυματική επεξεργασία, χημική διαλυτοποίηση, ακόμη και προ επεξεργασία με υπερήχους, προκειμένου να βελτιωθεί η βιοαποδομησιμότητα της ιλύος (Periyasamy, 2024).



Σχήμα 5: Μέθοδοι επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

1.4 Βιωσιμότητα στον κλάδο της κλωστοϋφαντουργίας

Προκειμένου να υπάρξει βιωσιμότητα στον κλάδο, πρέπει να λάβουν χώρα ριζικές αλλαγές οι οποίες θα αφορούν την επιβράδυνση του φρενήρη ρυθμού παραγωγής ο οποίος υπάρχει στην εποχή μας, αλλά και την αλλαγή νοοτροπίας της συμπεριφοράς των καταναλωτών (Hammar et al., 2024). Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, ετησίως, σε παγκόσμια κλίμακα παράγονται 92 εκατομμύρια τόνοι κλωστοϋφαντουργικών αποβλήτων (Sun et al., 2024). Από το συνολικό όγκο των μικροπλαστικών τα οποία υπάρχουν στον πλανήτη, περίπου το 35% από αυτά, έχει προέλθει από προϊόντα κλωστοϋφαντουργίας. Παγκοσμίως, μόνο το 13% των ινών καταλήγουν να ανακυκλωθούν, ενώ από αυτά μόνο το 1% έχει προέλθει από προϊόντα τα οποία έχουν διασπαστεί σε ίνες, και στη συνέχεια αυτές οι ίνες χρησιμοποιήθηκαν για την παραγωγή νέου προϊόντος (Rubik et al., 2024). Προκειμένου να μειωθεί το περιβαλλοντικό αποτύπωμα το οποίο απορρέει από τον κλάδο της κλωστοϋφαντουργίας απαιτείται να υπάρχει μια αλυσίδα από διαδικασίες σε όλο τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος, από το πρώτο στάδιο της παραγωγής των πρώτων υλών έως και την πώλησή τους στον καταναλωτή. Η ανακύκλωση των παραγόμενων προϊόντων αλλά και των πρώτων υλών αποτελεί ένα βασικό βήμα για τη μελέτη του περιβαλλοντικού αποτυπώματος, αλλά δεν επαρκεί, καθώς πρέπει να εξεταστεί όλη η αλυσίδα παραγωγής (Hammar et al., 2024). Τις τελευταίες δεκαετίες όλο και αυξάνονται οι εταιρείες οι οποίες αποζητούν να

εφαρμόσουν «πράσινες» πρακτικές στην παραγωγή. Το 1972 τα Ηνωμένα Έθνη δημιούργησαν το περιβαλλοντικό πρόγραμμα Ηνωμένων Εθνών με σκοπό την προώθηση της αειφόρου ανάπτυξης και τη θέσπιση στόχων και πρακτικών οι οποίες συμβάλλουν στην προστασία του περιβάλλοντος. Με βλέψεις στην ανάπτυξη των οικονομικών, κοινωνικών και οικολογικών παραγόντων, ορίστηκαν 17 γενικοί στόχοι βιώσιμης ανάπτυξης, οι οποίοι θα επιτευχθούν με την εφαρμογή 169 επιμέρους ποσοτικών στόχων. Επιπροσθέτως, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή εξέδωσε οδηγία για τον ολοκληρωμένο έλεγχο και την πρόληψη της ρύπανσης συγκεκριμένα για τον κλάδο της κλωστοϋφαντουργίας, έχοντας ως πρωτεύοντα σκοπό την αποδοτική και όχι αλόγιστη χρήση των φυσικών πόρων, καθώς και τη συγκράτηση όσο το δυνατόν στα χαμηλότερα όρια των αερίων εκπομπών ρύπων κατά την παραγωγική διαδικασία. Πιο συγκεκριμένα, η Ευρωπαϊκή Επιτροπή έχει εκδώσει έγγραφο αναφοράς όπου παρατίθενται οι πιο αποδοτικές διαθέσιμες τεχνικές με γνώμονα την προστασία του περιβάλλοντος, για τον κλάδο της κλωστοϋφαντουργίας. Σε παγκόσμια κλίμακα, η κινεζική κυβέρνηση εφάρμοσε το 2003 νόμο για την προώθηση πρακτικών οι οποίες θα έχουν όσο το δυνατόν λιγότερες επιβλαβείς συνέπειες στο περιβάλλον (Xu et al., 2024). Στην Ευρώπη, παρόλο που η παραγωγή κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων συνεχίζει ολοένα να αυξάνεται, η διαχείριση των αποβλήτων της παραγωγής τους παραμένει ανεπαρκής. Οι κύριες μέθοδοι οι οποίες απαντώνται είναι η ταφή και η αποτέφρωση τους. Κάτι το οποίο όμως προβλέπεται να αλλάξει σύμφωνα με την παγκόσμια στροφή στην κυκλική οικονομία. Ο στόχος ο οποίος έχει τεθεί είναι μέχρι το 2030 είναι όλα τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα τα οποία θα είναι διαθέσιμα στην Ευρώπη να έχουν μεγαλύτερο κύκλο ζωής, να έχουν τη δυνατότητα να ανακυκλωθούν, να περιέχουν όσο το δυνατόν γίνεται σε μεγαλύτερο ποσοστό ανακυκλωμένο προϊόν στη σύνθεσή τους, να μην περιέχουν επικίνδυνες χημικές ουσίες και να είναι κοινωνικά και περιβαλλοντικά βιώσιμα. Όλα τα προαναφερθέντα πρέπει να έχουν εφαρμογή σε ολόκληρη την αλυσίδα των επεξεργασιών του κύκλου ζωής ενός προϊόντος. Προσοχή πρέπει να δοθεί ειδικά σε δύο συγκεκριμένες περιπτώσεις όπου θα πρέπει να εφαρμοστούν αυστηρά μέτρα ελέγχου ώστε να μην μπορεί κάποιος να εξαπατήσει με παραπλανητικά μέσα τον καταναλωτή παρουσιάζοντας πρακτικές οι οποίες στην πραγματικότητα δεν είναι βιώσιμες (ο γνωστός όρος “greenwashing”), και δεύτερον θα πρέπει να παρακολουθείται το μέγεθος απόρριψης των μικροπλαστικών στα απόβλητα (Fonseca et al., 2023). Σκοπός είναι να προωθηθεί η ανακύκλωση κλειστού τύπου (επαναχρησιμοποίηση των υλικών που ανακυκλώνονται για την παραγωγή του ίδιου ή αρκετά παρόμοιου προϊόντος, διατηρώντας όσο γίνεται την ίδια ποιότητα) (Solis et al., 2024).

Επιτακτική ανάγκη αποτελεί η δημιουργία και η εφαρμογή δεικτών «πράσινων» πρακτικών σε όλο το εύρος της παραγωγής, όπου θα μελετώνται πρακτικές για εξοικονόμηση νερού αλλά και μείωση των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα με τον πλέον αποδοτικό τρόπο (Xu et al., 2024). Οι βιομηχανίες σχεδόν στο σύνολό τους θα πρέπει να λάβουν προληπτικά μέτρα για τη μείωση του περιβαλλοντικού τους αποτυπώματος (Edirisinghe et al., 2024). Μια σημαντική μέθοδος η οποία έχει αναγνωριστεί ως αποδοτική και αποτελεσματική για τη μείωση των εκπομπών ρύπων αλλά ταυτόχρονα και την εξοικονόμηση πρωτογενών πόρων είναι η εφαρμογή των λεγόμενων πρακτικών για «καθαρή παραγωγή». Πιο συγκεκριμένα, η αντικατάσταση χημικών και συνθετικών ουσιών με άλλων φυσικών, έχει αποδειχθεί ότι αποτελεί τον πιο αποδοτικό τρόπο για την επίτευξη των στόχων της αειφόρου ανάπτυξης στον τομέα της κλωστοϋφαντουργίας (Xu et al., 2024). Η κυριότερη διαδικασία για εφαρμογή των παρακάτω είναι η αντικατάσταση συνθετικών υλικών με άλλα, φυσικά. Χαρακτηριστικά παραδείγματα που μπορούν να αναφερθούν είναι η αντικατάσταση συνθετικών ινών με άλλες ίνες, φυσικές όπως οι ίνες μπαμπού (Nayak and Mishra, 2016), η αντικατάσταση των χημικών χρωστικών ή βοηθητικών για τη βαφή με άλλα φυσικά όπως οι πολυφαινόλες που υπάρχουν στο τσάι και μπορούν να παίξουν σημαντικό ρόλο στην απορρόφηση αλλά και τη σταθεροποίηση της βαφής (Gong et al., 2018). Μια δεύτερη σημαντική προσέγγιση εφαρμογής μη βλαβερών πρακτικών στην παραγωγή είναι η ανάπτυξη και η εφαρμογή τεχνολογικών καινοτομιών όπως για παράδειγμα η βαφή χωρίς τη χρήση νερού (Saleem et al., 2020), η λεύκανση προϊόντων χρησιμοποιώντας χαμηλότερη θερμοκρασία (Xu et al., 2024), η βαφή χωρίς άλατα (Arivithamani and Giri Dev, 2017), και άλλες καινοτόμες πρακτικές. Επιπροσθέτως, ο σωστός προγραμματισμός της παραγωγής αποτελεί παράγοντα ο οποίος επικουρεί στην εφαρμογή βιώσιμων πρακτικών καθώς μελετάται ώστε να υπάρξει βέλτιστη κατανάλωση ενέργειας και χημικών. Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις μπορούν να μειωθούν σε σημαντικό βαθμό με την αντικατάσταση της ηλεκτρικής ενέργειας που παράγεται από φυσικό αέριο, του πετρελαίου, και του άνθρακα με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας (Islam et al., 2024b). Κατά γενική ομολογία η παράταση του κύκλου ζωής ενός προϊόντος συνήθως οδηγεί στη μείωση του περιβαλλοντικού του αποτυπώματος. Στον τομέα της κλωστοϋφαντουργίας επιβεβαιώνεται το παραπάνω, καθώς οδηγεί σε μικρότερη απαίτηση για την παραγωγή περισσότερων ινών και συνεπώς οι περιβαλλοντικές συνέπειες από την παραγωγή μειώνονται επίσης (Rubik et al., 2024).

Μια σειρά από πρότυπα, οδηγίες και δείκτες αξιολόγησης έχουν εκδοθεί σε παγκόσμια εμβέλεια προκειμένου να συνεισφέρουν και να βοηθήσουν τις βιομηχανίες να

υιοθετήσουν «πράσινες» πρακτικές. Τα πιο ευρέως αναγνωρίσιμα αναφέρονται παρακάτω:

ISO 14031:2021: Αποτελεί πρότυπο το οποίο αναπτύχθηκε από την τεχνική επιτροπή του Διεθνούς Οργανισμού Τυποποίησης, και περιλαμβάνει ένα ολοκληρωμένο σύστημα αξιολόγησης για μια σειρά δεικτών περιβαλλοντικών επιδόσεων. Μπορεί να έχει εφαρμογή σ όλες τις εταιρίες. Το σύστημα αξιολόγησης προκύπτει καθώς χωρίζεται σε δύο κατηγορίες, τους δείκτες περιβαλλοντικών συνθηκών και τους δείκτες περιβαλλοντικών επιδόσεων. Η αξιολόγηση με βάση τις περιβαλλοντικές συνθήκες βοηθά την εκάστοτε εταιρεία να κατανοήσει καλύτερα τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που προκαλεί και είναι εφικτό να εφαρμοστεί μόνο όταν η εταιρεία εκπέμπει ρύπους από μια σημειακή πηγή (για παράδειγμα μια καμινάδα). Η αξιολόγηση με βάση τους δείκτες περιέχει την εξέταση μιας σειράς σημαντικών παραγόντων για την εταιρεία, όπως ο δείκτης επιχειρησιακής απόδοσης όπου αξιολογούνται καθημερινές λειτουργικές δραστηριότητες αλλά και τον δείκτη απόδοσης της διοίκησης μέσα από τον οποίο αξιολογείται η αποτελεσματικότητα της διοίκησης να φέρει εις πέρας τους περιβαλλοντικούς, κοινωνικούς, οικονομικούς και ενεργειακούς στόχους που έχει θέσει.

EMAS: Το Σύστημα Οικολογικής Διαχείρισης και Ελέγχου (Eco-Management & Audit Scheme), είναι ένα πρόγραμμα το οποίο αναπτύχθηκε από το Ευρωπαϊκό Κοινοβούλιο το 1993, και αναθεωρήθηκε ξανά το 2019. Δεν είναι υποχρεωτικό προς εφαρμογή από τις επιχειρήσεις καθώς έχει εθελοντικό χαρακτήρα. Σκοπός του είναι να αξιολογεί το επίπεδο περιβαλλοντικής απόδοσης των εκάστοτε εταιριών. Αναπτύχθηκε με σκοπό να ενθαρρύνει τις εταιρείες να εφαρμόσουν «πράσινες» πρακτικές. Οι επιχειρήσεις οι οποίες συμμετέχουν στο πρόγραμμα απαιτείται να παρέχουν με διαφάνεια όλες τις πληροφορίες που ζητούνται και να τροποποιήσουν όπου χρειαστεί τις πολιτικές που εφαρμόζουν. Τα παραπάνω εξετάζεται αν τηρούνται από ανεξάρτητους ελέγχους οι οποίοι λαμβάνουν χώρα.

ERG 2018: Οι Κατευθυντήριες Οδηγίες Περιβαλλοντικής Αναφοράς 2018 (Environmental Reporting Guidelines 2018) εκδόθηκαν από το υπουργείο βιομηχανίας και το υπουργείο περιβάλλοντος της Ιαπωνίας. Μέσα από τις συγκεκριμένες κατευθυντήριες οδηγίες οι επιχειρήσεις είναι σε θέση να συντάξουν περιβαλλοντικές εκθέσεις οι οποίες συμμορφώνονται με την ιαπωνική νομοθεσία και τα διεθνή πρότυπα. Στις εκθέσεις που συντάσσονται υπάρχουν αναφορές για περιβαλλοντικά δεδομένα και γίνεται αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιδόσεων.

WMG: Ο Οδηγός Ελαχιστοποίησης Αποβλήτων για τον κλάδο της κλωστοϋφαντουργίας (Waste Minimization Guide), εκδόθηκε το 2002 από το συμβούλιο έρευνας για το νερό

της Νοτίου Αφρικής και απευθύνεται σε επιχειρήσεις επεξεργασίας βαμβακιού και βαμβακερών υφασμάτων. Ο προαναφερθέντας οδηγός βοηθάει τις επιχειρήσεις να εντοπίσουν καθώς και να ποσοτικοποιήσουν τα παραγόμενα απόβλητα τους, έχοντας ως στόχο τη μείωση του περιβαλλοντικού τους αντίκτυπου ενώ παράλληλα βοηθάει τα επίπεδα ποιότητας του παραγόμενου προϊόντος να είναι σταθερά. Σημαντικοί παράγοντες εξέτασης του οδηγού είναι όχι μόνο η κατανάλωση νερού αλλά και η κατανάλωση ενέργειας.

CP: Το σύστημα δεικτών αξιολόγησης για πιο «καθαρή παραγωγή» στο αντικείμενο της βαφής και της εκτύπωσης. Εκδόθηκε από το υπουργείο οικολογίας και περιβάλλοντος της Κίνας, και έχει ως σκοπό να καθοδηγήσει και να ενθαρρύνει τις επιχειρήσεις να ακολουθούν αρχές για «καθαρή» παραγωγή σύμφωνα με τη νομοθεσία. Το σύστημα χωρίζει τους δείκτες αξιολόγησης σε έξι υποκατηγορίες που αφορούν τον εξοπλισμό που χρησιμοποιείται και τις τεχνικές παραγωγής που λαμβάνουν χώρα, καθώς ακόμα και την κατανάλωση πόρων και ενέργειας, την αξιοποίηση των πόρων στο μέγιστο, τις εκπομπές ρύπων, και τα χαρακτηριστικά του προϊόντος που παράγεται, και τέλος το πόσο σωστά γίνεται η διαχείριση της παραγωγής με γνώμονα την προστασία του περιβάλλοντος.

ZDHC: Η Μηδενική Απόρριψη Επικίνδυνων Χημικών (The Zero Discharge of Hazardous Chemicals) είναι μια πρωτοβουλία η οποία στοχεύει στην εξάλειψη της απελευθέρωσης επικίνδυνων χημικών ουσιών από τις βιομηχανικές διεργασίες ιδίως στον τομέα της κλωστοϋφαντουργίας. Επικίνδυνα μέταλλα και ενώσεις όπως για παράδειγμα αρσενικό (As), κάδμιο (Cd), μόλυβδος (Pb), υδράργυρος (Hg), και εξασθενές χρώμιο [Cr(VI)], έχει πλέον απαγορευτεί να χρησιμοποιούνται σε διεργασίες κλωστοϋφαντουργίας, καθώς από τη χρήση τους ελλοχεύουν σοβαροί κίνδυνοι για την ανθρώπινη υγεία και το περιβάλλον (Xu et al., 2024).

Λαμβάνοντας υπόψη ότι ο κλάδος της Κλωστοϋφαντουργίας είναι εντάσεως εργασίας και τα τελευταία χρόνια έχει βρεθεί στο προσκήνιο λόγω κοινωνικών ζητημάτων κυρίως για τις συνθήκες εργασίας των εργαζομένων, έχουν αναπτυχθεί μια σειρά από πρότυπα και άλλα εργαλεία τα οποία εξετάζουν εκτός από τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο της βιομηχανίας και κοινωνιολογικά ζητήματα. Τα σημαντικότερα από αυτά, αναφέρονται παρακάτω:

BCI: Η Πρωτοβουλία για Καλύτερο Βαμβάκι (Better Cotton Initiative) είναι ένας διεθνής οργανισμός ο οποίος στοχεύει στην προώθηση βαμβακιού το οποίο έχει παραχθεί σε καλλιέργειες κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες. Η στοχευμένη και όχι αλόγιστη χρήση νερού, ο περιορισμός της χρήσης φυτοφαρμάκων, και η βελτίωση των συνθηκών

εργασίας των αγροτών είναι μερικές μόνο από τις συνθήκες τις οποίες η BCI στοχεύει να βελτιώσει.

STeP by OEKOTEX: Η πιστοποίηση SteP by OEKOTEX (Sustainable Textile & Leather Production) αποτελεί ένα σύστημα πιστοποιήσεων το οποίο συνήθως έχει εφαρμογή σε εγκαταστάσεις παραγωγής κλωστοϋφαντουργικών αλλά και δερμάτινων προϊόντων. Αξιολογεί τις εργασιακές συνθήκες σε μια επιχείρηση, τη διαχείριση των χημικών που χρησιμοποιούνται κατά τις διεργασίες της επιχείρησης, και την περιβαλλοντική απόδοσή της. Συγκεκριμένα εξετάζεται η χρήση χημικών ουσιών που υπάρχουν στα προϊόντα ακόμα η διαχείριση των αποβλήτων και των αέριων εκπομπών, η κατανάλωση της ενέργειας και του νερού και τέλος κοινωνικά κριτήρια όπως τα εργασιακά δικαιώματα των εργαζομένων. Η συγκεκριμένη πιστοποίηση εστιάζει σε ολόκληρη τη μονάδα παραγωγής και όχι μόνο στο τελικό προϊόν.

GOTS: Το Παγκόσμιο Πρότυπο Οργανικών Κλωστοϋφαντουργικών Προϊόντων (Global Organic Textile Standard) αποτελεί ένα από τα πιο αναγνωρισμένα πρότυπα που εφαρμόζονται στο κλάδο. Το GOTS ενσωματώνει αυστηρά περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια σε όλη την εφοδιαστική αλυσίδα, και για αυτό το λόγο αναγνωρίζεται ως ένα από τα πιο αυστηρά πρότυπα. Τα βασικά κριτήρια τα οποία μελετώνται είναι η χρήση τοξικών χημικών, αν οι διεργασίες της επιχείρησης γίνονται με γνώμονα την προστασία του περιβάλλοντος, η τήρηση σύμφωνα με τις νομοθεσίες όλων των κοινωνικών κριτηρίων τα οποία αφορούν τους εργαζομένους και τέλος η ύπαρξη διαφάνειας ώστε να μπορεί να γίνει η ιχνηλασιμότητα του προϊόντος σε ολόκληρη την εφοδιαστική αλυσίδα. Εκτός από όλα τα παραπάνω κριτήρια, ένα προϊόν για να μπορεί να φέρει το λογότυπο GOTS και την πιστοποίηση θα πρέπει να απαρτίζεται στη σύνθεση του τουλάχιστον από 70% οργανικές ίνες.

GRS: Το Παγκόσμιο Πρότυπο για Ανακυκλωμένα Υλικά (Global Recycled Standard) είναι ένα διεθνές πρότυπο πιστοποίησης για προϊόντα τα οποία απαρτίζονται στη σύνθεσή τους τουλάχιστον από 20% ανακυκλωμένα υλικά. Παρέχει πλήρη ιχνηλασιμότητα σε όλη την εφοδιαστική αλυσίδα, και εξετάζει τις παραγωγικές διαδικασίες, το κομμάτι διαχείρισης των χημικών καθώς και τα περιβαλλοντικά και κοινωνικά κριτήρια.

Bluesign ®: Η συγκεκριμένη πιστοποίηση εστιάζει στη διαχείριση των εισροών, διασφαλίζοντας τη χρήση ασφαλών χημικών ουσιών και τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε όλη την αλυσίδα παραγωγής χωρίς να έχει ως σκοπό μόνο την ασφάλεια των καταναλωτών (Fidan et al., 2025).

1.4.1 Κυκλική Οικονομία

Προκειμένου να υπάρξει μείωση των επιπτώσεων στο περιβάλλον, θα πρέπει οι διαδικασίες παραγωγής να εναρμονιστούν με τις αρχές της κυκλικής οικονομίας. Μέθοδοι όπως η επαναχρησιμοποίηση προϊόντων καθώς και η ανακύκλωσή τους μπορούν να συμβάλουν αξιοσημείωτα ώστε να καταστήσουν τον κλάδο περισσότερο βιώσιμο (Abagnato et al., 2024). Ο ορισμός της Ευρωπαϊκής Επιτροπής για την κυκλική οικονομία περιγράφεται ως ένα σύστημα οικονομίας μέσα στο πλαίσιο του οποίου η αξία των προϊόντων, των υλικών, καθώς και άλλων πόρων διατηρείται για όσο το δυνατόν περισσότερο, ενισχύοντας παράλληλα την αποδοτική χρησιμοποίησή τους στην παραγωγή και την κατανάλωση, μειώνοντας τον περιβαλλοντικό τους αντίκτυπο, με σημαντική μείωση των αποβλήτων και της έκλυσης επικινδύνων χημικών ουσιών στα διάφορα στάδια του κύκλου ζωής ενός προϊόντος (Rubik et al., 2024). Οι βασικές αρχές της κυκλικής οικονομίας όπως η επαναχρησιμοποίηση αλλά και η ανακύκλωση υλικών, καθώς και ο σχεδιασμός τους εξ' αρχής ώστε να μπορούν να αποδομηθούν με ευκολία, είναι μερικές από τις πράσινες τακτικές οι οποίες μπορούν να εφαρμοστούν σε αρκετά στάδια του κύκλου ζωής των προϊόντων (Edirisinghe et al., 2024).

Η προσέγγιση της κυκλικής οικονομίας αποκτά ιδιαίτερη σημασία για την κλωστοϋφαντουργία, καθώς συνδέεται άμεσα με τις πολιτικές της Ευρωπαϊκής Ένωσης για τη μετάβαση σε πιο βιώσιμα και κυκλικά πρότυπα παραγωγής και κατανάλωσης. Η στρατηγική της Ευρωπαϊκής Ένωσης για βιώσιμα και κυκλικά κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα θέτει ως βασικό στόχο, έως το 2030, τα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα που διατίθενται στην αγορά της ΕΕ να είναι περισσότερο ανθεκτικά, να μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν καθώς και να ανακυκλωθούν. Επίσης, θα πρέπει να περιέχουν σε μεγαλύτερο βαθμό ανακυκλωμένες ίνες, και να μην φέρουν επικίνδυνες ουσίες. Τέλος, θα πρέπει να παράγονται με σεβασμό στο περιβάλλον και στα κοινωνικά δικαιώματα. Με τον τρόπο αυτό η κυκλικότητα δεν αντιμετωπίζεται μόνο ως ζήτημα διαχείρισης αποβλήτων στο τέλος ζωής των προϊόντων, αλλά ως συνολική στρατηγική που ξεκινά από το στάδιο του σχεδιασμού του προϊόντος (European Commission, 2026). Παράλληλα, η Ευρωπαϊκή Ένωση προωθεί την ανάπτυξη τεχνολογιών συλλογής, διαλογής και ανακύκλωσης, με στόχο τη μείωση της εξάρτησης από πρωτογενείς ύλες και τον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με την παραγωγή νέων υλικών (European Commission, 2022).

Σύμφωνα με το Ellen MacArthur Foundation, η κυκλική οικονομία απαιτεί αλλαγές σε ολόκληρη την αλυσίδα ροής του προϊόντος στον κλάδο της κλωστοϋφαντουργίας, από τον σχεδιασμό και την παραγωγή έως τη χρήση και τη μεταγενέστερη αξιοποίηση των προϊόντων. Ιδιαίτερη σημασία δίνεται σε διεργασίες οι οποίες διατηρούν τα προϊόντα

«ζωντανά» όπως η επισκευή, η μεταπώληση, ακόμη και η ενοικίαση. Η προσέγγιση είναι μεγάλης σημασίας καθώς επιδιώκει να αποσυνδέσει την οικονομική δραστηριότητα από τη συνεχή κατανάλωση πρώτων υλών και συνεπώς την παραγωγή αποβλήτων (Ellen MacArthur Foundation, 2019).

Προσέγγιση κυκλικής οικονομίας	Εφαρμογή στην κλωστοϋφαντουργία
Οικολογικός σχεδιασμός	Σχεδιασμός προϊόντων ώστε να είναι ανθεκτικά, να μπορούν να επισκευαστούν, να επαναχρησιμοποιηθούν και να ανακυκλωθούν.
Διατήρηση προϊόντων σε χρήση	Επισκευή, μεταπώληση, ενοικίαση, ανακατασκευή
Αξιοποίηση ανακυκλωμένων ινών	Μείωση της εξάρτησης από πρωτογενείς πρώτες ύλες
Περιορισμός επικίνδυνων ουσιών	Χρήση ασφαλέστερων χημικών και περιορισμός ουσιών που δυσκολεύουν την ανακύκλωση
Ανακύκλωση υλικών	Ανάπτυξη συστημάτων συλλογής, διαλογής και ανακύκλωσης

Πίνακας 1: Βασικές αρχές κυκλικής οικονομίας και εφαρμογές στην κλωστοϋφαντουργία.

Τα τελευταία χρόνια, ο όρος της κυκλικής οικονομίας εφαρμόζεται από όλο και περισσότερες βιομηχανίες ως λύση ώστε να μπορέσουν να μειώσουν το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα κρατώντας παράλληλα ζωντανά για όσο περισσότερο είναι εφικτό, προϊόντα τα οποία έφτασαν ήδη μια φορά στο τέλος της καταναλωτικής αλυσίδας (Fidan et al., 2024). Ο κλάδος της κλωστοϋφαντουργίας αντιμετωπίζει ακόμη και σήμερα μεγάλες δυσκολίες στην εφαρμογή της κυκλικής οικονομίας. Η προσοχή πρέπει να στραφεί στη χρήση των κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων για όσο το δυνατόν πιο μεγάλη διάρκειας ζωής τους (Rubik et al., 2024). Όταν ένα προϊόν φτάσει στο σημείο όπου δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί άλλο, θα πρέπει να επιλεγεί το επόμενο βήμα μέσα από δύο κατηγορίες: Η πρώτη αφορά προϊόντα τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν ξανά, ενώ η δεύτερη προϊόντα τα οποία είναι εφικτό να ανακυκλωθούν. Από οικονομικής άποψης είναι προτιμητέα η λύση της επαναχρησιμοποίησης των προϊόντων καθώς ενέχει τις λιγότερες συνέπειες για το περιβάλλον. Τα προϊόντα τα οποία δεν μπορούν να

ξανά χρησιμοποιηθούν και πρέπει να ανακυκλωθούν, από οικονομικής άποψης είναι πιο δύσκολα διαχειρίσιμα από τις επιχειρήσεις καθώς το όποιο οικονομικό όφελος το οποίο υπάρχει στο τελικό στάδιο είναι πολύ μικρό και μετά βίας ξεπερνά το κόστος μεταφοράς του υλικού προς τις εγκαταστάσεις για ανακύκλωση (Abagnato et al., 2024).

1.4.2 Ανακύκλωση κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων

Οι διαδικασίες ανακύκλωσης στον κλάδο της κλωστοϋφαντουργίας, αφορούν δραστηριότητες κατά τις οποίες αναζητούνται πόροι για επαναχρησιμοποίηση τους σε κάποιο προϊόν, εξαιρουμένης της ανάκτησης ενέργειας (Rubik et al., 2024). Είναι γεγονός ότι το ποσοστό της ανακύκλωσης κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων σε παγκόσμια κλίμακα ακόμα είναι μικρό με λιγότερο από 1% των προϊόντων που παράγονται να καταλήγουν σε διαδικασίες ανακύκλωσης για την παραγωγή νέων ινών (Hammar et al., 2024). Ακόμη και στις μέρες μας δεν υπάρχουν μεγάλες εγκαταστάσεις για ανακύκλωση κλωστοϋφαντουργικών ειδών καθώς βρίσκονται ακόμη σε διαδικασία ανάπτυξης (Abagnato et al., 2024).



Σχήμα 6: Ανακύκλωση στην κλωστοϋφαντουργία (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Σε σύγκριση με άλλες μεθόδους διαχείρισης χρησιμοποιημένων προϊόντων, οι έρευνες έχουν δείξει ότι η ανακύκλωση υπερτερεί αισθητά, σε συνάρτηση όμως πάντα με την ποιότητα του προϊόντος το οποίο ανακυκλώνεται αλλά και τον ρυθμό τον οποίο οι

πρωτογενείς ίνες μπορούν να αντικατασταθούν (Sandin and Peters, 2018). Σε περιπτώσεις όπου γίνεται αποτελεσματική ανακύκλωση των κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων τα οποία έχουν απορριφθεί, έχει αποδειχθεί ότι ο κύκλος ζωής τους μπορεί να μεγαλώσει και επιπροσθέτως όλες οι βλαβερές επιπτώσεις που εμφανίζονται κατά τη δημιουργία τους να αντισταθμιστούν (Sun et al., 2024). Για να θεωρηθεί μια διαδικασία ανακύκλωσης εποικοδομητική, υπάρχουν αρκετοί παράγοντες οι οποίοι πρέπει να συνυπολογίζονται, όπως η ικανότητα ανακύκλωσης των διαλυτών που χρησιμοποιούνται, η κατανάλωση ενέργειας που απαιτείται, η πηγή από την οποία προέρχεται, το είδος της προ κατεργασίας το οποίο θα επιλεγεί, καθώς και το είδος και η ποσότητα των αποβλήτων τα οποία θα παραχθούν κατά τη διαδικασία της ανακύκλωσης. Όλοι οι παραπάνω παράγοντες συνηγορούν ότι ακόμη απαιτούνται έρευνες να συνεχίσουν να γίνονται για την περαιτέρω βελτίωση του συστήματος, καθώς πρέπει να μελετηθούν πολύ προσεκτικά οι επιπτώσεις που εμφανίζονται εκ των υστέρων στο περιβάλλον (Hammar et al., 2024).

Βασικό στοιχείο για να υπάρξει μια άρτια διαδικασία ανακύκλωσης είναι ο σωστός διαχωρισμός της προέλευσης των κλωστοϋφαντουργικών αποβλήτων. Ένας από τους κύριους διαχωρισμούς αποτελεί ο διαχωρισμός μεταξύ των προ-καταναλωτικών αποβλήτων (παραδείγματος χάρη των υπολειμμάτων από διαδικασίες παραγωγής) και των μετά την κατανάλωση αποβλήτων (κατά κύριο λόγο χρησιμοποιημένα ρούχα). Η βέλτιστη λύση επιτυγχάνεται με βοήθεια από τα εργοστάσια διαλογής τα οποία διαχωρίζουν και κατανέμουν τα απόβλητα σε κατηγορίες (Rubik et al., 2024). Τα προϊόντα τα οποία βρίσκονται σε κατάσταση που δεν επιδέχονται περαιτέρω χρήση, καταλήγουν σε διαδικασίες ανακύκλωσης ανοιχτού τύπου όπου θα μετατραπούν σε ένα νέο προϊόν έτοιμο προς χρήση. Ο όρος ανοιχτού τύπου ανακύκλωση σημαίνει ότι οι ίνες από το προϊόν το οποίο ανακυκλώνεται δεν θα χρησιμοποιηθούν για να ξαναφτιαχτεί το ίδιο προϊόν αλλά για τη δημιουργία ενός νέου διαφορετικού προϊόντος συνήθως χαμηλότερης ποιότητας (Fidan et al., 2024).

Έχουν αναπτυχθεί τεχνολογίες για την ανακύκλωση των κλωστοϋφαντουργικών αποβλήτων και τη μετατροπή τους σε νέες ίνες, με πιο γνωστές τη μηχανική και την χημική ανακύκλωση. Το μεγαλύτερο ποσοστό εφαρμογής ανήκει στη μηχανική ανακύκλωση κατά την οποία το προϊόν τεμαχίζεται σε πολύ μικρά κομμάτια. Η συγκεκριμένη μέθοδος όμως έχει ως βασικό μειονέκτημα ότι η ποιότητα του νέου παραγόμενου προϊόντος είναι χαμηλότερη από του αρχικού. Στον αντίποδα, με τη χημική ανακύκλωση μπορεί να επιτευχθεί η παραγωγή του νέου προϊόντος στην ίδια ποιότητα με το αρχικό προϊόν, αλλά δεν εφαρμόζεται ακόμη σε διευρυμένη κλίμακα (Ribul et al., 2021). Επιπροσθέτως, έχουν αναφερθεί και κάποιοι ενδοιασμοί για το αν η χημική

ανακύκλωση στο σύνολό της δημιουργεί περισσότερα μειονεκτήματα αντί πλεονεκτήματα στο περιβάλλον (Hammar et al., 2024). Χημική ανακύκλωση μπορεί να επιτευχθεί εφαρμόζοντας διάφορες διαδικασίες όπως η διάσπαση και η μετατροπή σε πολτό, υλικών που περιέχουν ως βάση την κυτταρίνη και ο διαχωρισμός με χρήση ειδικών διαλυτών για υλικά από συνθετικές ίνες. Για σύμμεικτα προϊόντα (προϊόντα τα οποία αποτελούνται από παραπάνω από μία κατηγορία σύνθεσης), χρησιμοποιείται η τεχνική της διάλυσης (Solis et al., 2024). Σε πιο μικρή κλίμακα εφαρμογής απαντώνται και άλλα είδη ανακύκλωσης όπως η θερμική ανακύκλωση κατά την οποία τα απόβλητα υπόκεινται σε διαδικασίες πολύ υψηλών θερμοκρασιών και τα υπολείμματα τους χρησιμοποιούνται για ανάκτηση ενέργειας ή καυσίμων. Ακόμη μία τεχνική που εφαρμόζεται είναι η θερμομηχανική ανακύκλωση η οποία χρησιμοποιείται κυρίως για θερμοπλαστικές ίνες όπως για παράδειγμα ο πολυεστέρας, και κατά την οποία υπάρχει μεγάλη θερμοκρασία, ενώ ταυτόχρονα το προς ανακύκλωση υλικό υπόκειται σε μηχανική επεξεργασία όπως τήξη και στη συνέχεια εξώθηση. Στη συγκεκριμένη τεχνική αξίζει να σημειωθεί ότι κάποιες ιδιότητες όπως το χρώμα του υπάρχοντος υλικού δεν αφαιρούνται και συνεχίζουν να υπάρχουν και στο προϊόν μετά την ανακύκλωση. Μια τεχνική ακόμη η οποία αναπτύσσεται είναι αυτή της ανακύκλωσης μονομερών, όπου τα πολυμερή διασπώνται στα βασικά τους δομικά στοιχεία, και στη συνέχεια αυτά ανακυκλώνονται σε νέα (Rubik et al., 2024). Κατά τη μηχανική ανακύκλωση, οι ίνες που έχουν δημιουργηθεί από τον κατακερματισμό του προϊόντος, τραβιούνται μηχανικά και ευθυγραμμίζονται, ώστε να μορφοποιηθούν σε νήμα με τη διαδικασία της κλώσης. Αυτές οι ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε για να φτιαχτούν προϊόντα με τις ίδιες ιδιότητες που είχαν πριν είτε να γίνει υποβάθμιση της ποιότητας και να χρησιμοποιηθούν ως ίνες για μόνωση και γέμισμα σε ρούχα, είτε να μορφοποιηθούν σε μη υφάνσιμα προϊόντα. Η μηχανική και η χημική ανακύκλωση δεν αναιρούν η μία την άλλη και συνήθως συνεργάζονται, αφού μετά τη χημική ανακύκλωση είναι σύνηθες να ακολουθούν και διαδικασίες μηχανικής ανακύκλωσης (Abagnato et al., 2024). Για να μπορέσουν οι ανακυκλωμένες ίνες να χρησιμοποιηθούν εκ νέου όπως στην αρχική τους κατάσταση, θα πρέπει οι νέες ίνες να έχουν παρόμοιες ιδιότητες με αυτές που είχαν εξ' αρχής. Κατά τις διαδικασίες ανακύκλωσης όμως λόγω των μηχανικών και θερμικών καταπονήσεων που υφίστανται τα υλικά υπάρχουν περιπτώσεις όπου δημιουργείται η ανάγκη για προσθήκη ποσότητας πρωτογενών ινών. Αν δεν γίνει η προσθήκη, το τελικό προϊόν θα έχει σαφώς χαμηλότερες προδιαγραφές ποιότητας από το αρχικό. Προκειμένου να διασφαλιστεί η υψηλή ποιότητα των τελικών προϊόντων απαιτείται αυξημένη κατανάλωση ενέργειας και άλλων πόρων (Rubik et al., 2024).

Ένα ένδυμα το οποίο θα κατασκευαστεί από ανακυκλωμένες ίνες δεν θα πρέπει να διαφέρει από ένα συμβατικό. Το ύφασμα που θα φτιαχτεί θα πρέπει να είναι ανθεκτικό σε όλες τις καταπονήσεις που θα προέλθουν από τη χρήση του. Επιπροσθέτως θα πρέπει να είναι άνετο, παράγοντας ο οποίος είναι σημαντικός ώστε να μπορέσει να χρησιμοποιηθεί μακροχρόνια. Αυτό είναι δυνατόν να επιτευχθεί λαμβάνοντας υπόψη τις ιδιότητες των ινών, την κατασκευή του υφάσματος καθώς και το πατρών του ρούχου. Η πυκνότητα του υφάσματος, και η διαπερατότητα αέρα και υγρασίας είναι παράγοντες που παίζουν σημαντικό ρόλο στην άνεση του χρήστη. Το προσδόκιμο ζωής του συγκεκριμένου ενδύματος μπορεί να αυξηθεί με το σωστό φινίρισμα είτε κατά τη μορφή υφάσματος είτε στο τελικό προϊόν. Τέλος, προκειμένου να αποφευχθούν οι όποιες αστοχίες, θα πρέπει να γίνει έλεγχος ποιότητας του προϊόντος σε διάφορα στάδια, ώστε να εξασφαλίζεται ότι το προϊόν πληροί τις προδιαγραφές. Όσον αφορά τις κατηγορίες σύνθεσης των προϊόντων, Η πιο διαδεδομένη κατηγορία η οποία ανακυκλώνεται είναι αυτή των προϊόντων τα οποία προέρχονται από πολυεστέρα, όπου παρόλη την εξέλιξη των τεχνικών που έχουν ήδη αναπτυχθεί απαιτείται ακόμη μελέτη για πιο αποδοτικές τεχνικές όσον αφορά τον ενεργειακό τους αντίκτυπο (Rubik et al., 2024). Αξίζει να σημειωθεί ότι το 99% του πολυεστέρα που ανακυκλώνεται γίνεται με μηχανική ανακύκλωση (Abagnato et al., 2024). Οι κατηγορίες σύνθεσης για τις οποίες δεν πραγματοποιείται ακόμα ανακύκλωση σε μεγάλη κλίμακα είναι οι κατηγορίες του βαμβακιού και του λυοσέλ (Rubik et al., 2024).

Η Κίνα αποτελεί την πρωτοπόρο χώρα στον τομέα της ανακύκλωσης κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων, συνεπακόλουθο καθώς αποτελεί και τη μεγαλύτερη βιομηχανία του τομέα παγκοσμίως. Σύμφωνα με στατιστικά στοιχεία που έχει εκδώσει το υπουργείο εμπορίου της χώρας, κάθε χρόνο στην Κίνα παράγονται περισσότεροι από 20 εκατομμύρια τόνοι κλωστοϋφαντουργικών απορριμμάτων ενώ το 2021 το αντίστοιχο νούμερο της ανακύκλωσης των προϊόντων ήταν 4,8 εκατομμύρια τόνοι. Μέχρι το 2030, η κυβέρνηση της Κίνας έχει θέσει ως όριο το 30% των αποβλήτων της βιομηχανίας να οδεύει προς ανακύκλωση (Sun et al., 2024). Ο λόγος για τον οποίο στην Κίνα υπάρχει σημαντικό ποσοστό ανακύκλωσης οφείλεται στην ίδια την κυβέρνηση της χώρας η οποία είχε θεσπίσει μια σειρά από πολιτικές για εξοικονόμηση της ενέργειας αλλά και τη μείωση της εκπομπής αερίων ρύπων από τις βιομηχανίες, και για αυτό το λόγο οι επιχειρήσεις παρουσιάζονται πιο ευαισθητοποιημένες σε θέματα προστασίας του περιβάλλοντος (Zhang et al., 2020). Στην Κίνα εμφανίστηκαν και οι πρώτες εφαρμογές ανακύκλωσης ειδών τα οποία ενώ δεν προήλθαν από τον κλάδο της κλωστοϋφαντουργίας, μετά την επεξεργασία τους κατέληγαν να γίνονται ανακυκλωμένες ίνες. Η πιο γνωστή μέθοδος η

οποία είναι και χαμηλού κόστους αφορά την ανακύκλωση μπουκαλιών από PET [Πολύ(τερεφθαλικό αιθυλενεστέρα)] (Sun et al., 2024).

Στα χρόνια που θα ακολουθήσουν, η διαδικασία της ανακύκλωσης των κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων θα διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο αφού πρωτογενείς πηγές όπως πετρέλαιο, άνθρακας και άλλα ορυκτά καύσιμα θα χρησιμοποιούνται όλο και λιγότερο, και συνεπώς θα υπάρξει ανάγκη για ανακύκλωση προϊόντων, καθώς με αυτή εξοικονομούνται πρώτες ύλες και προστατεύονται φυσικοί πόροι. Βασική προϋπόθεση είναι η εξασφάλιση της παραδοχής ότι η ενέργεια η οποία απαιτείται για την ανακύκλωση δεν υπερβαίνει αυτή την η οποία απαιτείται για την παραγωγή των αρχικών πρώτων υλών (Rubik et al., 2024).

Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- Abagnato, S., Rigamonti, L., Grosso, M., 2024. Life cycle assessment applications to reuse, recycling and circular practices for textiles: A review. *Waste Management* 182, 74–90. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.04.016>
- Ansari, A.A., Singh Gill, S., Lanza, G.R., Rast, W. (Eds.), 2011. *Eutrophication: causes, consequences and control*. Springer Netherlands, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9625-8>
- Arivithamani, N., Giri Dev, V.R., 2017. Sustainable bulk scale cationization of cotton hosiery fabrics for salt-free reactive dyeing process. *Journal of Cleaner Production* 149, 1188–1199. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.162>
- Becker, H.A., 2001. Social impact assessment. *European Journal of Operational Research* 128, 311–321. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00074-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00074-6)
- Chen, Y.-G., He, X.-L.-S., Huang, J.-H., Luo, R., Ge, H.-Z., Wołowicz, A., Wawrzekiewicz, M., Gładysz-Płaska, A., Li, B., Yu, Q.-X., Kołodziejka, D., Lv, G.-Y., Chen, S.-H., 2021. Impacts of heavy metals and medicinal crops on ecological systems, environmental pollution, cultivation, and production processes in China. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 219, 112336. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112336>
- Chequer, F.M.D., Angeli, J.P.F., Ferraz, E.R.A., Tsuboy, M.S., Marcarini, J.C., Mantovani, M.S., De Oliveira, D.P., 2009. The azo dyes Disperse Red 1 and Disperse Orange 1 increase the micronuclei frequencies in human lymphocytes and in HepG2 cells. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis* 676, 83–86. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2009.04.004>
- Cinperi, N.C., Ozturk, E., Yigit, N.O., Kitis, M., 2019. Treatment of woolen textile wastewater using membrane bioreactor, nanofiltration and reverse osmosis for reuse in production processes. *Journal of Cleaner Production* 223, 837–848. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.166>
- Clark, M. (Ed.), 2011. *Handbook of textile and industrial dyeing*, Woodhead Publishing Series in Textiles. Woodhead Publishing Limited, Oxford ; Philadelphia.
- Department of Textiles and Apparel Designing, College of Community Science, AAU Jorhat, Konwar, M., 2020. Textile Industry and Its Environmental Impacts: A Review. *Ind. J. Pure App. Biosci.* 8, 134–139. <https://doi.org/10.18782/2582-2845.7848>
- Edirisinghe, L.G.L.M., De Alwis, A.A.P., Wijayasundara, M., 2024. Sustainable circular practices in the textile product life cycle: A comprehensive approach to

- environmental impact mitigation. *Environmental Challenges* 16, 100985. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100985>
- Ellen MacArthur Foundation, 2017. A new textiles economy: redesigning fashion's future.
- European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability., 2010. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook :general guide for life cycle assessment : detailed guidance. Publications Office, LU. <https://doi.org/10.2788/38479>
- Fidan, F.Ş., Aydoğan, E.K., Uzal, N., 2025. Comprehensive analysis of social subcategories throughout life cycle assessment approach for the textile industry. *Int J Life Cycle Assess* 30, 1464–1479. <https://doi.org/10.1007/s11367-024-02340-8>
- Fidan, F.Ş., Aydoğan, E.K., Uzal, N., 2024. Sustainability assessment of denim fabric made of PET fiber and recycled fiber from postconsumer PET bottles using LCA and LCC approach with the EDAS method. *Integrated Environmental Assessment and Management* 20, 2347–2365. <https://doi.org/10.1002/ieam.4979>
- Fonseca, A., Ramalho, E., Gouveia, A., Henriques, R., Figueiredo, F., Nunes, J., 2023. Systematic Insights into a Textile Industry: Reviewing Life Cycle Assessment and Eco-Design. *Sustainability* 15, 15267. <https://doi.org/10.3390/su152115267>
- Gong, J., Wang, F., Ren, Y., Li, Z., Zhang, J., Li, Q., 2018. Preparation of biomass pigments and dyeing based on bioconversion. *Journal of Cleaner Production* 182, 301–312. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.219>
- Hammar, T., Peñaloza, D., Hanning, A.-C., 2024. Life cycle assessment of a circular textile value chain: the case of a garment made from chemically recycled cotton. *Int J Life Cycle Assess* 29, 1880–1898. <https://doi.org/10.1007/s11367-024-02346-2>
- Hassan, M.M., Carr, C.M., 2018. A critical review on recent advancements of the removal of reactive dyes from dyehouse effluent by ion-exchange adsorbents. *Chemosphere* 209, 201–219. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.043>
- Islam, S., Hasan, A.K.M.M., Bhuiyan, M.A.R., Bhat, G., 2024. Evaluation of environmental impacts of cotton polo shirt production in Bangladesh using life cycle assessment. *Science of The Total Environment* 926, 172097. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172097>
- Jadhav, J.P., Kalyani, D.C., Telke, A.A., Phugare, S.S., Govindwar, S.P., 2010. Evaluation of the efficacy of a bacterial consortium for the removal of color, reduction of heavy metals, and toxicity from textile dye effluent. *Bioresource Technology* 101, 165–173. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.027>
- Kishor, R., Purchase, D., Saratale, G.D., Saratale, R.G., Ferreira, L.F.R., Bilal, M., Chandra, R., Bharagava, R.N., 2021. Ecotoxicological and health concerns of persistent coloring pollutants of textile industry wastewater and treatment approaches for environmental safety. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9, 105012. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.105012>
- Mao, J., Chen, H., Xu, X., Zhu, L., 2024. Assessing greenhouse gas emissions from the printing and dyeing wastewater treatment and reuse system: Potential pathways towards carbon neutrality. *Science of The Total Environment* 927, 172301. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172301>
- Nayak, L., Mishra, S.P., 2016. Prospect of bamboo as a renewable textile fiber, historical overview, labeling, controversies and regulation. *Fash Text* 3, 2. <https://doi.org/10.1186/s40691-015-0054-5>
- Panda, S.K.B.C., Sen, K., Mukhopadhyay, S., 2021. Sustainable pretreatments in textile wet processing. *Journal of Cleaner Production* 329, 129725. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129725>

- Periyasamy, A., 2023. Microfiber Emissions from Functionalized Textiles: Potential Threat for Human Health and Environmental Risks. *Toxics* 11, 406. <https://doi.org/10.3390/toxics11050406>
- Periyasamy, A.P., 2024. Recent Advances in the Remediation of Textile-Dye-Containing Wastewater: Prioritizing Human Health and Sustainable Wastewater Treatment. *Sustainability* 16, 495. <https://doi.org/10.3390/su16020495>
- Qianwen, H., Cai, H., Can, L., Xin, L., Lisha, Z., Laili, W., 2024. Comprehensive assessment methods of environmental impacts during textile production. *Industria Textila* 75, 157–163. <https://doi.org/10.35530/IT.075.02.20238>
- Ribul, M., Lanot, A., Tommencioni Pisapia, C., Purnell, P., McQueen-Mason, S.J., Baurley, S., 2021. Mechanical, chemical, biological: Moving towards closed-loop bio-based recycling in a circular economy of sustainable textiles. *Journal of Cleaner Production* 326, 129325. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129325>
- Rubik, F., Nebel, K., Klusch, C., Karg, H., Hecht, K., Gerbig, M., Gärtner, S., Boldrini, B., 2024. Textiles on the Path to Sustainability and Circularity—Results of Application Tests in the Business-to-Business Sector. *Sustainability* 16, 5954. <https://doi.org/10.3390/su16145954>
- Salazar-Sogamoso, L.M., Gómez-García, M.-Á., Dobrosz-Gómez, I., 2025. Comparative life cycle assessment of sequential chemical and electrochemical processes for the treatment of industrial textile wastewater. *J Solid State Electrochem* 29, 3379–3399. <https://doi.org/10.1007/s10008-024-05976-6>
- Saleem, M.A., Pei, L., Saleem, M.F., Shahid, S., Wang, J., 2020. Sustainable dyeing of nylon with disperse dyes in Decamethylcyclopentasiloxane waterless dyeing system. *Journal of Cleaner Production* 276, 123258. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123258>
- Sandin, G., Peters, G.M., 2018. Environmental impact of textile reuse and recycling – A review. *Journal of Cleaner Production* 184, 353–365. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.266>
- Shirvanimoghaddam, K., Motamed, B., Ramakrishna, S., Naebe, M., 2020. Death by waste: Fashion and textile circular economy case. *Science of The Total Environment* 718, 137317. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137317>
- Solis, M., Huygens, D., Tonini, D., Fruergaard Astrup, T., 2024. Management of textile waste in Europe: An environmental and a socio-economic assessment of current and future scenarios. *Resources, Conservation and Recycling* 207, 107693. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107693>
- Sun, G., Cao, X., Wang, Y., Sun, X., Chen, Q., 2024. Comparative life cycle assessment of two different waste materials for recycled fiber. *Resources, Conservation and Recycling* 205, 107518. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107518>
- Textile Exchange, 2025. Materials Market Report 2025.
- Ussiri, D.A.N., Lal, R., 2017. Carbon Sequestration for Climate Change Mitigation and Adaptation. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-53845-7>
- Xu, C., Yu, H., Zhang, S., Shen, C., Ma, C., Wang, J., Li, F., 2024. Cleaner production evaluation system for textile industry: An empirical study from LCA perspectives. *Science of The Total Environment* 913, 169632. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169632>
- Xu, X., Cui, X., Zhang, Y., Chen, X., Li, W., 2023. Carbon neutrality and green technology innovation efficiency in Chinese textile industry. *Journal of Cleaner Production* 395, 136453. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136453>
- Yalcin-Enis, I., Kucukali-Ozturk, M., Sezgin, H., 2019. Risks and Management of Textile Waste, in: Gothandam, K.M., Ranjan, S., Dasgupta, N., Lichtfouse, E. (Eds.), *Nanoscience and Biotechnology for Environmental Applications, Environmental Chemistry for a Sustainable World*. Springer International Publishing, Cham, pp. 29–53. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97922-9_2

Zhang, R., Ma, X., Shen, X., Zhai, Y., Zhang, T., Ji, C., Hong, J., 2020. PET bottles recycling in China: An LCA coupled with LCC case study of blanket production made of waste PET bottles. *Journal of Environmental Management* 260, 110062. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110062>
Βασιλειάδης, Α.Α., 1993. Σημειώσεις Τεχνολογίας Βαφικής και Φινιρίσματος.

Ιστοσελίδες

Ellen MacArthur Foundation, 2019 <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/fashion-and-the-circular-economy-deep-dive> (Προσπελάστηκε: 30 Αυγούστου 2026)

European Commission, 2022 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022DC0141> (Προσπελάστηκε: 30 Αυγούστου 2026)

European Commission, 2026 https://environment.ec.europa.eu/strategy/textiles-strategy_en?prefLang=el (Προσπελάστηκε: 30 Αυγούστου 2026)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 – Ανάλυση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment)

2.1 Ορισμός και βασικές έννοιες

Η μελέτη του κύκλου ζωής ενός προϊόντος [Life Thinking (LCT)] αποτελεί μια προσέγγιση σύμφωνα με την οποία η βιωσιμότητα ενός προϊόντος ή μιας παραγωγικής διαδικασίας εξετάζεται σε σχέση με τα διαδοχικά στάδια του κύκλου ζωής του και όχι ως απομονωμένο αποτέλεσμα ενός μόνο σταδίου. Στην κλωστοϋφαντουργία, η προσέγγιση αυτή είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις κατανέμονται σε ολόκληρη την αλυσίδα αξίας, από την παραγωγή των ινών και την παραγωγή υφάσματος, έως την κατασκευή ενδυμάτων, την εμπορική τους διάθεση, μέχρι και το τέλος ζωής τους. Η ανάλυση βιωσιμότητας στον κλάδο της κλωστοϋφαντουργίας απαιτεί την εξέταση όλων των επιμέρους σταδίων του κύκλου ζωής, με τις κατάλληλες μεθόδους και εμπεριστατωμένα στοιχεία (Luján-Ornelas et al., 2020).

Η Ανάλυση του Κύκλου Ζωής [Life Cycle Assessment (LCA)] αποτελεί μια καθιερωμένη μέθοδο αξιολόγησης και παρακολούθησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Έχει εφαρμογή σε προϊόντα, διαδικασίες, υπηρεσίες και σε άλλες κατηγορίες (Hammar et al., 2024). Κύριος στόχος της είναι η μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος και των αποβλήτων, για παράδειγμα ενός προϊόντος σε ένα κομμάτι παραγωγής του ή σε όλο τον κύκλο ζωής του από τις πρώτες ύλες μέχρι το τέλος της χρήσης του. Εφαρμόζοντας τη μέθοδο της ανάλυσης του κύκλου ζωής, οι επιχειρήσεις καταφέρνουν να εντοπίσουν τομείς οι οποίοι βρίσκονται σε κρίσιμο στάδιο αναφορικά με το περιβαλλοντικό τους αποτύπωμα και χρειάζονται βελτιώσεις, αλλά και σημεία τα οποία καταγράφουν θετικές επιδόσεις (Edirisinghe et al., 2024). Η LCA χρησιμοποιείται ευρέως στον κλάδο της κλωστοϋφαντουργίας και αποτελεί ένα εξαιρετικό εργαλείο καθώς κύριο πλεονέκτημα της μεθόδου αποτελεί ότι καταφέρνει να ποσοτικοποιεί τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο που έχει μια διεργασία του τομέα. Αποτελεί τυποποιημένο εργαλείο αξιολόγησης περιβαλλοντικών επιπτώσεων, σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040 και ISO 14044 (Rubik et al., 2024). Ειδικά σε περιπτώσεις όπου γίνεται ακαδημαϊκή έρευνα, η LCA παρουσιάζεται ως ένα εξαιρετικό εργαλείο καθώς αποτελεί τη βασική μέθοδο για τη μέτρηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για προϊόντα, διαδικασίες και υπηρεσίες (Abagnato et al., 2024).

Η LCA Αποτελεί ένα πολύ χρήσιμο εργαλείο σε περιπτώσεις όταν η ανάγκη επιτάσσει αλλαγή σε ήδη υπάρχουσα παραγωγική διαδικασία. Μέσω καταγραφής και ανάλυσης δεδομένων που σχετίζονται με την παραγωγή και την κατανάλωση πρώτων υλών και ενέργειας, επικουρεί στην εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των προϊόντων καθ' όλη τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους (Sun et al., 2024). Επιτρέπει τη

σύγκριση διεργασιών ή προϊόντων με παρόμοια λειτουργικά χαρακτηριστικά, διευκολύνοντας τον εντοπισμό περισσότερο βιώσιμων περιβαλλοντικά επιλογών στο σχεδιασμό διεργασιών (Islam et al., 2024b).

Η έννοια της ανάλυσης του κύκλου ζωής, προτάθηκε για πρώτη φορά στα πλαίσια ενός διεθνούς σεμιναρίου το οποίο διοργανώθηκε από την Εταιρεία Περιβαλλοντικής Τοξικολογίας και Χημείας [Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC)]. Με το πέρασμα των ετών και με χρόνια έρευνας, η LCA σταδιακά εξελίχθηκε μέχρι το 2006 όπου εκδόθηκαν τα πρότυπα ISO 14040:2006 και ISO 14044:2006 (Sun et al., 2024). Συγκριτικό πλεονέκτημα της LCA έναντι άλλων μεθόδων αποτελεί το γεγονός ότι είναι δυνατόν να γίνει αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε πληθώρα περιβαλλοντικών τομέων με τον υπολογισμό των επιπτώσεων σε διάφορες κατηγορίες. Συνεπώς, λαμβάνοντας υπόψη διαφορετικές επιπτώσεις είναι εφικτό να αξιολογηθεί αν η μείωση σε μια συγκεκριμένη κατηγορία οδηγεί σε αύξηση σε κάποια άλλη κατηγορία, ή γενικά να μελετηθεί το πώς επηρεάζουν οι αυξομειώσεις μιας κατηγορίας τις υπόλοιπες (Sun et al., 2024).



Σχήμα 7: Η μέθοδος Ανάλυσης Κύκλου Ζωής (LCA) (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Η μεθοδολογία της LCA χωρίζεται σε 4 στάδια: τον καθορισμό του στόχου και του πεδίου εφαρμογής, την καταγραφή δεδομένων για τον κύκλο ζωής (LCI), την αξιολόγηση των επιπτώσεων του κύκλου ζωής (LCIA) και τέλος την ερμηνεία των αποτελεσμάτων.

Οι κατηγορίες περιβαλλοντικών παραγόντων που μελετά η LCA αφορούν το ανθρακικό αποτύπωμα από τις εκπομπές των αερίων του θερμοκηπίου, το υδατικό αποτύπωμα το οποίο αφορά την ποσότητα του νερού που καταναλώνεται, τον ευτροφισμό, την οξίνιση και την τοξικότητα για τον άνθρωπο (Fonseca et al., 2023).

Μια σειρά από λογισμικά και βάσεις δεδομένων έχουν αναπτυχθεί για χρήση για LCA με τα πιο ευρέως διαδεδομένα να είναι τα OpenLCA, SimaPro, GaBi, CCaLC, EASETECH και η βάση δεδομένων Ecoinvent.(Fidan et al., 2024). Το OpenLCA αποτελεί ένα ευέλικτο δωρεάν λογισμικό το οποίο μπορεί να παραμετροποιηθεί και χρησιμοποιείται ευρέως από φοιτητές για ακαδημαϊκή έρευνα. Για την πλήρη αξιοποίησή του απαιτούνται τεχνικές γνώσεις και δεν αποτελεί το πιο εύκολο για χρήση εργαλείο. Το SimaPro είναι ένα λογισμικό το οποίο είναι ευρέως διαδεδομένο σε ακαδημαϊκή έρευνα, έχει μεγάλη υποστήριξη από βάσεις δεδομένων αλλά στον αντίποδα έχει υψηλό κόστος άδειας για να το αποκτήσεις και χρειάζεται αρκετός χρόνος εκμάθησης καθώς είναι πολύπλοκο για άτομα τα οποία δεν είναι απολύτως εξοικειωμένα με εργαλεία για LCA. Το GaBi αποτελεί ένα λογισμικό το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως για βιομηχανικές εφαρμογές καθώς παρέχει οπτικοποίηση μοντέλων και έχει ενσωματωμένες βάσεις δεδομένων υψηλής ποιότητας. Μεγάλο μειονέκτημα του είναι το κόστος του και ότι δεν είναι εύκολο στη διαχείριση για ακαδημαϊκή χρήση. Το CCaLC Είναι ιδανικό εργαλείο για την ποσοτικοποίηση του αποτυπώματος του άνθρακα και είναι εύκολο στη χρήση έχει περιορισμένες δυνατότητες καθώς δεν κάνει ολοκληρωμένη LCA, και δεν είναι κατάλληλο για πολύπλοκα συστήματα βιομηχανίας. Τέλος, το EASETECH είναι αρκετά εξειδικευμένο για διαχείριση αποβλήτων και για ανακύκλωση, αλλά έχει περιορισμένη εφαρμογή και δεν προτείνεται για παραγωγικές διαδικασίες.

2.2 Πρότυπα ISO 14040 και 14044

Τα πρότυπα ISO 14040 (ISO 14040:2006 Environmental management – Life cycle assessment – principles and framework) και ISO 14044 (ISO 14044:2006 Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines) αποτελούν τον θεμελιώδη κορμό της μεθοδολογίας της LCA, καθώς σε αυτά περιγράφονται αναλυτικά τα στάδια που πρέπει να ακολουθηθούν. Τα πρότυπα αυτά εντάσσονται στη σειρά ISO 14000 για την περιβαλλοντική διαχείριση και συνδράμουν στην εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιδόσεων.

Το πρότυπο ISO 14040 ορίζει τις αρχές και τη δομή της LCA, παρέχοντας το θεωρητικό υπόβαθρο για την εκπόνηση των μελετών. Στο πλαίσιο αυτό, καθορίζονται οι βασικές έννοιες, οι ορισμοί και τα στάδια της μεθοδολογίας, διασφαλίζοντας τη συνεκτικότητα και τη διαφάνεια των αποτελεσμάτων. Πιο συγκεκριμένα, περιγράφονται

τα στάδια καθορισμού του στόχου και του πεδίου εφαρμογής, της συλλογής στοιχείων (Life Cycle Inventory – LCI), το στάδιο της εκτίμησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Life Cycle Impact Assessment – LCIA), της ερμηνείας των αποτελεσμάτων, της σύνταξης αναφορών και της ανασκόπησης της LCA, των περιορισμών της μεθόδου, και τέλος της σχέσης μεταξύ των φάσεων. Σύμφωνα με το πρότυπο, η Ανάλυση Κύκλου Ζωής αποτελεί μια συστηματική προσέγγιση που εξετάζει τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις ενός προϊόντος από την εξόρυξη των πρώτων υλών έως την τελική του διάθεση. Το ISO 14040 δεν εισέρχεται σε λεπτομέρειες εφαρμογής, αλλά θέτει το γενικό πλαίσιο μέσα στο οποίο πρέπει να αναπτύσσονται οι επιμέρους αναλύσεις, εξασφαλίζοντας την αξιοπιστία των μελετών (“ISO 14040:2006 Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework,” n.d.). Το πρότυπο ISO 14044 συμπληρώνει το ISO 14040, εξειδικεύοντας τις απαιτήσεις και τις κατευθυντήριες οδηγίες για την εφαρμογή της LCA. Περιγράφει λεπτομερώς τις διαδικασίες συλλογής και επεξεργασίας δεδομένων, καθώς και τις μεθόδους αξιολόγησης των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Επιπλέον, το πρότυπο καθορίζει τις προϋποθέσεις για τη διασφάλιση της ποιότητας των δεδομένων, την τεκμηρίωση των παραδοχών και τη διαφάνεια των αποτελεσμάτων. Τέλος, διασφαλίζει ότι τα συμπεράσματα είναι συνεπή με τον στόχο και το πεδίο της μελέτης (“ISO 14044:2006 Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines,” n.d.). Όλα τα πρότυπα τα οποία αναπτύσσονται και θα αναπτύσσονται στο μέλλον σχετικά με την LCA, ακολουθούν ως βασικό υπόβαθρο το ISO 14040.

2.3 Στάδια και είδη της LCA

Τα στάδια της μεθόδου Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, σύμφωνα με τα πρότυπα ISO είναι τέσσερα και αποτελούν μια διαδοχική αλλά και αλληλοσυνδεόμενη διαδικασία:

- Καθορισμός στόχου και πεδίου (Goal and Scope Definition)
- Καταγραφή στοιχείων του κύκλου ζωής (Life Cycle Inventory-LCI)
- Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Life Cycle Impact Assessment-LCIA)
- Ερμηνεία των αποτελεσμάτων (Interpretation)

Στο πρώτο στάδιο καθορίζεται ο στόχος της μελέτης, η λειτουργική μονάδα, τα όρια του συστήματος καθώς και άλλες παραδοχές και περιορισμοί που μπορεί να υπάρχουν. Στο συγκεκριμένο στάδιο είναι πολύ σημαντικό να αναφερθεί αναλυτικά και ξεκάθαρα ο λόγος για τον οποίο λαμβάνει χώρα η μελέτη. Στο στάδιο της καταγραφής των στοιχείων, το οποίο αποτελεί το πιο σημαντικό στάδιο, γίνεται συλλογή και ποσοτικοποίηση δεδομένων για τις εισροές (για παράδειγμα ενέργεια, νερό, πρώτες ύλες ακόμα, χημικά) και τις εκροές (όπως εκπομπές αερίων, απόβλητα, λύματα). Στο τρίτο στάδιο τα στοιχεία που

έχουν συλλεχθεί μετατρέπονται σε περιβαλλοντικές επιπτώσεις (όπως εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, ευτροφισμός, οξίνιση και τοξικότητα). Αυτό γίνεται με τον πολλαπλασιασμό τους με τους αντίστοιχους συντελεστές μετατροπής ώστε να προκύψουν οι επιθυμητές μονάδες (Islam et al., 2024b). Υπάρχουν συγκεκριμένα λογισμικά και εργαλεία τα οποία διευκολύνουν τις παραπάνω διαδικασίες (όπως το ReCiPe και το CML-IA Baseline) τα οποία συλλέγουν τα δεδομένα και τα μετατρέπουν σε κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Fidan et al., 2024). Τέλος, Στο τελευταίο στάδιο αναλύονται τα αποτελέσματα, εντοπίζονται τα σημεία που χρήζουν διόρθωσης, και εξάγονται συμπεράσματα και προτάσεις βελτίωσης για το μέλλον (Islam et al., 2024b). Ανάλογα με το πεδίο εφαρμογής της μελέτης, είναι πιθανό να υπάρξουν τροποποιήσεις στην LCA, αναφορικά με τον αριθμό των κατηγοριών των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που μελετώνται, καθώς επίσης και τις αξιολογήσεις των επιπτώσεων του κύκλου ζωής (Rubik et al., 2024).

Η καταγραφή των δεδομένων για την ανάλυση του κύκλου ζωής αποτελεί το πιο απαιτητικό στάδιο της μεθοδολογίας, καθώς πρέπει με περισσή ακρίβεια και λεπτομέρεια να καταγραφούν τα δεδομένα για τη δημιουργία του μοντέλου που θα μελετηθεί. Δυστυχώς παρατηρείται στη βιβλιογραφία ότι υπάρχει σημαντική έλλειψη ορθής καταγραφής των δεδομένων γεγονός που καθιστά δύσκολη την έρευνα καθώς η LCA είναι μια ποσοτική μεθοδολογία και βασίζεται σε δεδομένα (Ferrari et al., 2021). Τα δεδομένα που θα συλλεχθούν μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες, με βάση την προέλευσή τους: σε πρωτογενείς πηγές όπου τα δεδομένα συλλέγονται απευθείας από τις βιομηχανίες, και σε δευτερογενείς πηγές όπου τα απαιτούμενα στοιχεία αντλούνται από βάσεις δεδομένων και από τη βιβλιογραφία. Σε περιπτώσεις όπου δεν υπάρχουν πρωτογενή δεδομένα για την διεξαγωγή LCA, υπάρχει η δυνατότητα η μελέτη να διεξαχθεί μόνο με στοιχεία τα οποία έχουν προέλθει από βάσεις δεδομένων, καθώς αποτελούν επιστημονικά τεκμηριωμένα δεδομένα και παρέχουν πληροφορίες σχετικά με το άμεσο περιβαλλοντικό αντίκτυπο για μεγάλο αριθμό υλικών και διαδικασιών (Edirisinghe et al., 2024).

Εκτός από τη βασική μέθοδο LCA, έχουν αναπτυχθεί και κάποιες άλλες μέθοδοι οι οποίες συνεπικουρούν σε μια ολοκληρωμένη εκτίμηση ενός συστήματος συμπληρώνοντας την περιβαλλοντική αξιολόγηση που προκύπτει από την LCA. Μία από αυτές τις μεθόδους είναι η ανάλυση κόστους του κύκλου ζωής [Life Cycle Cost assessment (LCC)], καθώς για να είναι βιώσιμες οι διαδικασίες πρέπει και το κόστος να παραμένει σε επίπεδα τα οποία η επιχείρηση μπορεί να ανταποκριθεί. Σύμφωνα με τη βιβλιογραφία η LCC χρησιμοποιείται συχνά από τις επιχειρήσεις καθώς είναι ένα χρήσιμο

εργαλείο για να προσδιορίζουν το συνολικό κόστος ενός προϊόντος λαμβάνοντας υπόψη όλες τις δαπάνες οι οποίες σχετίζονται με την παραγωγή (Fidan et al., 2024).

Ακόμη μια μέθοδος που εφαρμόζεται είναι η Κοινωνική Ανάλυση Κύκλου Ζωής [Social Life Cycle Assessment (S-LCA)], η οποία εξετάζει τις κοινωνικές επιπτώσεις των προϊόντων και των υπηρεσιών κατά τη διάρκεια του κύκλου ζωής τους, και έχει εφαρμογή σε πλήθος συστημάτων. Ακολουθεί την ίδια πρακτική εφαρμογής με τη βασική LCA, και έχει δημιουργηθεί επίσης σύμφωνα με τα ίδια πρότυπα ISO. Ο κύριος στόχος της εμφανίζεται να είναι η αξιολόγηση της επιρροής και των επιπτώσεων ενός προϊόντος ή μιας υπηρεσίας για την ευημερία της κοινωνίας. Παρόλο που η S-LCA έχει αρχίσει και εφαρμόζεται, υπάρχει ακόμη αρκετός χώρος για την εξέλιξη της. Έχει αποδειχθεί ως ένα τρομερά χρήσιμο εργαλείο για την αξιολόγηση των κοινωνικών επιπτώσεων οι οποίες σχετίζονται με τον κλάδο της κλωστοϋφαντουργίας, έχοντας εφαρμογή σε όλο τον κύκλο ζωής του προϊόντος, από τις διαδικασίες για την απόκτηση των πρώτων υλών μέχρι την απόρριψη του τελικού προϊόντος (Fidan et al., 2025).

Αξίζει να αναφερθεί ότι έχουν δημιουργηθεί πρότυπα και πιστοποιήσεις οι οποίες συνδράμουν στην αξιολόγηση των διαδικασιών που αφορούν κοινωνικά θέματα και εστιάζουν σε ηθικές πρακτικές και αποτελούν ένα βασικό εργαλείο για την εφαρμογή της S-LCA. Κατηγορίες τις οποίες ως επί το πλείστον μελετούν τα συγκεκριμένα πρότυπα αφορούν τα εργασιακά δικαιώματα των εργαζομένων, την ισότητα των φύλων, την ασφάλεια και την υγιεινή στο χώρο εργασίας, και άλλα παρεμφερή ανθρωποκεντρικά κριτήρια. Η εφαρμογή τέτοιων προτύπων βοηθάει στην παρακολούθηση και τη βελτίωση των διαδικασιών που αφορούν τα παραπάνω θέματα. . Μερικά από τα πιο σημαντικά πρότυπα είναι:

Κώδικας ETI: αποτελεί ένα σύνολο αρχών μέσα από τις οποίες καθορίζονται τα ελάχιστα κοινωνικά και εργασιακά κριτήρια στις αλυσίδες εφοδιασμού προωθώντας δίκαιες και ηθικές εργασιακές πρακτικές. Βασικές του αρχές είναι η απαγόρευση καταναγκαστικής εργασίας, οι ασφαλείς και υγιεινές συνθήκες εργασίας, οι δίκαιες αμοιβές, ωράριο εργασίας σύμφωνα με τη νομοθεσία, η απαγόρευση της παιδικής εργασίας, η απουσία φυλετικών και οποιοδήποτε άλλων διακρίσεων, και η ελευθερία συνδικαλισμού.

ISO 26000:2010 : το συγκεκριμένο πρότυπο παρέχει κατευθυντήριες γραμμές για την εφαρμογή κοινωνικής ευθύνης στους οργανισμούς. Συναντάται παγκοσμίως σε επιχειρήσεις ανεξάρτητα του τομέα και του μεγέθους. Παρέχει σαφείς κατευθύνσεις σχετικά με τις έννοιες, τις αξίες και τις πρακτικές της κοινωνικής ευθύνης, τις οποίες οι οργανισμοί μπορούν να υιοθετήσουν ώστε να συμβάλουν στην επίτευξη της βιώσιμης ανάπτυξης.

SA 8000: Αποτελεί διεθνώς αναγνωρισμένο πρότυπο κοινωνικής υπευθυνότητας, το οποίο θέτει απαιτήσεις για τη διασφάλιση δίκαιων και ασφαλών συνθηκών εργασίας. Ο διεθνής μη κερδοσκοπικός οργανισμός Διεθνής Οργανισμός Κοινωνικής Υπευθυνότητας [SAI (Social Accountability International)] στα τέλη της δεκαετίας του 1990 καθιέρωσε το SA 8000 ως βασικό πλαίσιο για την ανεξάρτητη αξιολόγηση μιας επιχείρησης ως προς τη δέσμευσή της προς την κοινωνική υπευθυνότητα.

SMETA: Το Πρωτόκολλο Ελέγχου Ηθικού Εμπορίου Μελών Sedex [SMETA (Sedex Members Ethical Trade Audit)], χρησιμοποιείται ευρέως ως κοινωνικό πρότυπο σε παγκόσμιο επίπεδο. Παρέχει τη δυνατότητα σε επιχειρήσεις να αξιολογούν τις εγκαταστάσεις και τους προμηθευτές τους, προκειμένου να αξιολογούν τις συνθήκες εργασίας, τις πρακτικές υγιεινής και ασφάλειας, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τα ηθικά πρότυπα κατά μήκος όλης της αλυσίδας εφοδιασμού της εκάστοτε εταιρείας.

BSCI: Η Πρωτοβουλία Κοινωνικής Συμμόρφωσης Επιχειρήσεων [Business Social Compliance Initiative (BSCI)], χρησιμοποιείται για την παρακολούθηση και αξιολόγηση της αλυσίδας εφοδιασμού ως προς τους κανόνες για ορθή κοινωνική συμμόρφωση. Ένα εύρος ζητημάτων που σχετίζονται με το περιβάλλον και την ασφάλεια των εργαζομένων όπως όσα έχουν προαναφερθεί, καλύπτονται από το BSCI, συμπεριλαμβανομένης της τήρησης της εργασιακής νομοθεσίας του εκάστοτε κράτους.

GRI: Η Παγκόσμια Πρωτοβουλία Αναφοράς [Global Reporting Initiative (GRI)], αποτελεί ένα διεθνή, ανεξάρτητο οργανισμό ο οποίος δημιουργήθηκε με σκοπό να βοηθήσει επιχειρήσεις να αξιολογήσουν τον αντίκτυπό τους σε ζητήματα όπως η κλιματική αλλαγή, τα ανθρώπινα δικαιώματα και η διαφθορά μέσα στα εργασιακά περιβάλλοντα (Fidan et al., 2025).

2.4 Πλεονεκτήματα και περιορισμοί της LCA

Η Ανάλυση του Κύκλου Ζωής ενός προϊόντος αποτελεί χρήσιμο εργαλείο για εξαγωγή συμπεράσματος στη βιομηχανία. Η πολυπλοκότητα των στοιχείων που συλλέγονται απαιτεί γνώση από εξειδικευμένο προσωπικό για τη διεκπεραίωσή της LCA, συνεργασία με τη διοίκηση και προσωπικό στο χώρο της βιομηχανίας που θα είναι καταρτισμένο σωστά ώστε να παρέχει τα ακριβή στοιχεία. Συνεπώς η LCA μπορεί να αποτελεί μια εξαιρετική μέθοδο για τον υπολογισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων, αλλά οι απαιτήσεις της σε κόστος και χρόνο περιορίζουν την καθολική υιοθέτηση της (Edirisinghe et al., 2024). Ειδικά για μικρές επιχειρήσεις η εφαρμογή LCA καθίσταται δύσκολη δεδομένου της πολυπλοκότητας της εφαρμογής της (Fidan et al., 2025).

Για την καλύτερη ανάλυση των αποτελεσμάτων της LCA, γίνεται χρήση λογισμικών τα οποία έχουν αναπτυχθεί για αυτό το σκοπό, καθώς η πολυπλοκότητα των

αποτελεσμάτων απαιτεί για τη διαχείρισή τους κόστος και χρόνο (Edirisinghe et al., 2024). Ένα από τα βασικά πλεονεκτήματα της μελέτης Ανάλυσης Κύκλου Ζωής αποτελεί η ικανότητά της να εντοπίζει και να ποσοτικοποιεί τις επιπτώσεις διάφορων διεργασιών. Επίσης είναι σημαντική η ικανότητά της να αξιολογεί τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των κατεργασιών. Επιπροσθέτως, συμβάλλει στη μελέτη των παραγόντων της ρύπανσης και στη δημιουργία προϊόντων χωρίς απόβλητα (Periyasamy, 2024). Η μέθοδος αυτή επιτρέπει μια ολοκληρωτική αξιολόγηση του κύκλου ζωής των προϊόντων από την εξόρυξη των πρώτων υλών μέχρι την διάθεση και το τέλος ζωής του προϊόντος (Fonseca et al., 2023). Η ποιότητα των δεδομένων αποτελεί σοβαρό θέμα στις μελέτες LCA και συνεπώς χρειάζεται ιδιαίτερη προσοχή στη χρήση βασικών μεταβλητών όπως η χρήση των πρώτων υλών όταν υπάρχει διαδικασία ανακύκλωσης είτε επαναχρησιμοποίησης προϊόντος (Abagnato et al., 2024). Ένα από τα μειονεκτήματα της είναι ότι μπορεί να υπάρξουν αβεβαιότητες. Συνήθως αυτές θα σχετίζονται με τα δεδομένα που θα έχουν συλλεχθεί, τις παραδοχές που θα πρέπει να γίνουν σύμφωνα με τις υπάρχουσες συνθήκες, τη δομή που θα έχει το μοντέλο, και τέλος τους συντελεστές αξιολόγησης των επιπτώσεων (Solis et al., 2024). Στη βιβλιογραφία εμφανίζονται μελέτες στις οποίες μετά την LCA έχει πραγματοποιηθεί ανάλυση ευαισθησίας των δεδομένων ώστε να ελεγχθεί η αξιοπιστία των αποτελεσμάτων (Fidan et al., 2024).

2.5 Εφαρμογές της LCA στη βιομηχανία

Η Ανάλυση Κύκλου Ζωής Αποτελεί ένα ευρέως εφαρμοζόμενο εργαλείο στη βιομηχανία, καλύπτοντας ένα αξιολογικό φάσμα τομέων. Μέσω της ολιστικής προσέγγισης που υιοθετεί, επιτρέπει τον εντοπισμό κρίσιμων σημείων περιβαλλοντικών επιπτώσεων, τη σύγκριση εναλλακτικών λύσεων και τη λήψη τεκμηριωμένων αποφάσεων για τη βελτίωση της περιβαλλοντικής απόδοσης προϊόντων και διεργασιών. Στον τομέα των δομικών υλικών χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των υλικών όπως σκυρόδεμα, χάλυβας και ξύλο (Barbhuiya and Das, 2023). Στη βιομηχανία τροφίμων χρησιμοποιείται για τη μελέτη των γεωργικών διαδικασιών που προηγούνται για την απόκτηση των πρώτων υλών, αλλά και στη βελτίωση της παραγωγής και της συσκευασίας των προϊόντων (Andersson et al., 1998). Στη βιομηχανία των πλαστικών χρησιμοποιείται για τη σύγκριση διαφορετικών υλικών και διαδικασιών παραγωγής ώστε να εντοπιστούν οι κύριες πηγές περιβαλλοντικής επιβάρυνσης και να εξεταστούν εναλλακτικές λύσεις σχεδιασμού. Στη βιομηχανία της κλωστοϋφαντουργίας χρησιμοποιείται για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των υλικών που θα χρησιμοποιηθούν, για την ανάλυση των επιπτώσεων διεργασιών όπως της βαφής και τον σχεδιασμό βιώσιμων προϊόντων (Liscio and Sospiro, n.d.). Επιπροσθέτως, παρέχει κατευθύνσεις για τη διαχείριση αποβλήτων και

την απόρριψη επικίνδυνων χημικών ουσιών (Periyasamy, 2024). Το κλειδί για την ενσωμάτωση της βιωσιμότητας στις δραστηριότητες των επιχειρήσεων αποτελεί η έμφαση στη μείωση των αποβλήτων και η αποδοτική χρήση των πόρων (Edirisinghe et al., 2024).

Η χρήση της LCA σε αναπτυσσόμενες χώρες ενέχει δυσκολίες καθώς ο συντονισμός μεγάλου αριθμού προμηθευτών συναντά εμπόδια καθώς δεν υπάρχουν οι απαιτούμενοι οικονομικοί πόροι για εφαρμογή προληπτικών δράσεων (Edirisinghe et al., 2024). Παρά όμως τις όποιες δυσκολίες στην εφαρμογή θα κληθούν να αντιμετωπίσουν, η πίεση που δέχονται από τις απαιτήσεις της αγοράς για «πράσινα» κυρίως προϊόντα τις ωθεί να μελετήσουν τακτικές οι οποίες θα βελτιώσουν τη βιωσιμότητα της εφοδιαστικής αλυσίδας (Osei et al., 2023).

Στη βιβλιογραφία υπάρχει μεγάλος αριθμός ερευνών για τις επιπτώσεις του κλάδου της κλωστοϋφαντουργίας στο περιβάλλον αλλά και στην οικονομία, ενώ οι αυτές στους κοινωνικούς παράγοντες δεν συμβαίνει το ίδιο. Εντοπίζεται σημαντικό κενό στις μελέτες που αφορούν την αξιολόγηση των κοινωνικών επιπτώσεων και το πώς μπορεί αυτές να αξιολογηθούν από μια μελέτη βιωσιμότητας. Τα τελευταία χρόνια, εταιρείες κολοσσοί στον κλάδο όπως η Nike και η H&M, έχουν κάνει κάποια βήματα προόδου σε αυτόν τον τομέα ενσωματώνοντας πολιτικές κοινωνικής ευθύνης στις διαδικασίες τους, δείχνοντας το δρόμο και την ανάγκη για περαιτέρω έρευνα (Fidan et al., 2025). Παρά το γεγονός ότι η υπάρχουσα βιβλιογραφία που σχετίζεται με την επεξεργασία των κλωστοϋφαντουργικών αποβλήτων είναι μεγάλη, μόνο ένας μικρός αριθμός επιστημονικών πηγών παρέχει λεπτομερή δεδομένα ώστε να αναπτυχθεί ένα μοντέλο μελέτης (Solis et al., 2024). Μια μελέτη Ανάλυσης Κύκλου Ζωής στην κλωστοϋφαντουργία γίνεται συνήθως για να μελετηθεί το υδάτινο αποτύπωμα το οποίο καθορίζεται σε μεγάλο βαθμό από την καλλιέργεια του βαμβακιού, και πιο συχνά για το ανθρακικό αποτύπωμα που προκαλείται από την παραγωγή των κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων (Rubik et al., 2024).

Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- Abagnato, S., Rigamonti, L., Grosso, M., 2024. Life cycle assessment applications to reuse, recycling and circular practices for textiles: A review. *Waste Manag.* 182, 74–90. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.04.016>
- Adviento-Borbe, M.A.A., Barnes, B.D., Iseyemi, O., Mann, A.M., Reba, M.L., Robertson, W.J., Massey, J.H., Teague, T.G., 2018. Water quality of surface runoff and lint yield in cotton under furrow irrigation in Northeast Arkansas. *Sci. Total Environ.* 613–614, 81–87. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.020>

- Aizenshtein, E.M., 2016. Bottle Wastes – to Textile Yarns. *Fibre Chem.* 47, 343–347.
<https://doi.org/10.1007/s10692-016-9691-8>
- Andersson, K., Ohlsson, T., Olsson, P., 1998. Screening life cycle assessment (LCA) of tomato ketchup: a case study. *J. Clean. Prod.* 6, 277–288.
[https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(98\)00027-4](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(98)00027-4)
- Ansari, A.A., Singh Gill, S., Lanza, G.R., Rast, W. (Eds.), 2011. *Eutrophication: causes, consequences and control*. Springer Netherlands, Dordrecht.
<https://doi.org/10.1007/978-90-481-9625-8>
- Arivithamani, N., Giri Dev, V.R., 2017. Sustainable bulk scale cationization of cotton hosiery fabrics for salt-free reactive dyeing process. *J. Clean. Prod.* 149, 1188–1199. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.162>
- Barbhuiya, S., Das, B.B., 2023. Life Cycle Assessment of construction materials: Methodologies, applications and future directions for sustainable decision-making. *Case Stud. Constr. Mater.* 19, e02326.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02326>
- Baydar, G., Ciliz, N., Mammadov, A., 2015. Life cycle assessment of cotton textile products in Turkey. *Resour. Conserv. Recycl.* 104, 213–223.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.007>
- Becker, H.A., 2001. Social impact assessment. *Eur. J. Oper. Res.* 128, 311–321.
[https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00074-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00074-6)
- Bianco, I., Gerboni, R., Picerno, G., Blengini, G.A., 2022. Life Cycle Assessment (LCA) of MWool® Recycled Wool Fibers. *Resources* 11, 41.
<https://doi.org/10.3390/resources11050041>
- Chen, Y.-G., He, X.-L.-S., Huang, J.-H., Luo, R., Ge, H.-Z., Wołowicz, A., Wawrzekiewicz, M., Gładysz-Płaska, A., Li, B., Yu, Q.-X., Kołodyńska, D., Lv, G.-Y., Chen, S.-H., 2021. Impacts of heavy metals and medicinal crops on ecological systems, environmental pollution, cultivation, and production processes in China. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 219, 112336.
<https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112336>
- Chequer, F.M.D., Angeli, J.P.F., Ferraz, E.R.A., Tsuboy, M.S., Marcarini, J.C., Mantovani, M.S., De Oliveira, D.P., 2009. The azo dyes Disperse Red 1 and Disperse Orange 1 increase the micronuclei frequencies in human lymphocytes and in HepG2 cells. *Mutat. Res. Toxicol. Environ. Mutagen.* 676, 83–86.
<https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2009.04.004>
- Cinperi, N.C., Ozturk, E., Yigit, N.O., Kitis, M., 2019. Treatment of woolen textile wastewater using membrane bioreactor, nanofiltration and reverse osmosis for reuse in production processes. *J. Clean. Prod.* 223, 837–848.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.166>
- Clark, M. (Ed.), 2011. *Handbook of textile and industrial dyeing*, Woodhead Publishing Series in Textiles. Woodhead Publishing Limited, Oxford ; Philadelphia.
- Cundubey, F.S., Azgin, S.T., 2024. Comparative life cycle assessment of denim manufacturing: Evaluating conventional vs. recycled cotton in the context of renewable energy. *J. Clean. Prod.* 434, 140117.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140117>
- Department of Textiles and Apparel Designing, College of Community Science, AAU Jorhat, Konwar, M., 2020. Textile Industry and Its Environmental Impacts: A Review. *Indian J. Pure Appl. Biosci.* 8, 134–139. <https://doi.org/10.18782/2582-2845.7848>
- Edirisinghe, L.G.L.M., De Alwis, A.A.P., Wijayasundara, M., 2024. Sustainable circular practices in the textile product life cycle: A comprehensive approach to environmental impact mitigation. *Environ. Chall.* 16, 100985.
<https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100985>

- Ellen MacArthur Foundation, 2017. A new textiles economy: redesigning fashion's future. European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability., 2010. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook :general guide for life cycle assessment : detailed guidance. Publications Office, LU. <https://doi.org/10.2788/38479>
- Ferrari, A.M., Volpi, L., Settembre-Blundo, D., García-Muiña, F.E., 2021. Dynamic life cycle assessment (LCA) integrating life cycle inventory (LCI) and Enterprise resource planning (ERP) in an industry 4.0 environment. *J. Clean. Prod.* 286, 125314. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125314>
- Fidan, F.Ş., Aydoğan, E.K., Uzal, N., 2025. Comprehensive analysis of social subcategories throughout life cycle assessment approach for the textile industry. *Int. J. Life Cycle Assess.* 30, 1464–1479. <https://doi.org/10.1007/s11367-024-02340-8>
- Fidan, F.Ş., Aydoğan, E.K., Uzal, N., 2024. Sustainability assessment of denim fabric made of PET fiber and recycled fiber from postconsumer PET bottles using LCA and LCC approach with the EDAS method. *Integr. Environ. Assess. Manag.* 20, 2347–2365. <https://doi.org/10.1002/ieam.4979>
- Fonseca, A., Ramalho, E., Gouveia, A., Henriques, R., Figueiredo, F., Nunes, J., 2023. Systematic Insights into a Textile Industry: Reviewing Life Cycle Assessment and Eco-Design. *Sustainability* 15, 15267. <https://doi.org/10.3390/su152115267>
- Gong, J., Wang, F., Ren, Y., Li, Z., Zhang, J., Li, Q., 2018. Preparation of biomass pigments and dyeing based on bioconversion. *J. Clean. Prod.* 182, 301–312. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.219>
- Hammar, T., Peñaloza, D., Hanning, A.-C., 2024. Life cycle assessment of a circular textile value chain: the case of a garment made from chemically recycled cotton. *Int. J. Life Cycle Assess.* 29, 1880–1898. <https://doi.org/10.1007/s11367-024-02346-2>
- Hassan, M.M., Carr, C.M., 2018. A critical review on recent advancements of the removal of reactive dyes from dyehouse effluent by ion-exchange adsorbents. *Chemosphere* 209, 201–219. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.043>
- Islam, S., Bhat, G., Mani, S., 2024a. Life cycle assessment of thermal insulation materials produced from waste textiles. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 26, 1071–1085. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01882-7>
- Islam, S., Hasan, A.K.M.M., Bhuiyan, M.A.R., Bhat, G., 2024b. Evaluation of environmental impacts of cotton polo shirt production in Bangladesh using life cycle assessment. *Sci. Total Environ.* 926, 172097. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172097>
- ISO 14040:2006 Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework., n.d.
- ISO 14044:2006 Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and guidelines., n.d.
- Jadhav, J.P., Kalyani, D.C., Telke, A.A., Phugare, S.S., Govindwar, S.P., 2010. Evaluation of the efficacy of a bacterial consortium for the removal of color, reduction of heavy metals, and toxicity from textile dye effluent. *Bioresour. Technol.* 101, 165–173. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.027>
- Kishor, R., Purchase, D., Saratale, G.D., Saratale, R.G., Ferreira, L.F.R., Bilal, M., Chandra, R., Bharagava, R.N., 2021. Ecotoxicological and health concerns of persistent coloring pollutants of textile industry wastewater and treatment approaches for environmental safety. *J. Environ. Chem. Eng.* 9, 105012. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.105012>
- Liscio, M.C., Sospiro, P., n.d. Life Cycle Assessment on fashion industry: four case studies. Presented at the CEST2023, Athens, Greece. <https://doi.org/10.30955/gnc2023.00283>

- Liu, Y., Zhu, L., Zhang, C., Ren, F., Huang, H., Liu, Z., 2020. Life cycle assessment of melange yarns from the manufacturer perspective. *Int. J. Life Cycle Assess.* 25, 588–599. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01705-8>
- Luján-Ornelas, C., Güereca, L.P., Franco-García, M.-L., Heldeweg, M., 2020. A Life Cycle Thinking Approach to Analyse Sustainability in the Textile Industry: A Literature Review. *Sustainability* 12, 10193. <https://doi.org/10.3390/su122310193>
- Mao, J., Chen, H., Xu, X., Zhu, L., 2024. Assessing greenhouse gas emissions from the printing and dyeing wastewater treatment and reuse system: Potential pathways towards carbon neutrality. *Sci. Total Environ.* 927, 172301. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172301>
- Moazzem, S., Crossin, E., Daver, F., Wang, L., 2021. Life Cycle Assessment of Apparel Consumption in Australia. *Environ. Clim. Technol.* 25, 71–111. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2021-0006>
- Monteiro, R.C.P., Ivar Do Sul, J.A., Costa, M.F., 2018. Plastic pollution in islands of the Atlantic Ocean. *Environ. Pollut.* 238, 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.096>
- Nakhate, P.H., Moradiya, K.K., Patil, H.G., Marathe, K.V., Yadav, G.D., 2020. Case study on sustainability of textile wastewater treatment plant based on lifecycle assessment approach. *J. Clean. Prod.* 245, 118929. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118929>
- Nayak, L., Mishra, S.P., 2016. Prospect of bamboo as a renewable textile fiber, historical overview, labeling, controversies and regulation. *Fash. Text.* 3, 2. <https://doi.org/10.1186/s40691-015-0054-5>
- Osei, M.B., Papadopoulos, T., Acquaye, A., Stamati, T., 2023. Improving sustainable supply chain performance through organisational culture: A competing values framework approach. *J. Purch. Supply Manag.* 29, 100821. <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2023.100821>
- Panda, S.K.B.C., Sen, K., Mukhopadhyay, S., 2021. Sustainable pretreatments in textile wet processing. *J. Clean. Prod.* 329, 129725. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129725>
- Peng, L., Chen, Y., Wan, Z., Zhu, Y., Guo, F., Zhu, D., Yi, C., 2023. Chemical recycling of waste cellulose denim fabric and re-dyeing process. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3113781/v1>
- Periyasamy, A., 2023. Microfiber Emissions from Functionalized Textiles: Potential Threat for Human Health and Environmental Risks. *Toxics* 11, 406. <https://doi.org/10.3390/toxics11050406>
- Periyasamy, A.P., 2024. Recent Advances in the Remediation of Textile-Dye-Containing Wastewater: Prioritizing Human Health and Sustainable Wastewater Treatment. *Sustainability* 16, 495. <https://doi.org/10.3390/su16020495>
- Qianwen, H., Cai, H., Can, L., Xin, L., Lisha, Z., Laili, W., 2024. Comprehensive assessment methods of environmental impacts during textile production. *Ind. Textila* 75, 157–163. <https://doi.org/10.35530/IT.075.02.20238>
- Rana, S., Karunamoorthy, S., Parveen, S., Figueiro, R., 2015. Life cycle assessment of cotton textiles and clothing, in: *Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of Textiles and Clothing*. Elsevier, pp. 195–216. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100169-1.00009-5>
- Ribul, M., Lanot, A., Tommencioni Pisapia, C., Purnell, P., McQueen-Mason, S.J., Baurley, S., 2021. Mechanical, chemical, biological: Moving towards closed-loop bio-based recycling in a circular economy of sustainable textiles. *J. Clean. Prod.* 326, 129325. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129325>

- Roos, S., Peters, G.M., 2015. Three methods for strategic product toxicity assessment—the case of the cotton T-shirt. *Int. J. Life Cycle Assess.* 20, 903–912. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0895-6>
- Rubik, F., Nebel, K., Klusch, C., Karg, H., Hecht, K., Gerbig, M., Gärtner, S., Boldrini, B., 2024. Textiles on the Path to Sustainability and Circularity—Results of Application Tests in the Business-to-Business Sector. *Sustainability* 16, 5954. <https://doi.org/10.3390/su16145954>
- Salazar-Sogamoso, L.M., Gómez-García, M.-Á., Dobrosz-Gómez, I., 2025. Comparative life cycle assessment of sequential chemical and electrochemical processes for the treatment of industrial textile wastewater. *J. Solid State Electrochem.* 29, 3379–3399. <https://doi.org/10.1007/s10008-024-05976-6>
- Saleem, M.A., Pei, L., Saleem, M.F., Shahid, S., Wang, J., 2020. Sustainable dyeing of nylon with disperse dyes in Decamethylcyclopentasiloxane waterless dyeing system. *J. Clean. Prod.* 276, 123258. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123258>
- Sandin, G., Peters, G.M., 2018. Environmental impact of textile reuse and recycling – A review. *J. Clean. Prod.* 184, 353–365. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.266>
- Shirvanimoghaddam, K., Motamed, B., Ramakrishna, S., Naebe, M., 2020. Death by waste: Fashion and textile circular economy case. *Sci. Total Environ.* 718, 137317. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137317>
- Solis, M., Huygens, D., Tonini, D., Fruergaard Astrup, T., 2024. Management of textile waste in Europe: An environmental and a socio-economic assessment of current and future scenarios. *Resour. Conserv. Recycl.* 207, 107693. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107693>
- Sun, G., Cao, X., Wang, Y., Sun, X., Chen, Q., 2024. Comparative life cycle assessment of two different waste materials for recycled fiber. *Resour. Conserv. Recycl.* 205, 107518. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107518>
- Telli, A., Özdil, N., 2015. Effect of Recycled PET Fibers on the Performance Properties of Knitted Fabrics. *J. Eng. Fibers Fabr.* 10, 155892501501000206. <https://doi.org/10.1177/155892501501000206>
- Textile Exchange, 2025. Materials Market Report 2025.
- Ussiri, D.A.N., Lal, R., 2017. Carbon Sequestration for Climate Change Mitigation and Adaptation. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-53845-7>
- Woolridge, A.C., Ward, G.D., Phillips, P.S., Collins, M., Gandy, S., 2006. Life cycle assessment for reuse/recycling of donated waste textiles compared to use of virgin material: An UK energy saving perspective. *Resour. Conserv. Recycl.* 46, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.06.006>
- Xiao, H., Zhao, T., Li, C.-H., Li, M.-Y., 2017. Eco-friendly approaches for dyeing multiple type of fabrics with cationic reactive dyes. *J. Clean. Prod.* 165, 1499–1507. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.174>
- Xu, C., Yu, H., Zhang, S., Shen, C., Ma, C., Wang, J., Li, F., 2024. Cleaner production evaluation system for textile industry: An empirical study from LCA perspectives. *Sci. Total Environ.* 913, 169632. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169632>
- Xu, X., Cui, X., Zhang, Y., Chen, X., Li, W., 2023. Carbon neutrality and green technology innovation efficiency in Chinese textile industry. *J. Clean. Prod.* 395, 136453. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136453>
- Yalcin-Enis, I., Kucukali-Ozturk, M., Sezgin, H., 2019. Risks and Management of Textile Waste, in: Gothandam, K.M., Ranjan, S., Dasgupta, N., Lichtfouse, E. (Eds.), *Nanoscience and Biotechnology for Environmental Applications, Environmental Chemistry for a Sustainable World*. Springer International Publishing, Cham, pp. 29–53. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97922-9_2

- Yan, Y., Wang, C., Ding, D., Zhang, Yingnan, Wu, G., Wang, L., Liu, X., Du, C., Zhang, Yajun, Zhao, C., 2016. Industrial carbon footprint of several typical Chinese textile fabrics. *Acta Ecol. Sin.* 36, 119–125. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2015.09.002>
- Yang, Y., He, W., Chen, F., Wang, L., 2020. Water footprint assessment of silk apparel in China. *J. Clean. Prod.* 260, 121050. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121050>
- Zhang, R., Ma, X., Shen, X., Zhai, Y., Zhang, T., Ji, C., Hong, J., 2020. PET bottles recycling in China: An LCA coupled with LCC case study of blanket production made of waste PET bottles. *J. Environ. Manage.* 260, 110062. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110062>
- Βασιλειάδης, Α.Α., 1993. Σημειώσεις Τεχνολογίας Βαφικής και Φινιρίσματος.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 – Μελέτες LCA στον κλάδο της κλωστοϋφαντουργίας

3.1 Μελέτες LCA στον Κλάδο της κλωστοϋφαντουργίας

Τα τελευταία χρόνια το ερευνητικό ενδιαφέρον έχει στραφεί στις αρχές της κυκλικής οικονομίας και στην αξιολόγηση διαφορετικών σεναρίων όσον αφορά την κατάληξη του προϊόντος στο τέλος της χρήσης του, όπως η επαναχρησιμοποίηση του, η παράταση ζωής του, και η ανακύκλωση (Rubik et al., 2024). Μετά τον κλάδο των πλαστικών, αυτός της κλωστοϋφαντουργίας αποτελεί τον δεύτερο στη σειρά που έχει τη μεγαλύτερη επιρροή στην κλιματική αλλαγή (Abagnato et al., 2024). Αξιόλογος αριθμός μελετών έχουν χρησιμοποιήσει την LCA προκειμένου να εντοπίσουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που έχουν τα κλωστοϋφαντουργικά απόβλητα. Μέσα από αυτές έχει αποδειχθεί ότι η ανακύκλωση αλλά και η επαναχρησιμοποίηση των προϊόντων έχουν μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα από τη διαδικασία της καύσης ή αυτή της υγειονομικής ταφής τους, καθώς επίσης και ότι η επαναχρησιμοποίηση τους συνήθως είναι πιο φιλική προς το περιβάλλον σε σύγκριση με την ανακύκλωση (Solis et al., 2024). Επίσης αναφέρεται ότι η παραγωγή κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων με τη χρήση ινών οι οποίες έχουν προέλθει από τη διαδικασία της ανακύκλωσης έχει αποδειχθεί ότι έχει επιπτώσεις οι οποίες επηρεάζουν σε μικρότερο βαθμό το περιβάλλον σε σχέση με τις παρθένες ίνες (Abagnato et al., 2024).

Ως επί το πλείστον στην υπάρχουσα βιβλιογραφία, κατά κύριο λόγο μελετώνται οι επιπτώσεις της κλιματικής αλλαγής σε υφάσματα από πολυεστέρα ή από βαμβάκι (Solis et al., 2024). Σε μια LCA πρέπει να αναλυθούν όλες οι διαδικασίες από την αρχή της ζωής ενός προϊόντος, όπως η εξόρυξη των πρώτων υλών, η παραγωγή κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων (συμπεριλαμβανομένων των σταδίων της κλώσης, ύφανσης ή πλέξης, του φινιρίσματος και του ραψίματος), όλες οι μεταφορές, η χρήση του, η ανακύκλωσή του (Rubik et al., 2024), κ.α. . Όμως οι υφιστάμενες μελέτες που σχετίζονται με πράσινες πρακτικές στην κλωστοϋφαντουργία παρουσιάζουν δύο σημαντικούς περιορισμούς. Κατά πρώτον, η μελέτη εστιάζεται κυρίως σε διεργασίες βαφής από τον τομέα της παραγωγής, χωρίς να γίνεται μελέτη στον υπόλοιπο κλάδο (δεν γίνεται δηλαδή LCA από την πρώτη ύλη μέχρι την ολοκλήρωση της κατασκευής του προϊόντος). Κατά δεύτερον, οι παράγοντες που μελετώνται κατά κύριο λόγο είναι η μεγάλη κατανάλωση πόρων και η ρύπανση του υδροφόρου ορίζοντα. Όσο όμως και αν αναλυθούν αυτοί οι δείκτες, δεν μπορούν να είναι αντιπροσωπευτικοί και για τις υπόλοιπες κατηγορίες (Xu et al., 2024). Μελέτες LCA χρειάζεται να πραγματοποιηθούν και σε πρακτικές επεξεργασίας υγρών αποβλήτων. Ο κύριος λόγος για την εφαρμογή της

μεθόδου LCA στη διαδικασία επεξεργασίας των υγρών αποβλήτων αφορά την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που απορρέουν από την επεξεργασία τους. Συνήθως απαιτείται ο ακριβής καθορισμός των ορίων μελέτης της LCA. Η προσέγγιση από στάδιο σε στάδιο (gate to gate) αποτελεί μια μεθοδολογία η οποία χρησιμοποιείται συχνά, κατά την οποία τα διαφορετικά στάδια της διεργασίας ορίζονται ως επιμέρους όρια. (Periyasamy, 2024). Η ανάλυση των αποτελεσμάτων της LCIA καταδεικνύει ότι με τις υπάρχουσες τεχνολογίες η επαναχρησιμοποίηση των προϊόντων έχει λιγότερες επιπτώσεις σε σχέση με την ανακύκλωση. Οι δύο στρατηγικές αυτές δεν αναιρούν η μία την άλλη στην εφαρμογή καθώς εφαρμόζονται σε απόβλητα διαφορετικής ποιότητας. Ο διαχωρισμός των αποβλήτων κατά τη συλλογή τους και η σωστή επεξεργασία τους (μέσα από την επαναχρησιμοποίηση και την ανακύκλωση), μπορεί να μειώσει αρκετά κάποιες επιπτώσεις (Abagnato et al., 2024).

Όσον αφορά τα προϊόντα, ένας ικανός αριθμός μελετών LCA σε κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα διάφορων συνθέσεων έχει διεξαχθεί ώστε να αξιολογήσει τον περιβαλλοντικό τους αντίκτυπο σε αρκετές χώρες. Μερικές από τις μελέτες οι οποίες έχουν διεξαχθεί:

- Οι Bianco et al. το 2022 στην Ιταλία χρησιμοποίησαν μια LCA όπου συνέκριναν παρθένο και ανακυκλωμένο μαλλί. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η χρήση ινών από ανακυκλωμένο μαλλί παρουσιάζει από 2 έως 10 φορές λιγότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον σε σύγκριση με αυτές από παρθένο μαλλί (Bianco et al., 2022)
- Οι Zhang et al. το 2015 πραγματοποίησαν στην Κίνα μια LCA για την κατασκευή μπλουζών από βαμβάκι όπου αποφάνθηκαν ότι η καλλιέργεια και η βαφή βαμβακιού αποτελούν τους κύριους παράγοντες στη μόλυνση του περιβάλλοντος όσον αφορά τον τομέα (Islam et al., 2024b).
- Οι Kazan et al. το 2020 πραγματοποίησαν έρευνα LCA για την παραγωγή πουκαμίσων από βαμβάκι. Από τα αξιοσημείωτα αποτελέσματά τους προκύπτει ότι αν αντικατασταθεί το συμβατικό βαμβάκι και η συμβατική ενέργεια με οργανικό βαμβάκι και ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αντίστοιχα, η υπερθέρμανση του πλανήτη μπορεί να μειωθεί έως και κατά 48% (Adviento-Borbe et al., 2018)
- Οι Yang et al. το 2020 πραγματοποίησαν μελέτη LCA σε μεταξωτά ενδύματα και παρατήρησαν ότι η βαφή και το φινίρισμα είναι οι κατεργασίες οι οποίες έχουν το μεγαλύτερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σύγκριση με τις υπόλοιπες διεργασίες του κλάδου (Yang et al., 2020).
- Οι Nakhate et al. το 2020 πραγματοποίησαν μελέτη LCA σε εγκαταστάσεις επεξεργασίας υγρών αποβλήτων στην Ινδία, όπου και διαπιστώθηκε ότι η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας αποτελεί τον βασικό συντελεστή των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Nakhate et al., 2020).

- Οι Liu et al., επίσης το 2020 πραγματοποίησαν LCA σε μελανζέ νήματα όπου διαπίστωσαν ότι αν χρησιμοποιηθεί στην παραγωγή νερό το οποίο έχει ανακυκλωθεί μετά από άλλες διεργασίες είναι πιθανό να μειωθεί η οικολογικότητα των γλυκών υδάτων έως 30% (Liu et al., 2020).
- Οι Moazzem et al. πραγματοποίησαν το 2021 Ανάλυση Κύκλου Ζωής σχετικά με τη χρήση ενδυμάτων στην Αυστραλία το 2015, και διαπίστωσαν ότι η συνολική συμβολή στην κλιματική αλλαγή από τη χρήση ενδυμάτων ανήλθε περίπου ισοδύναμα σε 106.607.028 τόνους διοξειδίου του άνθρακα (Moazzem et al., 2021).
- Οι Islam et al. το 2024 στις Ηνωμένες Πολιτείες Αμερικής διεξήγαγαν LCA σε μη υφάνσιμα κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα και διαπίστωσαν στα αποτελέσματά τους ότι η χρήση της ηλεκτρικής ενέργειας για την παραγωγή τους είναι ο κύριος παράγοντας στις περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Islam et al., 2024a).

Παρόλο όμως που υπάρχουν αρκετές μελέτες οι οποίες αξιολογούν το περιβαλλοντικό αποτύπωμα των κλωστοϋφαντουργικών αποβλήτων, δεν υπάρχουν μελέτες οι οποίες να παρουσιάζουν μια ολοκληρωμένη αξιολόγηση των περιβαλλοντικών και κοινωνικοοικονομικών επιπτώσεων λαμβάνοντας υπόψη και την προοπτική μελλοντικών τεχνολογικών εξελίξεων. Τα κενά τα οποία υπάρχουν στη βιβλιογραφία αφορούν: την περιορισμένη περιγραφή των νέων τεχνολογιών διαχείρισης των κλωστοϋφαντουργικών αποβλήτων, την περιορισμένη ανάλυση της ποιότητας δεδομένων, την περιορισμένη ανάλυση μελλοντικών σεναρίων και προοπτικών, την έλλειψη ολοκληρωμένων αξιολογήσεων περιβαλλοντικών και κοινωνικοοικονομικών επιπτώσεων, και τέλος στην απουσία εκτιμήσεων εξωτερικού κόστους. Ελλείψει των παραπάνω παραμέτρων, οι αποφάσεις σχετικά με στόχους που πρόκειται να παρθούν ενδέχεται να οδηγήσουν σε εσφαλμένα συμπεράσματα (Solis et al., 2024).

Εκτός από τις μελέτες LCA, υπάρχουν και κάποιες μελέτες S-LCA που έχουν γίνει στον κλάδο της κλωστοϋφαντουργίας αν και βρίσκονται ακόμη σε πρώιμο στάδιο. Απόρροια αυτού αποτελεί το γεγονός ότι δεν υπάρχουν συγκεκριμένες κατηγορίες και μέθοδοι οι οποίες να έχουν συμφωνηθεί ευρέως ότι θα χρησιμοποιούνται προκειμένου να αξιολογούνται οι κοινωνικές επιπτώσεις. Το παραπάνω αποτελεί πρόκληση για τους ερευνητές και τους επαγγελματίες που ασχολούνται με S-LCA και επιδιώκουν να αξιολογήσουν τις κοινωνικές επιπτώσεις των προϊόντων και διεργασιών (Fidan et al., 2025). Τα ελάχιστα μέσα τα οποία υπάρχουν είναι κάποιες νόρμες και κάποιες μεθοδολογίες οι οποίες έχουν εκδοθεί από το Πρόγραμμα των Ηνωμένων Εθνών για το περιβάλλον και την Εταιρεία Περιβαλλοντικής Τοξικολογίας

και Χημείας [(UNEP & SETAC) United Nations Environment Programme/ Society of Environmental Toxicology and Chemistry]. Αξιοσημείωτο είναι ότι μέχρι το 2023 υπήρχε μόνο μια έρευνα S-LCA στον τομέα της κλωστοϋφαντουργίας (Fidan et al., 2025) ενώ σήμερα πλέον υπάρχουν 7.

3.2 Μελέτες LCA σε φυσικές ίνες

Από όλες τις φυσικές ίνες το βαμβάκι αποτελεί την κατηγορία η οποία χρησιμοποιείται σε μεγαλύτερο βαθμό στην κλωστοϋφαντουργία καθώς είναι άνετο, βιοδιασπώμενο, και έχει την ικανότητα να αναπνέει (Rana et al., 2015). Η καλλιέργεια του όμως δεν παύει να έχει επιπτώσεις στο περιβάλλον αλλά και να ενέχει κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία (Baydar et al., 2015). Αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα δημιουργίας αερίων του θερμοκηπίου, παράγοντας από 0,3% έως 1% που οδηγεί στην υπερθέρμανση του πλανήτη, λόγω της χρήσης καυσίμων όπως ντίζελ, καθώς και λόγω της κατανάλωσης ηλεκτρικής ενέργειας, των λιπασμάτων και των ζιζανιοκτόνων. Η καλλιέργεια του βαμβακιού καταλαμβάνει το 2,3% των γεωργικών εκτάσεων παγκοσμίως, και χρησιμοποιεί το 2,6% του νερού που προορίζεται για καλλιέργειες. Η αυξημένη κατανάλωση ενέργειας στα στάδια της παραγωγής όπως παραδείγματος χάρη της νηματοποίησης, της πλέξης, των υγρών διαδικασιών και της κατασκευής του ενδύματος συνδέονται με αυξημένες εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, αύξηση του φαινομένου του θερμοκηπίου και του φαινομένου της οξίνισης, και υποδηλώνει ότι δεν είναι μόνο το στάδιο της καλλιέργειας αυτό το οποίο έχει επιπτώσεις στο περιβάλλον (Islam et al., 2024b).

Ανάμεσα στα έξι διαφορετικά στάδια παραγωγής ινών βαμβακιού, η διαδικασία της ινοποίησης και της βαφής εμφανίζονται να έχουν τις μεγαλύτερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Συγκεκριμένα, η διαδικασία της βαφής εμφανίζεται ως αυτή με τις σημαντικότερες επιπτώσεις στο περιβάλλον (Islam et al., 2024b) και αποτελεί έναν από τους χειρότερους ρυπαντές στον κλάδο της κλωστοϋφαντουργίας. Προκειμένου να επιτευχθεί το επιθυμητό χρώμα και η κατάλληλη απόχρωση απαιτείται μεγάλη ποσότητα ενέργειας, νερού, ατμού, χημικών και χρωμάτων τα οποία οδηγούν σε μεγάλο βαθμό στην οξίνιση του εδάφους (Roos and Peters, 2015). Τα χημικά και κάποιες άλλες βοηθητικές για τη βαφή ουσίες αποτελούν τους κύριους παράγοντες συμβολής στην οικοτοξικότητα των γλυκών υδάτων, την τοξικότητα για τον άνθρωπο, στον ευτροφισμό των θαλάσσιων υδάτων και στη θαλάσσια οικοτοξικότητα (Islam et al., 2024b).

Το περιβαλλοντικό αποτύπωμα το οποίο προκύπτει από την παραγωγή κλωστοϋφαντουργικών ειδών από βαμβάκι αποτελεί παγκόσμιο πρόβλημα προς

λύση καθώς κατά την παραγωγή του λαμβάνει χώρα μεγάλη κατανάλωση σε νερό και ενέργεια. Μελέτες έχουν γίνει προκειμένου να ερευνηθεί αν το οργανικό βαμβάκι έχει χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σχέση με το συμβατικό βαμβάκι. Αφενός, στην καλλιέργεια του οργανικού βαμβακιού απαιτείται μεγαλύτερη έκταση γης για την παραγωγή της ίδιας ποσότητας βαμβακιού, λόγω χαμηλότερης απόδοσης του εδάφους, αφετέρου η καλλιέργεια οργανικού βαμβακιού βοηθάει το οικοσύστημα και προσδίδει πλεονεκτήματα από άποψη βιοποικιλότητας. Καθώς οι επιπτώσεις από τη χρήση οργανικού βαμβακιού σε άλλες περιβαλλοντικές κατηγορίες είναι συγκρίσιμες με εκείνες του συμβατικού βαμβακιού, προκύπτουν σαφή οφέλη στον περιβαλλοντικό τομέα από τη μετάβαση στη χρήση οργανικού βαμβακιού. Κατά τη διαδικασία καλλιέργειας συμβατικού βαμβακιού μεγάλες ποσότητες από νερό, φυτοφάρμακα και λιπάσματα χρησιμοποιούνται και επίσης μεγάλες γεωργικές εκτάσεις απαιτούνται, γεγονός που οδηγεί σε επιπτώσεις για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία. Επιπροσθέτως, η ενεργοβόρα διαδικασία της ινοποίησης όπου δημιουργείται νήμα από ίνες βαμβακιού σε συνδυασμό με την υψηλή κατανάλωση ατμού στις υγρές διεργασίες, η οποία βασίζεται κυρίως σε ηλεκτρική από το δίκτυο, συμβάλουν περαιτέρω στην ενίσχυση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Cundubey and Azgin, 2024).

Η ανακύκλωση βαμβακερών και άλλων κυτταρινικών ινών οδηγεί σε μείωση της χρήσης νερού, της χρήσης γης αλλά και του αποτυπώματος φωσφόρου καθώς αποφεύγεται η παραγωγή νέων ινών. Συνεπώς, η ανακύκλωση ινών βαμβακιού προσφέρει περισσότερα πλεονεκτήματα σε σύγκριση με άλλες κατηγορίες ανακυκλωμένων ινών σύμφωνα με τα παραπάνω. Οι βαμβακερές ίνες μπορούν να αντικατασταθούν με αναγεννημένες κυτταρινικές ίνες οι οποίες προέρχονται από πολύτο προερχόμενο από πολύτο ξυλείας δασικής προέλευσης, όπως είναι το λυοσέλ. Οι LCA που έχουν γίνει δείχνουν ότι αποφεύγοντας τη γεωργική καλλιέργεια βαμβακιού, κερδίζονται οφέλη στο υδάτινο αποτύπωμα, το αποτύπωμα φωσφόρου και την τρύπα του όζοντος. Επίσης η χρήση ινών αναγεννημένης κυτταρίνης μπορεί σε γενικό βαθμό να μειώσει τις επιπτώσεις του κλάδου στο περιβάλλον αισθητά. Ωστόσο, για την παραγωγή κυτταρινικών ινών, οι απαιτήσεις άρδευσης των δασικών φυτειών για την παραγωγή του απαραίτητου πολτού θα πρέπει να διατηρούνται στο ελάχιστο δυνατό επίπεδο. Επιπλέον, οι κυτταρινικές ίνες μπορούν να παραχθούν και από υπολείμματα κυτταρίνης, όπως αυτά που προκύπτουν από την ανακύκλωση κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων (Rubik et al., 2024).

Το 2016 οι Yan et al. πραγματοποίησαν μελέτες LCA σε υφάσματα από μαλλί και βαμβάκι, αφού τα χώρισαν πρώτα σε 13 κατηγορίες κλωστοϋφαντουργικών

προϊόντων. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι εκπομπές άνθρακα από την παραγωγή μάλλινων υφασμάτων ήταν εμφανώς αυξημένες σε σχέση με τα βαμβακερά υφάσματα, και επίσης τα υφάσματα τα οποία παράχθηκαν με απλή ύφανση είχαν μεγαλύτερες εκπομπές άνθρακα σε σχέση με τα υφάσματα που μπλέχτηκαν σε πλέξη rib. Η κατανάλωση της ηλεκτρικής ενέργειας ήταν αυτή η οποία επηρέαζε σημαντικά το αποτύπωμα του άνθρακα (σε ποσοστό 87% της συνολικής παραγωγής) (Yan et al., 2016).

3.3 Μελέτες LCA σε συνθετικές ίνες

Από το 2000 και μετά, η χρήση του πολυεστέρα στην κλωστοϋφαντουργία έχει αυξηθεί κατά 157%. Δυστυχώς ο πολυεστέρας δεν διαλύεται φυσικά και παραμένει ένα απόβλητο προϊόντος για πολλά χρόνια. Μπαίνει στην τροφική αλυσίδα μολύνει το νερό και έχει πολλά μειονεκτήματα για το περιβάλλον κυρίως λόγω της τοξικότητάς του (Monteiro et al., 2018). Γι αυτό το λόγο, η ανακύκλωση των αποβλήτων του πολυεστέρα είναι ζωτικής σημασίας διαδικασία καθώς ο πολυεστέρας είναι το υλικό το οποίο χρησιμοποιείται ευρέως για την παραγωγή ινών, κατέχοντας το ποσοστό του 80% στην αγορά των συνθετικών ινών (Fidan et al., 2024). Τα αποτελέσματα της LCA Σε ανακυκλωμένο πολυεστέρα δείχνουν ότι δεν υπάρχει μεγάλη διαφορά στις κατηγορίες που επηρεάζουν το περιβάλλον σε σύγκριση με τη χρήση παρθένου πολυεστέρα. Αυτό που δείχνει ότι έχει μεγάλη επιρροή είναι η παράταση της ζωής της χρήσης του προϊόντος σε σχέση με την ανακύκλωση (Rubik et al., 2024).

Σύμφωνα με έρευνα της εταιρείας Textile Exchange το 2017, η παγκόσμια παραγωγή πολυεστέρα έφτασε τους 2,5 εκατομμύρια τόνους το 2019, με αύξηση 0,3 εκατομμύρια τόνους από το 2008. Η πιο συχνή πηγή αποβλήτων παρουσιάζεται να είναι τα μπουκάλια που προέρχονται από πολυ(τερεφθαλικό αιθυλενεστέρα). Μελέτες που έχουν γίνει σε ανακυκλωμένο πολυεστέρα που έχει προέλθει από PET εστιάζουν στις διαδικασίες ανακύκλωσης, στις ιδιότητες των ανακυκλωμένων ινών, και τα κοινωνικοοικονομικά πλεονεκτήματα. Σχεδόν 72% από τα προϊόντα που έχουν προέλθει από ανακύκλωση μπουκαλιών PET έχουν κατασκευαστεί συγκεκριμένα από ίνες ανακυκλωμένου πολυ(τερεφθαλικού αιθυλενεστέρα) και συνήθως χρησιμοποιούνται κατά κύριο λόγο στη βιομηχανία της κλωστοϋφαντουργίας (Aizenshtein, 2016). Κατά την ανακύκλωση κλειστού τύπου, τα χαρακτηριστικά του αρχικού υλικού παραμένουν και δημιουργείται μια διαδικασία στην οποία τα μονομερή συλλέγονται και χρησιμοποιούνται για τη δημιουργία νέου PET με λιγοστές εκπομπές αέριων ρύπων. Επειδή η ανακύκλωση κλειστού τύπου στοχεύει στη διατήρηση της ποιότητας του αρχικού υλικού, είναι πιο ακριβή διαδικασία. Η ανοιχτού τύπου ανακύκλωση μετατρέπει το υλικό σε ένα διαφορετικό προϊόν. Η συγκεκριμένη

διαδικασία αλλάζει τα χαρακτηριστικά του αρχικού προϊόντος γεγονός που μπορεί να επηρεάσει αρνητικά τη λειτουργικότητά του και να δυσχεράνει τη διαδικασία ανακύκλωσης. Όσον αφορά το κόστος, το 2019 οι ίνες από ανακυκλωμένο PET ήταν περίπου 36% πιο ακριβές από αυτές του συμβατικού πολυεστέρα. Επιπλέον, οι διαδικασίες ανακύκλωσης είναι πολύπλοκες καθώς αναμειγνύονται διάφορα υλικά όπως PET ή βαμβακερά υφάσματα τα οποία έχουν ασταθείς γλυκολικούς δεσμούς. Μελέτες έχουν δείξει ότι η χρήση ανακυκλωμένου PET έχει αρκετά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις, καθώς παρουσιάζουν μικρότερη οικοτοξικότητα και χαμηλότερες επιπτώσεις ευτροφισμού και οξίνισης (Fidan et al., 2024).

Οι μηχανικές και οι χημικές ιδιότητες των ανακυκλωμένων ινών πολυ(τερεφθαλικού αιθυλενεστέρα) παρουσιάζουν συγκεκριμένες προκλήσεις. Σε συγκεκριμένες διεργασίες ανακύκλωσης όπως αυτή της γλυκόλυσης, έχει παρατηρηθεί ότι οι ίνες που βγαίνουν ως τελικό προϊόν έχουν μειωμένη αντοχή. (Peng et al., 2023). Τα υφάσματα τα οποία θα προκύψουν εξ ολοκλήρου από ίνες ανακυκλωμένου PET, παρουσιάζουν τάση για αυξημένο pilling (δημιουργία κόμπων στην επιφάνεια του υφάσματος μετά από τριβή) σε σχέση με τα μη ανακυκλωμένα ή σύμμικτα υφάσματα (Telli and Özdiil, 2015). Η ανακύκλωση του πολυεστέρα που έχει προκύψει από ανακυκλωμένο PET μπορεί να γίνει με διάφορες μεθόδους όπως ανοιχτού και κλειστού τύπου ανακύκλωση. Στην ανοιχτού τύπου το υλικό ανακυκλώνεται αλλά χρησιμοποιείται σε διαφορετικό προϊόν, ενώ στην κλειστού τύπου το υλικό ανακυκλώνεται και επιστρέφει σαν ίδιο προϊόν ή προϊόν με παρόμοια ποιότητα και χαρακτηριστικά (Fidan et al., 2024).

3.4 Μελέτες LCA σε βαφικές κατεργασίες

Η κατανάλωση ενέργειας, νερού και χημικών τα οποία χρησιμοποιούνται σε βαφικές κατεργασίες κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων προκαλούν μόλυνση του νερού, του αέρα και άλλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις. Προκειμένου να μπορέσουν να ποσοτικοποιηθούν οι προαναφερθείσες επιπτώσεις και να μελετηθεί πόσο επιδρά ένα μόνο προϊόν στα παραπάνω, χρησιμοποιείται η μέθοδος LCA ώστε να περιγραφούν οι επιπτώσεις και το χημικό αποτύπωμα από την αρχή της παραγωγής του του προϊόντος μέχρι κάποιο συγκεκριμένο στάδιο από την αρχή της παραγωγής του μέχρι και το τέλος της ζωής του (Qianwen et al., 2024).

Μελέτες έδειξαν ότι ενσωματώνοντας στις βαφικές διεργασίες βαφές με καινοτόμες τεχνολογίες μπορεί να μειωθεί το ποσοστό των χημικών και του νερού που χρειάζεται για την ολοκλήρωση της βαφής (Xiao et al., 2017). Όσες επιχειρήσεις

ενσωματώνουν πράσινες πρακτικές στις κατεργασίες τους έχει παρατηρηθεί ότι μειώνουν ταυτόχρονα την κατανάλωση της ενέργειας των βοηθητικών χημικών για τη βαφή. Εστιάζοντας σε πόρους και τεχνολογίες οι οποίες δεν ρυπαίνουν όπως η οζόνωση, οι υπέρηχοι και οι φυσικές βαφές, είναι πιθανό οι διαδικασίες βαφής και φινιρίσματος να μετατραπούν σε πιο οικολογικές για τα βαμβακερά υφάσματα (Xu et al., 2024).

3.5 Μελέτες LCA σε ανακυκλωμένα προϊόντα

Οι περισσότερες LCA μελέτες οι οποίες έχουν γίνει στα απόβλητα του κλάδου εστιάζουν στη σύγκριση της περιβαλλοντικής απόδοσης που έχουν τα προϊόντα τα οποία έχουν προέλθει από ανακύκλωση σε σχέση με τα συμβατικά. Δεν υπάρχει αμφιβολία ότι η καλύτερη επιλογή είναι η επαναχρησιμοποίηση τους, με συλλογή, καθάρισμα, απολύμανση και διαλογή αυτών. Δυστυχώς όμως, η επαναχρησιμοποίηση των ενδυμάτων δεν γίνεται σε μεγάλη κλίμακα ακόμα καθώς στις μέρες μας οι καταναλωτές δίνουν περισσότερη προσοχή στην ποιότητα ζωής τους και στην εικόνα τους, και έτσι δεν επιθυμούν να αγοράζουν προϊόντα από δεύτερο χέρι. Τα μόνα προϊόντα τα οποία κατά κύριο λόγο έχουν πιθανότητες για επαναχρησιμοποίηση είναι προϊόντα από γνωστές μεγάλες εταιρείες (Sun et al., 2024).

Οι διαφορές στα αποτελέσματα των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που έχουν προκύψει από μελέτες δείχνουν ότι η σύνθεση των αποβλήτων παίζει πρωτεύοντα ρόλο στην απόφαση κατάλληλης επιλογής διαχείρισης. Κατά γενική ομολογία τα ευρήματα δείχνουν ότι η επαναχρησιμοποίηση των προϊόντων αποτελεί την βέλτιστη λύση για τη διαχείριση των κλωστοϋφαντουργικών αποβλήτων ανεξάρτητα από τις συνθήκες (Solis et al., 2024). Η επιλογή της σύνθεσης του υλικού το οποίο θα χρησιμοποιηθεί για την παραγωγή αποτελεί κύριο παράγοντα για το περιβαλλοντικό αποτύπωμα που θα έχει. Οι βασικοί παράγοντες που επηρεάζουν τη βιωσιμότητα των κλωστοϋφαντουργικών ινών περιλαμβάνουν τη γεωργική καλλιέργεια (και τη συνακόλουθη χρήση γης καθώς και την άρδευση), τη χρήση ορυκτών πόρων για την παραγωγή ινών, καθώς και άλλες σχετικές διεργασίες. Η παραπάνω διαπίστωση αφορά κατά κύριο λόγο την καλλιέργεια βαμβακιού και την παραγωγή ενδυμάτων από αυτό, καθώς συνδέεται με αυξημένη καλλιέργεια της γης, αυξημένη χρήση νερού καθώς και το αποτύπωμα φωσφόρου (Rubik et al., 2024).

Το 2006 οι Woolridge et al., πραγματοποίησαν στο Ηνωμένο Βασίλειο έρευνα LCA σε πολυεστερικά ρούχα που είχαν ανακυκλωθεί ή επαναχρησιμοποιηθεί των οποίων την περιβαλλοντική απόδοση σύγκριναν με ρούχα κατασκευασμένα από παρθένο βαμβάκι και πολυεστέρα. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η κατανάλωση ενέργειας

που χρησιμοποιήθηκε για την κατασκευή των ρούχων που προήλθαν από ανακύκλωση ή επαναχρησιμοποίηση ήταν 3% μικρότερη σε σχέση με αυτή για τα συμβατικά (Woolridge et al., 2006).

Η διερεύνηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των διάφορων πρώτων υλών αποτελεί κρίσιμο παράγοντα για την επιλογή βιώσιμων υλικών (Fidan et al., 2024). Κατά συνέπεια, θα πρέπει να επιδιώκεται η αύξηση της χρήσης πολυεστέρα και η μείωση της χρήσης βαμβακιού. Σε περιπτώσεις στις οποίες το παραπάνω δεν μπορεί να επιτευχθεί εύκολα ακόμα η χρήση ινών από αναγεννημένη κυτταρίνη όπως το λυοσέλ προτείνεται ως η επόμενη καλύτερη λύση. Αν η χρήση του βαμβακιού είναι προ απαιτούμενη ή επιθυμητή, τότε η επιλογή οργανικού βαμβακιού αποτελεί προτιμότερη επιλογή από αυτή του συμβατικού βαμβακιού. Το παράδειγμα της σύνθεσης του βαμβακιού αποτελεί έναν δείκτη για το πόσο σημαντικό είναι να υπάρχει σφαιρική θεώρηση των επιπτώσεων και να μην εστιάζονται αυτές μόνο στο ανθρακικό αποτύπωμα (Rubik et al., 2024).

Οι βιομηχανικές μονάδες θα πρέπει να μειώσουν τη χρήση ιδιαίτερα ρυπογόνων χημικών ουσιών ή να επιλέξουν πρώτες ύλες που προσφέρουν τις ίδιες λειτουργίες με χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα, και παράλληλα οι κατασκευαστές θα πρέπει να αναπτύξουν αποδοτικότερες και πιο φιλικές προς το περιβάλλον τεχνολογίες παραγωγής πρώτων υλών. Οι καταναλωτές θα πρέπει να επιλέγουν και να χρησιμοποιούν, στο μέγιστο δυνατό βαθμό, προϊόντα φιλικά προς το περιβάλλον, συμβάλλοντας έτσι στην ανάπτυξη της αγοράς «πράσινων» προϊόντων. Για την ελαχιστοποίηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων κατά τον κύκλο ζωής ενός προϊόντος, απαιτείται η συμμετοχή όλων των τομέων της κοινωνίας (Sun et al., 2024).

Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

- Abagnato, S., Rigamonti, L., Grosso, M., 2024. Life cycle assessment applications to reuse, recycling and circular practices for textiles: A review. *Waste Management* 182, 74–90. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.04.016>
- Adviento-Borbe, M.A.A., Barnes, B.D., Iseyemi, O., Mann, A.M., Reba, M.L., Robertson, W.J., Massey, J.H., Teague, T.G., 2018. Water quality of surface runoff and lint yield in cotton under furrow irrigation in Northeast Arkansas. *Science of The Total Environment* 613–614, 81–87. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.020>
- Aizenshtein, E.M., 2016. Bottle Wastes – to Textile Yarns. *Fibre Chem* 47, 343–347. <https://doi.org/10.1007/s10692-016-9691-8>
- Baydar, G., Ciliz, N., Mammadov, A., 2015. Life cycle assessment of cotton textile products in Turkey. *Resources, Conservation and Recycling* 104, 213–223. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.007>
- Bianco, I., Gerboni, R., Picerno, G., Blengini, G.A., 2022. Life Cycle Assessment (LCA) of MWool® Recycled Wool Fibers. *Resources* 11, 41. <https://doi.org/10.3390/resources11050041>

- Cundubey, F.S., Azgin, S.T., 2024. Comparative life cycle assessment of denim manufacturing: Evaluating conventional vs. recycled cotton in the context of renewable energy. *Journal of Cleaner Production* 434, 140117. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140117>
- Fidan, F.Ş., Aydoğan, E.K., Uzal, N., 2025. Comprehensive analysis of social subcategories throughout life cycle assessment approach for the textile industry. *Int J Life Cycle Assess* 30, 1464–1479. <https://doi.org/10.1007/s11367-024-02340-8>
- Fidan, F.Ş., Aydoğan, E.K., Uzal, N., 2024. Sustainability assessment of denim fabric made of PET fiber and recycled fiber from postconsumer PET bottles using LCA and LCC approach with the EDAS method. *Integrated Environmental Assessment and Management* 20, 2347–2365. <https://doi.org/10.1002/ieam.4979>
- Islam, S., Bhat, G., Mani, S., 2024a. Life cycle assessment of thermal insulation materials produced from waste textiles. *J Mater Cycles Waste Manag* 26, 1071–1085. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01882-7>
- Islam, S., Hasan, A.K.M.M., Bhuiyan, M.A.R., Bhat, G., 2024b. Evaluation of environmental impacts of cotton polo shirt production in Bangladesh using life cycle assessment. *Science of The Total Environment* 926, 172097. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172097>
- Liu, Y., Zhu, L., Zhang, C., Ren, F., Huang, H., Liu, Z., 2020. Life cycle assessment of melange yarns from the manufacturer perspective. *Int J Life Cycle Assess* 25, 588–599. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01705-8>
- Moazzem, S., Crossin, E., Daver, F., Wang, L., 2021. Life Cycle Assessment of Apparel Consumption in Australia. *Environmental and Climate Technologies* 25, 71–111. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2021-0006>
- Monteiro, R.C.P., Ivar Do Sul, J.A., Costa, M.F., 2018. Plastic pollution in islands of the Atlantic Ocean. *Environmental Pollution* 238, 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.096>
- Nakhate, P.H., Moradiya, K.K., Patil, H.G., Marathe, K.V., Yadav, G.D., 2020. Case study on sustainability of textile wastewater treatment plant based on lifecycle assessment approach. *Journal of Cleaner Production* 245, 118929. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118929>
- Peng, L., Chen, Y., Wan, Z., Zhu, Y., Guo, F., Zhu, D., Yi, C., 2023. Chemical recycling of waste cellulose denim fabric and re-dyeing process. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3113781/v1>
- Periyasamy, A.P., 2024. Recent Advances in the Remediation of Textile-Dye-Containing Wastewater: Prioritizing Human Health and Sustainable Wastewater Treatment. *Sustainability* 16, 495. <https://doi.org/10.3390/su16020495>
- Qianwen, H., Cai, H., Can, L., Xin, L., Lisha, Z., Laili, W., 2024. Comprehensive assessment methods of environmental impacts during textile production. *Industria Textila* 75, 157–163. <https://doi.org/10.35530/IT.075.02.20238>
- Rana, S., Karunamoorthy, S., Parveen, S., Figueiro, R., 2015. Life cycle assessment of cotton textiles and clothing, in: *Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of Textiles and Clothing*. Elsevier, pp. 195–216. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100169-1.00009-5>
- Roos, S., Peters, G.M., 2015. Three methods for strategic product toxicity assessment—the case of the cotton T-shirt. *Int J Life Cycle Assess* 20, 903–912. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0895-6>
- Rubik, F., Nebel, K., Klusch, C., Karg, H., Hecht, K., Gerbig, M., Gärtner, S., Boldrini, B., 2024. Textiles on the Path to Sustainability and Circularity—Results of Application Tests in the Business-to-Business Sector. *Sustainability* 16, 5954. <https://doi.org/10.3390/su16145954>
- Solis, M., Huygens, D., Tonini, D., Fruergaard Astrup, T., 2024. Management of textile waste in Europe: An environmental and a socio-economic assessment of

- current and future scenarios. *Resources, Conservation and Recycling* 207, 107693. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107693>
- Sun, G., Cao, X., Wang, Y., Sun, X., Chen, Q., 2024. Comparative life cycle assessment of two different waste materials for recycled fiber. *Resources, Conservation and Recycling* 205, 107518. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107518>
- Telli, A., Özdil, N., 2015. Effect of Recycled PET Fibers on the Performance Properties of Knitted Fabrics. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* 10, 155892501501000206. <https://doi.org/10.1177/155892501501000206>
- Woolridge, A.C., Ward, G.D., Phillips, P.S., Collins, M., Gandy, S., 2006. Life cycle assessment for reuse/recycling of donated waste textiles compared to use of virgin material: An UK energy saving perspective. *Resources, Conservation and Recycling* 46, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.06.006>
- Xiao, H., Zhao, T., Li, C.-H., Li, M.-Y., 2017. Eco-friendly approaches for dyeing multiple type of fabrics with cationic reactive dyes. *Journal of Cleaner Production* 165, 1499–1507. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.174>
- Xu, C., Yu, H., Zhang, S., Shen, C., Ma, C., Wang, J., Li, F., 2024. Cleaner production evaluation system for textile industry: An empirical study from LCA perspectives. *Science of The Total Environment* 913, 169632. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169632>
- Yan, Y., Wang, C., Ding, D., Zhang, Yingnan, Wu, G., Wang, L., Liu, X., Du, C., Zhang, Yajun, Zhao, C., 2016. Industrial carbon footprint of several typical Chinese textile fabrics. *Acta Ecologica Sinica* 36, 119–125. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2015.09.002>
- Yang, Y., He, W., Chen, F., Wang, L., 2020. Water footprint assessment of silk apparel in China. *Journal of Cleaner Production* 260, 121050. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121050>

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 – Case Study στην βαφή υφασμάτων

4.1 Στόχος και πεδίο μελέτης

Στόχο της εργασίας αποτελεί η μελέτη των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με τη βαφή υφασμάτων, με εφαρμογή της μεθοδολογίας LCA Thinking, σύμφωνα με τα πρότυπα ISO 14040 και ISO 14044, για την εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων (συγκεκριμένα των αέριων εκπομπών) των διεργασιών βαφής βαμβακερών και πολυεστερικών υφασμάτων (από ανακυκλωμένο και συμβατικό πολυεστέρα). Πιο συγκεκριμένα, στόχοι της μελέτης είναι να γίνει η καταγραφή των διεργασιών βαφής για τις προαναφερθείσες κατηγορίες υφασμάτων, να συλλεχθούν πρωτογενή δεδομένα από βιομηχανική μονάδα βαφής σχετικά με την κατανάλωση κυρίως νερού, ενέργειας. Με γνώμονα τα παραπάνω στοιχεία, λαμβάνει χώρα Ανάλυση Κύκλου Ζωής για τις διεργασίες βαφής με βάση λειτουργική μονάδα αναφοράς και προκαθορισμένα όρια συστήματος, για την αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με τις διεργασίες βαφής. Επιπλέον, λαμβάνει χώρα αξιολόγηση των περιβαλλοντικών επιδόσεων των τριών συνθέσεων υφασμάτων με στόχο τον εντοπισμό των σημαντικότερων διαφορών των εκπομπών ρύπων διοξειδίου του άνθρακα που σχετίζονται με κάθε διεργασία βαφής.

Στην παρούσα μελέτη θα ακολουθηθεί προσέγγιση gate-to-gate, εστιάζοντας αποκλειστικά στις διεργασίες που πραγματοποιούνται εντός της μονάδας βαφής. Ως σημείο έναρξης του συστήματος ορίζεται η παραλαβή του υφάσματος προς επεξεργασία, ενώ ως σημείο λήξης η παραγωγή του τελικού βαμμένου υφάσματος. Η μελέτη περιλαμβάνει τις εισροές νερού, ενέργειας, χρωστικών και χημικών ουσιών καθώς και τις αντίστοιχες εκροές, όπως τα απόβλητα και τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνδέονται με την κατανάλωση πόρων κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Η παραγωγή των ινών βαμβακιού και πολυεστέρα, η ύφανση ή η πλέξη του υφάσματος, οι μεταφορές, η χρήση του προϊόντος από τον καταναλωτή και η διαχείριση στο τέλος του κύκλου ζωής του, δεν περιλαμβάνονται στα όρια του συστήματος.

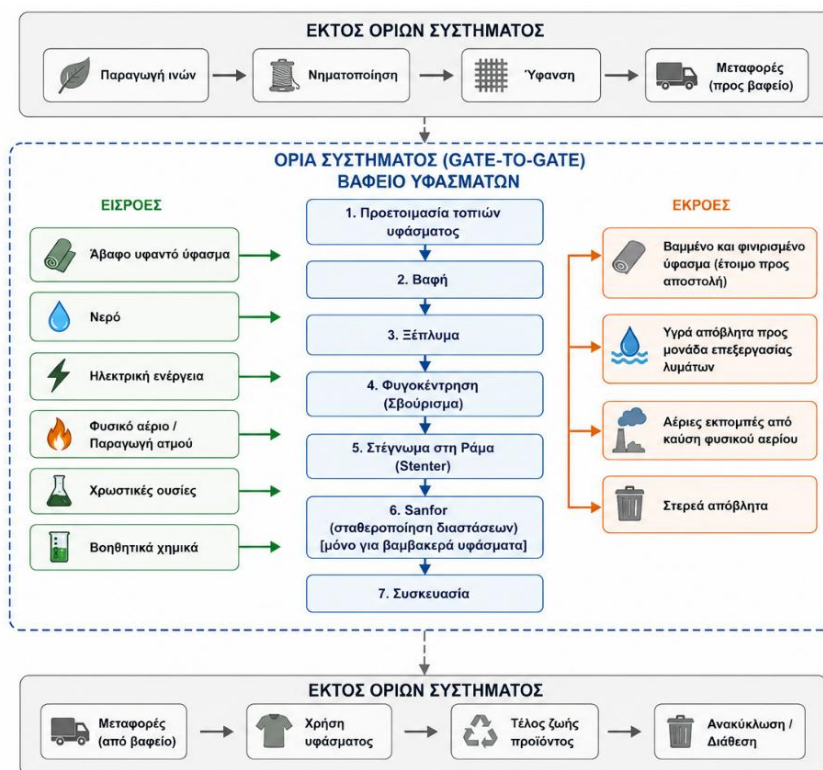
4.2 Περιγραφή του συστήματος και καταγραφή στοιχείων

Σύμφωνα με τις απαιτήσεις των προτύπων ISO 14040 και ISO 14044, η λειτουργική μονάδα (Functional Unit – FU) αποτελεί τη μονάδα αναφοράς στην οποία βασίζονται όλοι οι υπολογισμοί της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και επιτρέπει τη σύγκριση των αποτελεσμάτων μεταξύ διαφορετικών συστημάτων. Στην παρούσα μελέτη, ως λειτουργική μονάδα ορίζεται το 1 kg βαμμένου και φινιρισμένου υφαντού υφάσματος. Η επιλογή της συγκεκριμένης λειτουργικής μονάδας κρίθηκε κατάλληλη, καθώς εκφράζει

άμεσα το τελικό προϊόν που παράγεται από τη βιομηχανική διεργασία και επιτρέπει την ομοιόμορφη ποσοτικοποίηση όλων των εισροών και εκροών του συστήματος. Επιπλέον, η χρήση μονάδας μάζας διευκολύνει τη σύγκριση μεταξύ των βαμβακερών και πολυεστερικών υφασμάτων, δεδομένου ότι οι καταναλώσεις νερού, ενέργειας και χημικών ουσιών καταγράφονται και εκφράζονται συνήθως ανά μονάδα βάρους προϊόντος. Όλες οι εισροές του συστήματος καθώς και οι αντίστοιχες εκροές, θα αναχθούν στη λειτουργική μονάδα του 1 kg βαμμένου και φινιρισμένου υφαντού υφάσματος, προκειμένου να εξασφαλιστεί η συνέπεια και η αξιοπιστία της συγκριτικής αξιολόγησης.

Στην παρούσα μελέτη τα όρια του συστήματος τα οποία υιοθετούνται αφορούν τη μέθοδο «από στάδιο σε στάδιο» (gate-to-gate), εστιάζοντας αποκλειστικά στο στάδιο της βαφής και του φινιρίσματος του υφάσματος εντός της εγκατάστασης του βαφείου. Ως σημεία εισόδου του συστήματος ορίζεται η άφιξη του άβαφου υφαντού υφάσματος στο βαφείο και ως σημείο εξόδου το βαμμένο, φινιρισμένο και συσκευασμένο ύφασμα, έτοιμο προς αποστολή. Οι ενδιάμεσες διαδικασίες (unit processes) οι οποίες μεσολαβούν στα σημεία εισόδου και εξόδου και περιλαμβάνονται εντός των ορίων είναι: η προετοιμασία των τοπιών υφάσματος, η βαφή, το ξέπλυμα, η αφαίρεση υγρασίας με φυγοκέντρηση (ή αλλιώς σβούρισμα), το στέγνωμα στη ράμα (stenter machine), η σταθεροποίηση των διαστάσεων που γίνεται στα βαμβακερά υφάσματα (sanfor), και τέλος η συσκευασία. Εντός των ορίων του συστήματος λαμβάνονται υπόψη ως εισροές η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας, η θερμική ενέργεια από τη χρήση φυσικού αερίου (για παραγωγή ατμού, θέρμανση λουτρών, κ.α.), οι χρωστικές ουσίες και τα βοηθητικά χημικά της διεργασίας, καθώς και το νερό. Ως εκροές καταγράφονται το βαμμένο ύφασμα, τα υγρά απόβλητα που οδηγούνται στη μονάδα επεξεργασίας λυμάτων, οι αέριες εκπομπές από την καύση του φυσικού αερίου και τα στερεά απόβλητα. Εκτός των ορίων του συστήματος, παραμένουν όλα τα στάδια του κύκλου ζωής των υφασμάτων, όπως η παραγωγή της πρώτης ύλης, η νηματοποίηση και η ύφανση του υφάσματος, οι μεταφορές από και προς το κάθε στάδιο, η χρήση του υφάσματος και το τέλος ζωής του, καθώς το αντικείμενο της μελέτης περιορίζεται στο στάδιο της βαφής. Δεν συμπεριλαμβάνονται επίσης τα κεφαλαιουχικά αγαθά και οι υποδομές (μηχανήματα, κτήρια), οι μεταφορές των πρώτων υλών προς τη μονάδα, καθώς και η κατανάλωση ενέργειας και χημικών της ίδιας της μονάδας επεξεργασίας λυμάτων, για τα οποία δεν υπήρξαν διαθέσιμα ποσοτικά δεδομένα. Ως προς τα αποτελέσματα και την εκτίμηση των επιπτώσεων, η ανάλυση περιορίζεται στην κατηγορία της κλιματικής αλλαγής, δηλαδή στο αποτύπωμα του άνθρακα (Global Warming Potentional), εκφρασμένο σε ισοδύναμα διοξειδίου του άνθρακα (kg CO₂e), ανά λειτουργική μονάδα. Η χρονική και γεωγραφική

αναφορά της μελέτης αφορά τη λειτουργία του βαφείου κατά το έτος 2025, με χρήση εθνικών συντελεστών εκπομπών για το ελληνικό ενεργειακό μείγμα και τα καύσιμα. Τα όρια του συστήματος και οι θεωρούμενες ροές αποτυπώνονται σχηματικά παρακάτω.



Σχήμα 8: Τα όρια του συστήματος (Πηγή: Ιδία επεξεργασία)

Τα στοιχεία που αναφέρονται στην παρούσα εργασία και αφορούν τη βαφή και το φινίρισμα των υφασμάτων έχουν συλλεχθεί από το βαφείο στην Ελλάδα το οποίο έχει τις εγκαταστάσεις του στο νομό Βοιωτίας. Επιπροσθέτως, βοηθητικά στοιχεία που αφορούν πληροφορίες για τις παρτίδες και τον ποιοτικό τους έλεγχο έχουν συλλεχθεί από εταιρεία που κάνει εμπόριο υφασμάτων και η οποία έχει τις εγκαταστάσεις της στην Αττική. Τα δεδομένα από το βαφείο συλλέχθηκαν από ερωτηματολόγιο το οποίο στάλθηκε στον υπεύθυνο του βαφείου μέσω email, και ακολούθησε διευκρινιστικό τηλεφώνημα για την επίλυση τυχόν πληροφοριών. Έγινε επιλογή τριών παρτίδων βαφείου, με γνώμονα να εξεταστούν οι κατηγορίες σύνθεσης για 100% βαμβάκι, 100% πολυεστέρα, και 100% ανακυκλωμένο πολυεστέρα. Επιπροσθέτως, επιλέχθηκαν όσο το δυνατόν κοντινές αποχρώσεις (μαύρο και σκούρο μπλε) ώστε να υπάρξει δυνατή σύγκριση.

4.2.1 Βαφή Ανακυκλωμένου Πολυεστέρα

Για τη βαφή υφάσματος από ανακυκλωμένο πολυεστέρα, επιλέχθηκε παρτίδα της ποιότητας 130.BARBIE GRS, υφαντό ύφασμα, με σύνθεση 100% ανακυκλωμένο Post

Consumer πολυεστέρα. Ο αριθμός εντολής βαφής του πελάτη ήταν ENT.Φ.-1000M-03387 και τα μέτρα παραγγελίας 1100. Το βαφείο παρέλαβε από τον πελάτη άβαφο ύφασμα PFD (prepared for dyeing) της ίδιας ποιότητας, και έβαψε την παρτίδα σε χρώμα σκούρο μπλε στις 8 Δεκεμβρίου 2025 με αριθμό παρτίδας βαφής 2019876. Μετά την ολοκλήρωση των διαδικασιών βαφής στον πελάτη παραδόθηκαν 1136 μέτρα τα οποία είχαν χωριστεί σε δύο αποχρωστικές παρτίδες τις 130BARBIE GRS.75B-2534361 & 130BARBIE GRS.75B-2534362, οι οποίες αντιστοιχούσαν σε 274kg. Κατά τον δειγματοληπτικό έλεγχο ποιότητας που έγινε στις εγκαταστάσεις του πελάτη ανάμεσα σε άλλες παραμέτρους που εξετάστηκαν ελέγχθηκαν και το βάρος ανά τετραγωνικό μέτρο, το οποίο βρέθηκε να είναι 157gsm, καθώς και το ολικό πλάτος του υφάσματος το οποίο ήταν 156cm. Τα στάδια που ακολουθήθηκαν στο βαφείο για την τελική μορφή του υφάσματος, περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω:

1) Προετοιμασία του υφάσματος (παρτιδοποίηση) όπου όλα τα τόπια της ποιότητας που έχουν επιλεχθεί ενώνονται με ραφή ώστε να συμπληρωθεί ο αριθμός των μέτρων που απαιτείται.

2) Βαφή του υφάσματος η οποία πραγματοποιήθηκε σε μηχανή βαφής Jet, μέγιστης χωρητικότητας 500kg. Το ποσοστό φόρτωσης της μηχανής ήταν 55%, η βαφή πραγματοποιήθηκε στους 130°C, και η αναλογία του λουτρού ήταν 1:10. Τα χρώματα διασποράς τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη βαφή είναι: 0,085% SERILENE YELLOW 3GL 200%, 0,2% DIANIX RUBINE S-2G 150%, και 1% SETAPERS BLUE T-FBL. Τα χημικά τα οποία προστέθηκαν στη βαφή αναφέρονται παρακάτω: Respumit nf-01 (αντιαφριστικό), κιτρικό οξύ (για τη ρύθμιση του pH), Verolan Nba (συμπλοκοποιητής για να δεσμεύσει τα άλατα σκληρότητας και μεταλλικά ιόντα), Rucogal erx (βοηθά στην ομοιόμορφη βαφή του πολυεστέρα), Perilan vfn (διατηρεί τη σταθερότητα της απόχρωσης).

3) Μετά την ολοκλήρωση του σταδίου της βαφής, ακολουθεί το ξέπλυμα του υφάσματος ώστε να απομακρυνθεί η περίσσεια χρωστικών και χημικών και στη συνέχεια το ύφασμα εξάγεται από τη μηχανή και οδηγείται σε κάδους και στη συνέχεια στη Σβούρα προκειμένου να απομακρυνθεί η περίσσεια υγρασία.

4) Στη συνέχεια το ύφασμα περνάει σε ανοικτό πλάτος από το Foulard (μηχανή εμποτισμού) όπου προστίθενται τα χημικά Softyxon trnp (μαλακτικό), Softycon ash (μαλακτικό σιλικόνης), Peristat cme (αντιστατικό) προκειμένου να αποκτήσει το ύφασμα το επιθυμητό μαλακό φινίρισμα και αντίσταση στη δημιουργία στατικού ηλεκτρισμού.

5) Ακολουθεί το στέγνωμα στη Ράμα (Stenter) όπου το ύφασμα περνάει σε ανοικτό πλάτος με ταχύτητα 8m/min σε θερμοκρασία 140°C προκειμένου να στεγνώσει.

6) Στο τελευταίο στάδιο, το ύφασμα περνάει από μια μηχανή όπου γίνεται ένας τυπικός έλεγχος ποιότητας στο πανί και παράλληλα γίνεται η συσκευασία σε ρολά υφάσματος. Κάθε τόπι συσκευάζεται εξωτερικά με ανακυκλωμένο nylon, και για να κρατάει το ύφασμα στη θέση του χρησιμοποιείται χάρτινο καρούλι βάρους 0,35g.

Παρακάτω ακολουθεί πίνακας ο οποίος συνοψίζει όλες τις χρωστικές και όλα τα χημικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την βαφή και το φινίρισμα του πανιού.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΧΡΗΣΗ
Βαφή διασποράς (Disperse dyes)	Serilene Yellow 3GL 200%	Κίτρινη χρωστική για τη δημιουργία της τελικής απόχρωσης.
Βαφή διασποράς (Disperse dyes)	Dianix Rubine S-2G 150%	Ερυθρή χρωστική για τη ρύθμιση της τελικής απόχρωσης.
Βαφή διασποράς (Disperse dyes)	Setapers Blue T-FBL	Μπλε χρωστική που αποτελεί τη βασική συνιστώσα της απόχρωσης.
Βοηθητικά βαφής	Respumit NF-01	Αντιαφριστικό. Περιορίζει τον σχηματισμό αφρού κατά τη βαφή.
Βοηθητικά βαφής	Κιτρικό Οξύ	Ρυθμιστής pH του λουτρού βαφής
Βοηθητικά βαφής	Verolan NBA	Συμπλοκοποιητής. Δεσμεύει τα μεταλλικά ιόντα του νερού και βελτιώνει τη σταθερότητα του λουτρού
Βοηθητικά βαφής	Rucogal ERX	Ισοσταθμιστικό. Βοηθάει στην εξάντληση και κατανομή της χρωστικής στην ίνα.
Βοηθητικά βαφής	Perilan VFN	Διατηρεί τη σταθερότητα της απόχρωσης
Χημικά φινιρίσματος	Softycon TRNP	Μαλακτικό φινιρίσματος που βελτιώνει την αφή και το πέσιμο του υφάσματος
Χημικά φινιρίσματος	Softycon ASH	Υδρόφιλο μαλακτικό σιλικόνης που προσδίδει απαλή αφή.
Χημικά φινιρίσματος	Peristat CME	Μειώνει τη δημιουργία στατικού ηλεκτρισμού.

Πίνακας 2: Χημικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαφή υφάσματος από ανακυκλωμένο πολυεστέρα

4.2.1 Βαφή Πολυεστέρα

Για τη βαφή υφάσματος από πολυεστέρα, επιλέχθηκε παρτίδα της ποιότητας 130DELICE, υφαντό ύφασμα, με σύνθεση 100% Πολυεστέρα. Ο αριθμός εντολής βαφής

του πελάτη ήταν ENT.Φ.-1000M-02781 και τα μέτρα παραγγελίας 700. Το βαφείο παρέλαβε από τον πελάτη άβαφο ύφασμα PFD (prepared for dyeing) της ίδιας ποιότητας, και έβαψε την παρτίδα σε χρώμα μαύρο στις 2 Οκτωβρίου 2025 με αριθμό παρτίδας βαφής 2019046. Μετά την ολοκλήρωση των διαδικασιών βαφής στον πελάτη παραδόθηκαν 737 μέτρα με παρτίδα 130DELICE0.899-2527661, τα οποία αντιστοιχούσαν σε 109 kg. Κατά τον δειγματοληπτικό έλεγχο ποιότητας που έγινε στις εγκαταστάσεις του πελάτη ανάμεσα σε άλλες παραμέτρους που εξετάστηκαν ελέγχθηκαν και το βάρος ανά τετραγωνικό μέτρο το οποίο βρέθηκε να είναι 109gsm, καθώς και το ολικό πλάτος του υφάσματος το οποίο ήταν 149cm. Τα στάδια που ακολουθήθηκαν στο βαφείο για την τελική μορφή του υφάσματος περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω:

1) Προετοιμασία του υφάσματος (παρτιδοποίηση) όπου όλα τα τόπια της ποιότητας που έχουν επιλεχθεί ενώνονται με ραφή ώστε να συμπληρωθεί ο αριθμός των μέτρων που απαιτείται.

2) Βαφή του υφάσματος η οποία πραγματοποιήθηκε σε μηχανή βαφής Jet, μέγιστης χωρητικότητας 360kg. Το ποσοστό φόρτωσης της μηχανής ήταν 30%, η βαφή πραγματοποιήθηκε στους 130°C, και η αναλογία του λουτρού ήταν 1:12. Το χρώμα διασποράς το οποίο χρησιμοποιήθηκε για τη βαφή είναι 6% SERILENE BLACK ECO. Τα χημικά τα οποία προστέθηκαν στη βαφή αναφέρονται παρακάτω: Respunit nf-01 (αντιαφριστικό), κιτρικό οξύ (για τη ρύθμιση του pH), Verolan Nba (συμπλοκοποιητής για να δεσμεύσει άλατα σκληρότητας και μεταλλικά ιόντα), Rucogal ex (βοηθά στην ομοιόμορφη βαφή του πολυεστέρα), Perilan vfn (διατηρεί τη σταθερότητα της απόχρωσης). Μετά την ολοκλήρωση του σταδίου της βαφής, ακολουθήθηκαν τα ίδια ακριβώς βήματα όπως και παραπάνω στον ανακυκλωμένο πολυεστέρα, μέχρι και τη συσκευασία του σε ρολά υφάσματος (στάδια 3 έως 6).

Παρακάτω ακολουθεί πίνακας ο οποίος συνοψίζει όλα τα χημικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την βαφή και το φινίρισμα του πανιού.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΧΡΗΣΗ
Βαφή διασποράς (Disperse dyes)	Serilene Black Eco	Μαύρη χρωστική για τη δημιουργία της τελικής απόχρωσης.
Βοηθητικά βαφής	Respunit NF-01	Αντιαφριστικό. Περιορίζει τον σχηματισμό αφρού κατά τη βαφή.
Βοηθητικά βαφής	Κιτρικό Οξύ	Ρυθμιστής pH του λουτρού βαφής
Βοηθητικά βαφής	Verolan NBA	Συμπλοκοποιητής. Δεσμεύει τα μεταλλικά ιόντα του νερού και

		βελτιώνει τη σταθερότητα του λουτρού
Βοηθητικά βαφής	Rucogal ERX	Ισοσταθμιστικό. Βοηθάει στην εξάντληση και κατανομή της χρωστικής στην ίνα.
Βοηθητικά βαφής	Perilan VFN	Διατηρεί τη σταθερότητα της απόχρωσης
Χημικά φινιρίσματος	Softycon TRNP	Μαλακτικό φινιρίσματος που βελτιώνει την αφή και το πέσιμο του υφάσματος
Χημικά φινιρίσματος	Softycon ASH	Υδρόφιλο μαλακτικό σιλικόνης που προσδίδει απαλή αφή.
Χημικά φινιρίσματος	Peristat CME	Μειώνει τη δημιουργία στατικού ηλεκτρισμού.

Πίνακας 3: Χημικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαφή υφάσματος από πολυεστέρα

4.2.3 Βαφή Βαμβακιού

Για την βαφή βαμβακερού υφάσματος, επιλέχτηκε παρτίδα της ποιότητας 100GUESS, υφαντό ύφασμα, με σύνθεση 100% βαμβάκι. Ο αριθμός εντολής βαφής του πελάτη ήταν ENT.Φ-1000M-02866 και τα μέτρα παραγγελίας 1000. Το βαφείο παρέλαβε από τον πελάτη ύφασμα σε χρώμα 780 & 781 (royal blue) της ίδιας ποιότητας προκειμένου να τα μεταβάψει, και έβαψε την παρτίδα σε χρώμα σκούρο μπλε στις 13 Οκτωβρίου 2025 με αριθμό παρτίδας βαφής 2019222. Μετά την ολοκλήρωση των διαδικασιών βαφής στον πελάτη παραδόθηκαν 1068,5 μέτρα τα οποία είχαν χωριστεί σε δύο αποχρωστικές παρτίδες τις 100GUESS00.899-2529061 & 100GUESS00.899-2529062, και αντιστοιχούσαν σε 192kg. Κατά τον δειγματοληπτικό έλεγχο ποιότητας που έγινε στις εγκαταστάσεις του πελάτη ανάμεσα σε άλλες παραμέτρους που εξετάστηκαν, ελέγχθηκαν και το βάρος ανά τετραγωνικό μέτρο το οποίο βρέθηκε να είναι 117gsm, καθώς και το ολικό πλάτος του υφάσματος το οποίο ήταν 149cm. Τα στάδια που ακολουθήθηκαν στο βαφείο για την τελική μορφή του υφάσματος περιγράφονται αναλυτικά παρακάτω:

- 1) Προετοιμασία του υφάσματος (παρτιδοποίηση) όπου όλα τα τόπια της ποιότητας που έχουν επιλεχθεί ενώνονται με ραφή ώστε να συμπληρωθεί ο αριθμός των μέτρων που απαιτείται.
- 2) Πλύσιμο του υφάσματος ώστε να απομακρυνθούν τυχόν προσμίξεις που υπάρχουν στην επιφάνειά του.

3) Βαφή του υφάσματος η οποία πραγματοποιήθηκε σε μηχανή βαφής Jigger. Η βαφή πραγματοποιήθηκε στους 60°C, και η αναλογία του λουτρού ήταν 1:3. Τα χρώματα αντιδράσεως τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για τη βαφή είναι: 8% REMAZOL BLACK SAM, 1%EVERZOL NAVY ED & 0,3% EVERZOL ORANGE ED-4R. Τα χημικά τα οποία προστέθηκαν στη βαφή αναφέρονται παρακάτω: ανθρακικό νάτριο Na_2CO_3 (για την ενεργοποίηση της στερέωσης του χρώματος στην κυτταρίνη), καυστική σόδα NaOH (ώστε να αυξηθεί το pH και να ενεργοποιηθεί η αντίδραση της χρωστικής με τις βαμβακερές ίνες) και θειικό νάτριο Na_2SO_4 (για την εξάντληση της βαφής από το λουτρό προς το ύφασμα).

4) Μετά την ολοκλήρωση του σταδίου της βαφής, το ύφασμα περνάει βρεγμένο σε ανοικτό πλάτος από το Foulard (μηχανή εμποτισμού) όπου προστίθενται τα χημικά Softycon tnr (μαλακτικό), Softycon ash (μαλακτικό σιλικόνης), προκειμένου να αποκτήσει το ύφασμα το επιθυμητό μαλακό φινίρισμα και ταυτόχρονα απομακρύνεται και περίσσεια υγρασία από τους κυλίνδρους σύνθλιψης.

5) Ακολουθεί το στέγνωμα στη Ράμα (stenter), όπου το ύφασμα περνάει σε ανοικτό πλάτος με ταχύτητα 14m/min σε θερμοκρασία 150°C προκειμένου να στεγνώσει.

6) Το επόμενο στάδιο είναι να περάσει το ύφασμα από το μηχάνημα Sanfor ώστε να μειωθεί η συρρίκνωση (μπάσιμο) μέσω μηχανικής συμπίεσης στο ύφασμα ώστε στο μελλοντικό πλύσιμο που θα γίνει από τον καταναλωτή να μην υπάρξει αλλαγή στις διαστάσεις.

7) Στο τελευταίο στάδιο, το ύφασμα περνάει από μια μηχανή όπου γίνεται ένας τυπικός έλεγχος ποιότητας στο πανί και παράλληλα γίνεται η συσκευασία σε ρολά υφάσματος. Κάθε τόπι συσκευάζεται εξωτερικά με ανακυκλωμένο nylon, και για να κρατάει το ύφασμα στη θέση του χρησιμοποιείται χάρτινο καρούλι βάρους 0,35g.

Παρακάτω ακολουθεί πίνακας ο οποίος συνοψίζει όλα τα χημικά τα οποία χρησιμοποιήθηκαν για την βαφή και το φινίρισμα του πανιού.

ΚΑΤΗΓΟΡΙΑ	ΕΜΠΟΡΙΚΗ ΟΝΟΜΑΣΙΑ	ΧΡΗΣΗ
Βαφή Αντιδράσεως (Reactive dyes)	Remazol Black SAM	Μαύρη χρωστική για τη δημιουργία της τελικής απόχρωσης.
Βαφή Αντιδράσεως (Reactive dyes)	Everzol Navy ED	Μπλε χρωστική για τη ρύθμιση του χρωματικού τόνου και του βάθους της απόχρωσης.

Βαφή Αντιδράσεως (Reactive dyes)	Everzol Orange ED-4R	Πορτοκαλί αντιδραστική χρωστική που χρησιμοποιείται για τη ρύθμιση της τελικής απόχρωσης.
Βοηθητικά βαφής	Ανθρακικό νάτριο (Na_2CO_3)	Ρυθμίζει το pH του λουτρού και ενεργοποιεί τη στερέωση των χρωστικών στην κυτταρινική ίνα.
Βοηθητικά βαφής	Καυστική σόδα (NaOH)	Αυξάνει την αλκαλικότητα του λουτρού και προάγει τη χημική αντίδραση μεταξύ της χρωστικής και της κυτταρίνης.
Βοηθητικά βαφής	Θειικό νάτριο (Na_2SO_4)	Λειτουργεί ως ηλεκτρολύτης, αυξάνοντας την εξάντληση των χρωστικών από το λουτρό προς την ίνα.
Χημικά φινιρίσματος	Softycon TRNP	Μαλακτικό φινιρίσματος που βελτιώνει την αφή και το πέσιμο του υφάσματος
Χημικά φινιρίσματος	Softycon ASH	Υδρόφιλο μαλακτικό σιλικόνης που προσδίδει απαλή αφή.

Πίνακας 4: Χημικά που χρησιμοποιήθηκαν για τη βαφή υφάσματος από βαμβάκι

4.2.4 Λοιπά στοιχεία για το βαφείο

Κάποια βασικά στοιχεία τα οποία πρέπει να αναφερθούν αφορούν το μέγεθος του βαφείου. Το βαφείο διαθέτει συνολικά σε λειτουργία δεκατέσσερις (14) βαφικές μηχανές. Από αυτές τρεις (3) είναι ατμοσφαιρικά Jigger, μία (1) πιέσεως Jigger (HT Jigger), μία (1) μηχανή βαφής Μπόμπα (Beam), δύο (2) μηχανές Jet Overflow με μακρύ σωλήνα και επτά (7) μηχανές Jet Overflow κυκλικές. Ο αριθμός των μηχανών οι οποίες λειτουργούν κάθε μέρα δεν είναι σταθερός καθώς αλλάζει αναλόγως του φόρτου εργασίας του βαφείου. Η εγκατάσταση λειτουργεί πέντε (5) μέρες την εβδομάδα και σε δύο (2) βάρδιες. Εκτός από το κυρίως στάδιο της βαφής, υπάρχουν διάφορες διεργασίες οι οποίες λαμβάνουν χώρα στις εγκαταστάσεις του βαφείου και σχετίζονται με τη βαφή. Αφορούν την κατανάλωση του νερού, της ενέργειας, τα απόβλητα τα οποία προκύπτουν από τις διαδικασίες κ.α.. Όλα τα στοιχεία που συλλέγει το βαφείο από τα παραπάνω αφορούν τη συνολική λειτουργία του βαφείου, καθώς δεν υπάρχουν μετρητές επάνω στην κάθε μηχανή. Το βαφείο χρησιμοποιεί για τη λειτουργία των μηχανών ηλεκτρική ενέργεια από το δίκτυο και από φωτοβολταϊκά πάνελ τα οποία έχει εγκαταστήσει. Επίσης γίνεται χρήση φυσικού αερίου για τους λέβητες των μηχανημάτων. Όσον αφορά το νερό, γίνεται επαναχρησιμοποίηση του νερού ψύξης των μηχανών βαφής, περιορίζοντας την κατανάλωση φρέσκου νερού, ενώ παράλληλα πραγματοποιείται συλλογή και αξιοποίηση

των όμβριων υδάτων, τα οποία χρησιμοποιούνται για κατάλληλες βιομηχανικές εφαρμογές, μειώνοντας περαιτέρω τη ζήτηση για πόσιμο νερό.

Σημαντικό να αναφερθεί είναι το γεγονός ότι το βαφείο διαθέτει Μονάδα Επεξεργασίας Λυμάτων (Μ.Ε.Λ.), η οποία έχει σχεδιαστεί για την αποτελεσματική επεξεργασία των υγρών αποβλήτων που παράγονται κατά τις διεργασίες βαφής και φινιρίσματος των υφασμάτων, πριν από τη διάθεσή τους στο περιβάλλον. Η επεξεργασία των λυμάτων περιλαμβάνει διαδοχικά στάδια εσχάρωσης, για την απομάκρυνση των χονδρόκοκκων στερεών, στάδιο αερισμού, με σκοπό την οξυγόνωση του αποβλήτου και την υποστήριξη των επόμενων διεργασιών, καθώς και στάδιο βιολογικής επεξεργασίας, κατά το οποίο οι οργανικοί ρύποι αποδομούνται μέσω της δράσης μικροοργανισμών. Στη συνέχεια εφαρμόζεται χημική επεξεργασία, με στόχο την απομάκρυνση αιωρούμενων στερεών, χρωστικών και λοιπών ρύπων μέσω διεργασιών όπως η κροκίδωση και η συσσωμάτωση, ενώ ακολουθεί το στάδιο της καθίζησης, όπου διαχωρίζεται η παραγόμενη ιλύς από το επεξεργασμένο νερό. Τέλος, τα λύματα που εκρέουν, διέρχονται από φίλτρα άμμου και ενεργού άνθρακα, τα οποία εξασφαλίζουν την περαιτέρω απομάκρυνση λεπτόκοκκων σωματιδίων, υπολειμματικών οργανικών ενώσεων και χρωστικών ουσιών, βελτιώνοντας σημαντικά την ποιότητα της τελικής εκροής υπολειμμάτων. Η λειτουργία της Μονάδας Επεξεργασίας Λυμάτων αποτελεί σημαντικό στοιχείο της περιβαλλοντικής διαχείρισης της εγκατάστασης, καθώς συμβάλλει στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων που σχετίζονται με τις υγρές εκροές της παραγωγικής διαδικασίας.

4.3 Εκτίμηση περιβαλλοντικών επιπτώσεων

Τα προαναφερθέντα δεδομένα συλλέχθηκαν μέσω ερωτηματολογίου που συμπληρώθηκε από το συνεργαζόμενο βαφείο, για τρεις αντιπροσωπευτικές παρτίδες βαφής, μία για κάθε κατηγορία σύνθεσης που εξετάζεται. Για κάθε παρτίδα, το βαφείο παρείχε τη συνταγή βαφής με την ακριβή δοσολογία κάθε χρωστικής, εκφρασμένη ως ποσοστό επί του βάρους του υφάσματος (%owf), τα βοηθητικά χημικά για τη βαφή και τα χημικά φινιρίσματος που χρησιμοποιήθηκαν, την αναλογία λουτρού, τη θερμοκρασία βαφής, και τον τύπο της μηχανής βαφής. Επιπλέον, το βαφείο ανέφερε τη συνολική κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου για τον μήνα κατά τον οποίο βάφτηκε κάθε παρτίδα, μαζί με την αντίστοιχη συνολική μηνιαία παραγωγή, καθώς η μέτρηση είναι διαθέσιμη μόνο σε επίπεδο εγκατάστασης και όχι ανά μεμονωμένη μηχανή. Στη συνέχεια, τα δεδομένα οργανώθηκαν και συσχετίστηκαν με τις επιμέρους διεργασίες, ώστε να μπορέσει να καταγραφεί η απογραφή κύκλου ζωής (Life Cycle Inventory – LCI). Με βάση την απογραφή αυτή και χρησιμοποιώντας πρωτογενή δεδομένα του βαφείου, σε συνδυασμό με διαθέσιμους συντελεστές εκπομπών από τη βιβλιογραφία και επίσημες

πηγές, πραγματοποιήθηκε η εκτίμηση των βασικών περιβαλλοντικών δεικτών της διεργασίας για τη λειτουργική μονάδα του 1 kg βαμμένου και φινιρισμένου υφαντού υφάσματος.

Εξαιτίας των περιορισμών οι οποίοι σχετίζονται με τη διαθεσιμότητα πιο αναλυτικών δεδομένων απογραφής κύκλου ζωής και τη μη χρήση εξειδικευμένης βάσης δεδομένων, η παρούσα εκτίμηση δεν αποτελεί πλήρη Ανάλυση Κύκλου Ζωής για όλες τις κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Συγκεκριμένα η ανάλυση επικεντρώνεται κυρίως στην εκτίμηση του αποτυπώματος του άνθρακα των διεργασιών βαφής μέσω του υπολογισμού των εκπομπών ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα που προκύπτουν από την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου. Επίσης, Καταγράφονται συμπληρωματικοί δείκτες όπως η χημική ένταση των χρωστικών και η ποσότητα νερού του αρχικού λουτρού βαφής, χωρίς όμως αυτοί να μετατρέπονται σε δείκτες περιβαλλοντικών επιπτώσεων.

Παρακάτω παρατίθεται συγκεντρωτικός πίνακας με τα στοιχεία που δόθηκαν από το βαφείο και από τον πελάτη, προκειμένου να γίνει η στατιστική επεξεργασία:

	ΠΑΡΤΙΔΑ 1	ΠΑΡΤΙΔΑ 2	ΠΑΡΤΙΔΑ 3
Ποιότητα	130BARBIE GRS	130DELICE	100GUESS
Χρώμα	75B – Σκούρο Μπλε	899 - Μαύρο	899 - Μαύρο
Εντολή Βαφής	ENT.Φ-1000M-03387	ENT.Φ-1000M-02781	ENT.Φ-1000M-02866
Παρτίδα παραλαβής έτοιμου προϊόντος	130BARBIE GRS.75B-2534361 130BARBIE GRS.75B-2534362	130DELICE0.899- 2527661	100GUESS00.899- 2529061 100GUESS00.899- 2529062
Παρτίδα Βαφείου	2019876	2019046	2019222
Ημερομηνία Παραγωγής	8/12/2025	2/10/2025	13/10/2025
Μέτρα παραλαβής (m)	1136,0	737,0	1068,5
Σύνθεση Υφάσματος	100% Ανακυκλωμένος Πολυεστέρας	100% Πολυεστέρας	100% Βαμβάκι
Κατασκευή Υφάσματος	Υφαντό	Υφαντό	Υφαντό
Βάρος (gsm)	157	109	117
Πλάτος (cm)	156	149	149
Βάση Υφάσματος	Άβαφο (pfd)	Άβαφο (pfd)	780, 781 royal blue
Μηχανή βαφής	Jet	Jet	Jigger

Αναλογία λουτρού	1:10	1:12	1:3
Θερμοκρασία βαφής	130°C	130°C	60°C
Ράμα	140°C, 8 m/min	140°C, 8 m/min	150°C, 14 m/min
Ηλεκτρική ενέργεια μήνα MWh	60,96	80,76	80,76
Φυσικό αέριο μήνα MWh	383,16	606,37	606,37
Παραγωγή μήνα kg	37.029,00	49.587,50	49.587,50

Πίνακας 5: Στοιχεία Παρτίδων

4.3.1 Ενέργεια και εκπομπές ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα (CO₂e)

Προκειμένου τα διαθέσιμα πρωτογενή δεδομένα του βαφείου να μετατραπούν σε συγκρίσιμους περιβαλλοντικούς δείκτες υπήρξε η ανάγκη να χρησιμοποιηθούν συγκεκριμένες παραδοχές και συντελεστές. Για τον υπολογισμό των εκπομπών από την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής εκπομπών 0,239 kg CO₂e/kWh, ο οποίος αντιστοιχεί στη μέση ένταση εκπομπών της ηλεκτρικής ενέργειας στην Ελλάδα. (Nowtricity, 2026). Για το φυσικό αέριο χρησιμοποιήθηκε ο συντελεστής εκπομπών 0,201 kg CO₂e/kWh, σύμφωνα με τους συντελεστές υπολογισμού του ΥΠΕΝ για το έτος 2025 (Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας, 2026). Ο συντελεστής αυτός προκύπτει από τις εκπομπές CO₂, CH₄ και N₂O που σχετίζονται με την καύση φυσικού αερίου σε σταθερές πηγές, εκφρασμένες ως ισοδύναμο διοξειδίου του άνθρακα. Οι συντελεστές αυτοί εφαρμόστηκαν στις αντίστοιχες καταναλώσεις ενέργειας ανά kg υφάσματος, ώστε να υπολογιστούν οι εκπομπές ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα ανά λειτουργική μονάδα. Επιπλέον, για την εκτίμηση της κατανάλωσης νερού χρησιμοποιήθηκε ο λόγος λουτρού κάθε διεργασίας βαφής. Ο λόγος λουτρού εκφράστηκε σε L/kg υφάσματος και χρησιμοποιήθηκε αποκλειστικά για την εκτίμηση της ποσότητας νερού του αρχικού λουτρού βαφής. Τέλος, για την απογραφή των χρωστικών χρησιμοποιήθηκαν οι συνταγές βαφής του βαφείου, οι οποίες εκφράζονται σε ποσοστό % owf. Θεωρήθηκε ότι 1% owf αντιστοιχεί σε 10g χρωστικής ανά kg υφάσματος, επιτρέποντας τον υπολογισμό της χημικής έντασης των χρωστικών για κάθε εξεταζόμενη παρτίδα.

Παράμετρος	Τιμή	Μονάδα	Χρήση
ΕΦ ηλεκτρικής ενέργειας Ελλάδας	0,239	kg CO ₂ e/kWh	Υπολογισμός εκπομπών από ηλεκτρική ενέργεια
ΕΦ φυσικού αερίου	0,201004	kg CO ₂ e/kWh	Υπολογισμός εκπομπών από καύση φυσικού αερίου
Λόγος λουτρού	1:x	L/kg	Εκτίμηση αρχικού λουτρού βαφής
Συνταγή χρωστικών	% owf	g/kg	Υπολογισμός χημικής έντασης χρωστικών

Πίνακας 6: Παραδοχές Υπολογισμών

Λαμβάνοντας υπόψη τον παραπάνω πίνακα των παραδοχών, δημιουργείται ο παρακάτω πίνακας υπολογισμών των περιβαλλοντικών δεικτών για την εκτίμηση της ενεργειακής κατανάλωσης, των εκπομπών ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα και της κατανάλωσης νερού του αρχικού λουτρού βαφής. Όλοι οι υπολογισμοί εκφράζονται με βάση τη λειτουργική μονάδα της μελέτης, δηλαδή το 1 kg βαμμένου και φινιρισμένου υφαντού υφάσματος.

Παρτίδα	ΠΑΡΤΙΔΑ 1	ΠΑΡΤΙΔΑ 2	ΠΑΡΤΙΔΑ 3
Σύνθεση	100% Ανακυκλωμένος Πολυεστέρας	100% Πολυεστέρας	100% Βαμβάκι
Βάρος παρτίδας (kg)	274	109	192
Μήνας	Δεκέμβριος 2025	Οκτώβριος 2025	Οκτώβριος 2025
Παραγωγή μήνα (kg)	37029,0	49587,5	49587,5
Ηλ. ενέργεια μήνα (MWh)	60,96	80,76	80,76
Φυσικό αέριο μήνα (MWh)	383,16	606,37	606,37
Ηλ. ενέργεια (kWh/kg)	1,65	1,63	1,63
Φυσικό αέριο (kWh/kg)	10,35	12,23	12,23
CO ₂ e από ρεύμα (kg/kg)	0,39	0,39	0,39
CO ₂ από φυσικό αέριο (kg CO ₂ e /kg)	2,08	2,46	2,46

Σύνολο CO₂e ενέργειας (kg/kg)	2,47	2,85	2,85
CO₂e παρτίδας από ενέργεια (kg)	677,70	310,34	546,66
Νερό αρχικού λουτρού (L/kg)	10	12	3
Νερό αρχικού λουτρού παρτίδας (L)	2740	1308	576

Πίνακας 7: Πίνακας Υπολογισμών LCA

Να σημειωθεί ότι ο ενεργειακός επιμερισμός αποτελεί σημαντικό περιορισμό στη μεθοδολογία της παρούσας μελέτης. Οι καταναλώσεις ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου δεν ήταν διαθέσιμες ανά μηχανή βαφής, ανά στάδιο επεξεργασίας ή ανά παρτίδα, αλλά μόνο ως συνολικές μηνιαίες καταναλώσεις του βαφείου. Συνεπώς, η κατανάλωση ενέργειας ανά kg υφάσματος υπολογίστηκε με βάση τη μέση μηνιαία ενεργειακή ένταση της εγκατάστασης. Η προσέγγιση αυτή επιτρέπει τη μετατροπή των διαθέσιμων δεδομένων σε δείκτες προς σύγκριση, αλλά δεν αποτυπώνει την πραγματική ενεργειακή κατανάλωση κάθε μεμονωμένης παρτίδας. Συνεπώς, οι διαφοροποιήσεις μεταξύ των παρτίδων θα πρέπει να ερμηνευτούν με προσοχή. Παράγοντες όπως ο τύπος της μηχανής, η θερμοκρασία βαφής, ο χρόνος παραμονής, ο λόγος του λουτρού, η απόχρωση, η ποσότητα χρωστικών και ο βαθμός φόρτωσης της μηχανής δεν αποτυπώνονται άμεσα στον υπολογισμό της ενεργειακής κατανάλωσης. Γι αυτό τον λόγο, οι τιμές που προκύπτουν εκφράζουν τη μέση ενεργειακή επιβάρυνση του βαφείου για τον αντίστοιχο μήνα παραγωγής και όχι την απόλυτη μετρημένη κατανάλωση της κάθε παρτίδας.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι οι καταναλώσεις ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου ήταν διαθέσιμες σε μηνιαίο επίπεδο για το σύνολο του βαφείου, και όχι ανά μεμονωμένη μηχανή ή παρτίδα, εφαρμόστηκε επιμερισμός με βάση τη συνολική μηνιαία παραγωγή σε kg υφάσματος. Συγκεκριμένα, η κατανάλωση ενέργειας ανά kg υπολογίστηκε διαιρώντας τη συνολική μηνιαία κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας και φυσικού αερίου με τη συνολική μηνιαία παραγωγή του αντίστοιχου μήνα. Ακολούθως, οι εκπομπές CO₂e υπολογίστηκαν με εφαρμογή των αντίστοιχων συντελεστών εκπομπών στην κατανάλωση ενέργειας ανά kg υφάσματος. Για την ηλεκτρική ενέργεια χρησιμοποιήθηκε συντελεστής 0,239 kg CO₂e/kWh, ενώ για το φυσικό αέριο χρησιμοποιήθηκε συντελεστής 0,201 kg CO₂e/kWh. Οι συνολικές εκπομπές από ενέργεια ανά kg υφάσματος προέκυψαν από το άθροισμα των εκπομπών που σχετίζονται με την

ηλεκτρική ενέργεια και το φυσικό αέριο. Από του υπολογισμούς προκύπτει ότι η παρτίδα ανακυκλωμένου πολυεστέρα εμφάνισε κατανάλωση 1,646 kWh ηλεκτρικής ενέργειας/kg και 10,348 kWh φυσικού αερίου/kg, με συνολικές εκπομπές από ενέργεια 2,473 kg CO₂e/kg υφάσματος. Οι παρτίδες συμβατικού πολυεστέρα και βαμβακιού, επειδή παράχθηκαν τον ίδιο μήνα και επιμερίστηκαν με βάση τα ίδια μηνιαία δεδομένα του βαφείου, παρουσίασαν ίδιες τιμές ενεργειακής έντασης, δηλαδή 1,629 kWh ηλεκτρικής ενέργειας/kg και 12,228 kWh φυσικού αερίου/kg. Οι αντίστοιχες εκπομπές από ενέργεια υπολογίστηκαν σε 2,847 kg CO₂e/kg υφάσματος. Σε επίπεδο του συνόλου της παρτίδας, οι εκπομπές εξαρτώνται από το βάρος της κάθε παρτίδας. Έτσι, η παρτίδα ανακυκλωμένου πολυεστέρα, συνολικού βάρους 274kg, εμφάνισε συνολικές εκπομπές ενέργειας περίπου 677,70kg CO₂e, η παρτίδα συμβατικού πολυεστέρα, βάρους 109kg, περίπου 310,34kg CO₂e, ενώ η βαμβακερή παρτίδα βάρους 192kg, περίπου 546,66kg CO₂e. Για τη συγκριτική αξιολόγηση των παρτίδων, ωστόσο, μεγαλύτερη σημασία έχει ο δείκτης kg CO₂e/kg υφάσματος, καθώς αυτός αναφέρεται στη λειτουργική μονάδα και επιτρέπει σύγκριση μεταξύ παρτίδων διαφορετικού μεγέθους. Στον ίδιο πίνακα υπολογίστηκε επίσης η ποσότητα νερού του αρχικού λουτρού βαφής, με βάση τον λόγο του λουτρού κάθε διεργασίας. Για την παρτίδα ανακυκλωμένου πολυεστέρα, ο λόγος λουτρού 1:10 αντιστοιχεί σε 10 L/kg, για την παρτίδα του συμβατικού πολυεστέρα ο λόγος 1:12 αντιστοιχεί σε 12 L/kg, ενώ για τη βαμβακερή παρτίδα ο λόγος 1:3 αντιστοιχεί σε 3 L/kg. Οι τιμές αυτές αφορούν αποκλειστικά το αρχικό λουτρό βαφής και δεν εκφράζουν ξεπλύματα, καθαρισμό μηχανών ή λοιπές βοηθητικές χρήσεις.

4.3.2 Απογραφή και ποσοτική καταγραφή χρωστικών

Στην παρούσα ενότητα παρουσιάζεται η ποσοτική απογραφή των χρωστικών που χρησιμοποιήθηκαν στις τρεις εξεταζόμενες παρτίδες. Η καταγραφή αυτή δεν αποτελεί πλήρη εκτίμηση περιβαλλοντικής επίπτωσης των χρωστικών, αλλά χρησιμοποιείται ως δείκτης χημικής έντασης των συνταγών βαφής. Η ποσότητα χρωστικής ανά kg υφάσματος επιτρέπει τη σύγκριση των συνταγών ως προς τη δοσολογία. Διαφορετικές χρωστικές μπορεί να παρουσιάζουν διαφορετική χημική σύσταση, διαφορετικό βαθμό εξάντλησης στο λουτρό και διαφορετική συμπεριφορά κατά την επεξεργασία των υγρών αποβλήτων. Για το λόγο αυτό, τα αποτελέσματα της παρούσας ενότητας ερμηνεύονται ως στοιχεία απογραφής και όχι ως δείκτες περιβαλλοντικής επίπτωσης.

Για τις χρωστικές που χρησιμοποιήθηκαν στις βαφές δόθηκαν ως δεδομένα οι δοσολογίες των συνταγών βαφής, οι οποίες εκφράζονται ως ποσοστό επί του βάρους του υφάσματος (%owf). Με βάση τη σχέση ότι 1% owf αντιστοιχεί σε 10g χρωστικής ανά kg υφάσματος, υπολογίστηκε η ποσότητα χρωστικών ανά λειτουργική μονάδα, δηλαδή

ανά 1 kg βαμμένου και φινιρισμένου υφάσματος, καθώς και η συνολική ποσότητα χρωστικών που χρησιμοποιήθηκε σε κάθε παρτίδα.

Παρτίδα	Κατηγορία	Εμπορική ονομασία	Δοσολογία (% owf)	g/kg υφάσματος	kg στην παρτίδα
ΠΑΡΤΙΔΑ 1	Disperse dye	Serilene Yellow 3GL 200%	0,085	0,850	0,233
ΠΑΡΤΙΔΑ 1	Disperse dye	Dianix Rubine S-2G 150%	0,200	2,000	0,548
ΠΑΡΤΙΔΑ 1	Disperse dye	Setapers Blue T-FBL	1,000	10,000	2,740
ΠΑΡΤΙΔΑ 2	Disperse dye	Serilene Black Eco	6,000	60,000	6,540
ΠΑΡΤΙΔΑ 3	Reactive dye	Remazon Black SAM	8,000	80,000	15,360
ΠΑΡΤΙΔΑ 3	Reactive dye	Everzol Navy ED	1,000	10,000	1,920
ΠΑΡΤΙΔΑ 3	Reactive dye	Everzol Orange ED-4R	0,300	3,000	0,576

Πίνακας 8: Υπολογισμοί Χρωστικών

Από τους υπολογισμούς προέκυψε ότι η παρτίδα ανακυκλωμένου πολυεστέρα παρουσίασε τη χαμηλότερη κατανάλωση χρωστικών, με συνολική δοσολογία 1,28% owf, που αντιστοιχεί σε 12,85 g χρωστικών/kg υφάσματος και σε 3,52 kg χρωστικών για το σύνολο της παρτίδας. Η παρτίδα συμβατικού πολυεστέρα, λόγω της μαύρης απόχρωσης, είχε δοσολογία 6% owf, δηλαδή 60g χρωστικής/kg υφάσματος, με συνολική ποσότητα 6,54 kg χρωστικής. Η βαμβακερή παρτίδα παρουσίασε τη μεγαλύτερη χημική ένταση ως προς τις χρωστικές, με συνολική δοσολογία 9,3% owf, που αντιστοιχεί σε 93g χρωστικών/kg υφάσματος και σε 17,86 kg χρωστικών για το σύνολο της παρτίδας.

Παρτίδα	Σύνολο χρωστικών (% owf)	Χρωστικές (g/kg)	Σύνολο kg χρωστικών
ΠΑΡΤΙΔΑ 1	1,28	12,85	3,52
ΠΑΡΤΙΔΑ 2	6,00	60,00	6,54
ΠΑΡΤΙΔΑ 3	9,30	93,00	17,86

Πίνακας 9: Συγκεντρωτικός πίνακας χρωστικών

Οι παραπάνω πίνακες δείχνουν ότι οι συνταγές βαφής διαφοροποιούνται σημαντικά ως προς την ποσότητα των χρωστικών που χρησιμοποιούνται ανά kg υφάσματος. Η Π1 παρουσίασε τη χαμηλότερη χημική ένταση ως προς τις χρωστικές, ενώ η Π3 παρουσίασε τη μεγαλύτερη δοσολογία. Ωστόσο, η υψηλότερη ποσότητα χρωστικής δεν πρέπει να ερμηνευτεί ως μεγαλύτερη περιβαλλοντική επίπτωση. Η πραγματική περιβαλλοντική συμπεριφορά κάθε χρωστικής εξαρτάται από παράγοντες όπως η χημική σύσταση, η τοξικότητα, η ποσότητα που παραμένει στο απόβλητο κ.α.. Συνεπώς, οι ποσότητες των χρωστικών χρησιμοποιούνται ως δείκτης χημικής έντασης και όχι ως δείκτης περιβαλλοντικής επίπτωσης. Επιπλέον, οι διαφορές μεταξύ των παρτίδων σχετίζονται όχι μόνο με τη σύνθεση του υφάσματος, αλλά και με την απόχρωση και τη συνταγή βαφής της κάθε παρτίδας.

Βιβλιογραφία Κεφαλαίου

Nowtricity (2026) CO₂ emissions per kWh in Greece. Ιστοσελίδα:

<https://www.nowtricity.com/country/greece/> (Προσπελάστηκε: 25 Ιουνίου 2026).

Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (2026) Συντελεστές μετατροπής της κατανάλωσης ενέργειας σε ισοδύναμους τόνους CO₂ για το έτος 2025. Ιστοσελίδα:

[https://ypen.gov.gr/wp-](https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/2026/07/%CE%A3%CF%85%CE%BD%CF%84%CE%B5%CE%BB%CE%B5%CF%83%CF%84%CE%AD%CF%82-%CF%85%CF%80%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%B9%CF%83%CE%BC%CE%BF%CF%8D-%CE%B3%CE%B9%CE%B1-%CF%84%CE%BF-%CE%AD%CF%84%CE%BF%CF%82-2025.pdf)

[content/uploads/2026/07/%CE%A3%CF%85%CE%BD%CF%84%CE%B5%CE%BB%CE%B5%CF%83%CF%84%CE%AD%CF%82-](https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/2026/07/%CE%A3%CF%85%CE%BD%CF%84%CE%B5%CE%BB%CE%B5%CF%83%CF%84%CE%AD%CF%82-%CF%85%CF%80%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%B9%CF%83%CE%BC%CE%BF%CF%8D-%CE%B3%CE%B9%CE%B1-%CF%84%CE%BF-%CE%AD%CF%84%CE%BF%CF%82-2025.pdf)

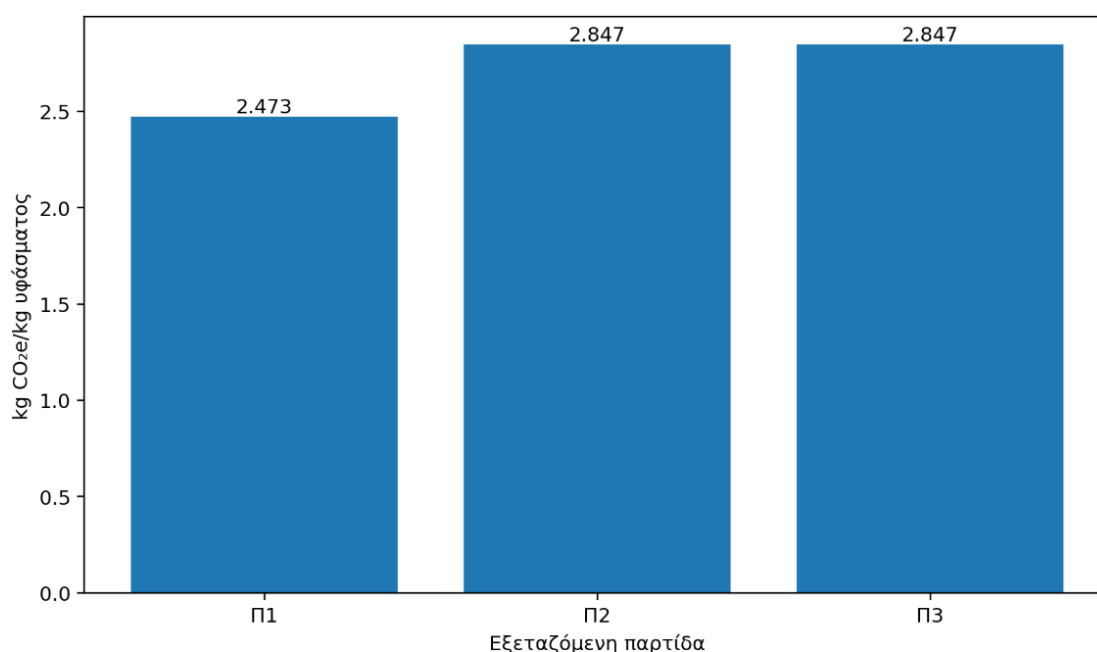
[%CF%85%CF%80%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%B9%CF%83%CE%BC%CE%BF%CF%8D-%CE%B3%CE%B9%CE%B1-%CF%84%CE%BF-](https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/2026/07/%CE%A3%CF%85%CE%BD%CF%84%CE%B5%CE%BB%CE%B5%CF%83%CF%84%CE%AD%CF%82-%CF%85%CF%80%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%B9%CF%83%CE%BC%CE%BF%CF%8D-%CE%B3%CE%B9%CE%B1-%CF%84%CE%BF-%CE%AD%CF%84%CE%BF%CF%82-2025.pdf)

[%CE%AD%CF%84%CE%BF%CF%82-2025.pdf](https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/2026/07/%CE%A3%CF%85%CE%BD%CF%84%CE%B5%CE%BB%CE%B5%CF%83%CF%84%CE%AD%CF%82-%CF%85%CF%80%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%B9%CF%83%CE%BC%CE%BF%CF%8D-%CE%B3%CE%B9%CE%B1-%CF%84%CE%BF-%CE%AD%CF%84%CE%BF%CF%82-2025.pdf) (Προσπελάστηκε: 25 Ιουνίου 2026).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 – ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ - ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

5.1 Αποτελέσματα της μελέτης

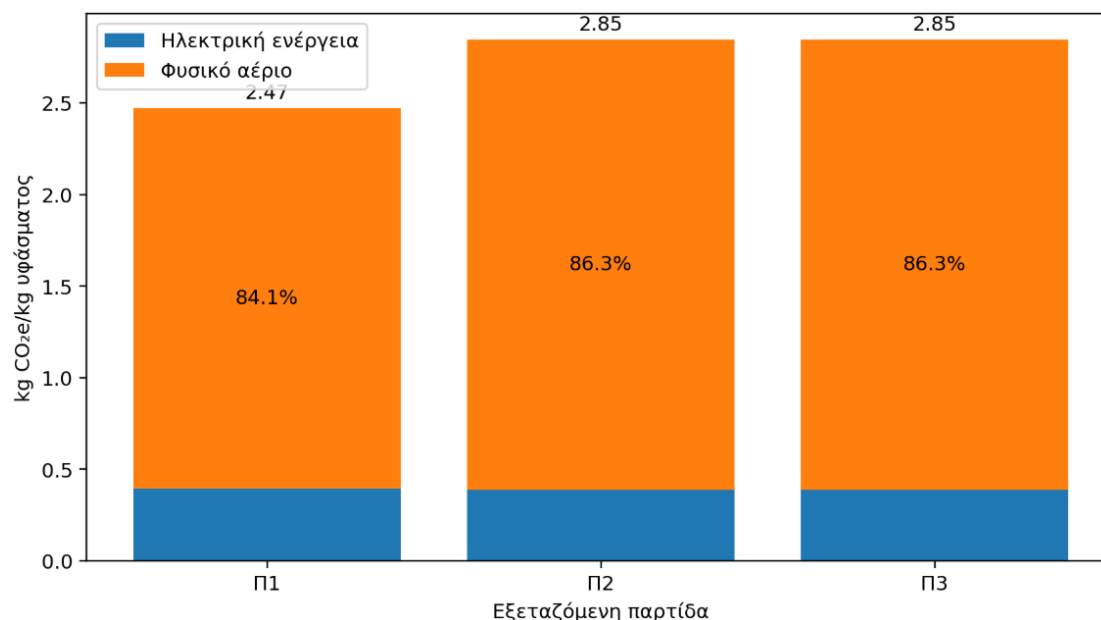
Η εκτίμηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων για τις τρεις εξεταζόμενες παρτίδες πραγματοποιήθηκε με βάση τη λειτουργική μονάδα του 1 kg βαμμένου και φινιρισμένου υφαντού υφάσματος. Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι η παρτίδα ανακυκλωμένου πολυεστέρα (Π1) παρουσίασε συνολικές εκπομπές από ενέργεια 2,47 kg CO₂e/kg υφάσματος, ενώ οι παρτίδες συμβατικού πολυεστέρα (Π2) και βαμβακιού (Π3) παρουσίασαν εκπομπές 2,85 kg CO₂e/kg υφάσματος. Η διαφορά αυτή αποδίδεται κυρίως στα διαφορετικά μηνιαία δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας που χρησιμοποιήθηκαν για τον επιμερισμό, καθώς η Π1 παράχθηκε σε διαφορετικό μήνα από τις άλλες δύο παρτίδες. Ιδιαίτερη προσοχή απαιτείται στην ερμηνεία της σύγκρισης μεταξύ Π2 και Π3, καθώς η ίδια τιμή εκπομπών ανά kg, δεν υποδηλώνει απαραίτητα και όμοια περιβαλλοντική επίδοση των δύο συνθέσεων. Η ταύτιση τιμών προκύπτει από τον επιμερισμό των συνολικών μηνιαίων καταναλώσεων ενέργειας του βαφείου στη συνολική μηνιαία παραγωγή. Επομένως, η συγκεκριμένη ανάλυση δεν επιτρέπει ασφαλή διαφοροποίηση του αποτυπώματος του άνθρακα μεταξύ βαμβακιού και συμβατικού πολυεστέρα σε επίπεδο διεργασίας βαφής.



Σχήμα 9: Εκπομπές CO₂e από ενέργεια ανά kg υφάσματος

Σε όλες τις εξεταζόμενες παρτίδες, η συνιστώσα της ενέργειας αποτέλεσε το σημαντικότερο μέρος του εκτιμώμενου περιβαλλοντικού αποτυπώματος. Ειδικότερα, η θερμική ενέργεια που προέρχεται από την καύση φυσικού αερίου (και η οποία

χρησιμοποιείται για τη θέρμανση των λουτρών βαφής, τα πλυσίματα και το στέγνωμα) αναδείχθηκε ως η κυρίαρχη πηγή εκπομπών. Το εύρημα αυτό δείχνει ότι η θερμική ενέργεια αποτελεί το βασικό περιβαλλοντικό σημείο ενδιαφέροντος της διεργασίας βαφής και του φινιρίσματος, ξεπερνώντας σημαντικά τη συνεισφορά της ηλεκτρικής ενέργειας.



Σχήμα 10: Συνεισφορά ηλεκτρικής και θερμικής ενέργειας στις εκπομπές CO₂e/kg υφάσματος

Πιο συγκεκριμένα, για την Π1 η κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας υπολογίστηκε σε 1,646 kWh/kg, ενώ η κατανάλωση φυσικού αερίου σε 10,348 kWh/kg. Για τις Π2 και Π3, οι αντίστοιχες τιμές ήταν 1,629 kWh/kg ηλεκτρικής ενέργειας και 12,228 kWh/kg φυσικού αερίου. Οι υψηλότερες τιμές φυσικού αερίου εξηγούν και το αυξημένο αποτύπωμα των δύο τελευταίων παρτίδων. Συνεπώς, επιβεβαιώνεται ότι η κατανάλωση θερμικής ενέργειας σχετίζεται άμεσα με τη διαμόρφωση των συνολικών εκπομπών ισοδύναμου διοξειδίου του άνθρακα. Σε επίπεδο συνολικής παρτίδας, οι εκπομπές από ενέργεια ανήλθαν σε 677,70 kg CO₂e για την Π1, 310,34 kg CO₂e για την Π2 και 546,66 kg CO₂e για την Π3. Ωστόσο, οι τιμές αυτές εξαρτώνται από το συνολικό βάρος κάθε παρτίδας και, επομένως, δεν αποτελούν το καταλληλότερο μέγεθος για συγκριτική αξιολόγηση. Για τον λόγο αυτό, μεγαλύτερη σημασία δίνεται στον δείκτη kg CO₂e/kg υφάσματος, ο οποίος αντιστοιχεί στη λειτουργική μονάδα της μελέτης.

Ένα από τα σημαντικότερα ευρήματα της παρούσας μελέτης είναι ότι οι εκπομπές που συνδέονται με τη χρήση φυσικού αερίου υπερβαίνουν σημαντικά τις εκπομπές από την κατανάλωση ηλεκτρικής ενέργειας. Συγκεκριμένα, για την Π1 οι εκπομπές από το φυσικό αέριο αντιστοιχούν περίπου στο 84% των συνολικών εκπομπών CO₂ που σχετίζονται με την ενεργειακή κατανάλωση, ενώ για τις Π2 και Π3 το αντίστοιχο ποσοστό

ανέρχεται περίπου στο 86%. Το εύρημα αυτό δείχνει ότι, εντός των ορίων της παρούσας gate-to-gate εκτίμησης αποτυπώματος άνθρακα, το βασικό σημείο για τη μείωση των εκπομπών δεν είναι κυρίως η ηλεκτρική κατανάλωση αλλά η θερμική ενέργεια που παράγεται από την καύση φυσικού αερίου.

Επίσης, η ποσοτική απογραφή των χρωστικών έδειξε σημαντική διαφοροποίηση μεταξύ των παρτίδων, γεγονός που ενισχύει τη σημασία της απόχρωσης και της συνταγής βαφής. Ωστόσο, οι ποσότητες χρωστικών εκφρασμένες σε g/kg υφάσματος δεν χρησιμοποιούνται ως άμεσος δείκτης περιβαλλοντικής επίπτωσης. Αποτελούν δείκτη χημικής έντασης της βαφής, καθώς η πραγματική περιβαλλοντική επίπτωση εξαρτάται από την χημική συμπεριφορά κάθε χρωστικής. Περισσότερα g/kg χρωστικής δεν συνεπάγονται μεγαλύτερη περιβαλλοντική επίπτωση, αλλά υποδηλώνουν υψηλότερη χημική ένταση της συγκεκριμένης συνταγής βαφής.

5.2 Περιορισμοί της μελέτης

Η συγκεκριμένη μελέτη βασίζεται στη λογική Ανάλυσης Κύκλου Ζωής και ακολουθεί την προσέγγιση gate-to-gate. Ωστόσο, λόγω των περιορισμών των διαθέσιμων δεδομένων και της μη πρόσβασης σε εξειδικευμένη βάση δεδομένων απογραφής κύκλου ζωής, η τελική ποσοτική ανάλυση περιορίστηκε ουσιαστικά σε εκτίμηση αποτυπώματος άνθρακα για τις διεργασίες βαφής και φινιρίσματος. Συνεπώς, η μελέτη επικεντρώνεται στις διεργασίες που λαμβάνουν χώρα εντός συγκεκριμένης μονάδας βαφής υφάσματος. Δεν περιλαμβάνουν τα προηγούμενα στάδια παραγωγής των υφασμάτων ή τα επόμενα στάδια μέχρι το τέλος του κύκλου ζωής του προϊόντος. Ως εκ τούτου, τα αποτελέσματα της έρευνας δεν αντιπροσωπεύουν το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα των υφασμάτων των συγκεκριμένων κατηγοριών που μελετήθηκαν σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους. Κυριότερο περιορισμό της μελέτης αποτελεί η μη διαθεσιμότητα εξειδικευμένης βάσης δεδομένων απογραφής κύκλου ζωής όπως για παράδειγμα η ecoinvent. Γι αυτό το λόγο τα δεδομένα που είχαν συλλεχθεί δεν ήταν δυνατό να μελετηθούν σε εξειδικευμένο λογισμικό για LCA (openLCA) ώστε να γίνει ακριβής υπολογισμός. Βασικές κατηγορίες επιπτώσεων όπως ο ευτροφισμός, η οξίνιση, η οικοτοξικότητα και η εξάντληση πόρων δεν είναι δυνατόν να υπολογιστούν και να μελετηθούν. Ακόμη ένας σημαντικός περιορισμός με μεγάλη βαρύτητα αφορά την διαθεσιμότητα των ενεργειακών δεδομένων καθώς τα στοιχεία τα οποία συλλέχθηκαν από το βαφείο ήταν περιορισμένα. Στην εγκατάσταση του βαφείου δεν υπάρχουν ανεξάρτητοι μετρητές κατανάλωσης φυσικού αερίου και ηλεκτρικής ενέργειας ανά μηχανή ή παρτίδα παραγωγής. Συνεπώς, οι ενεργειακές καταναλώσεις των εξεταζόμενων

παρτίδων εκτιμήθηκαν μέσω επιμερισμού του συνόλου των μηνιαίων καταναλώσεων του βαφείου, βάση της συνολικής ποσότητας υφάσματος που βάφτηκε τον αντίστοιχο μήνα παραγωγής. Η μέθοδος αυτή προϋποθέτει ότι κάθε kg παραγωγής επιβαρύνεται με την ίδια μέση ενεργειακή κατανάλωση, χωρίς να λαμβάνει υπόψη τις διαφορές που υπάρχουν μεταξύ των τριών εξεταζόμενων παρτίδων ως προς τη χρησιμοποιούμενη μηχανή, τη θερμοκρασία, τον χρόνο διεργασίας, τον λόγο του λουτρού, την απόχρωση και τον βαθμό φόρτωσης του εξοπλισμού. Συνεπώς, τα αποτελέσματα είναι κατάλληλα για μια αρχική εκτίμηση αποτυπώματος άνθρακα, αλλά δεν επιτρέπουν ασφαλή σύγκριση της πραγματικής ενεργειακής απόδοσης μεταξύ διαφορετικών ινών, μηχανών ή συνταγών βαφής. Ακόμη ένας περιορισμός που μπορεί να αναφερθεί είναι ότι οι παρτίδες βάφτηκαν σε διαφορετικούς μήνες. Η βαφή της παρτίδας του ανακυκλωμένου πολυεστέρα έγινε τον Δεκέμβριο, ενώ αυτές του συμβατικού πολυεστέρα και αυτή από βαμβάκι τον Οκτώβριο. Επομένως, μέρος της διαφοράς του υπολογισμένου ανθρακικού αποτυπώματος μπορεί να οφείλεται στη διαφορετική συνολική λειτουργία και ενεργειακή απόδοση του βαφείου στους δύο μήνες. Επιπροσθέτως, ως περιορισμός αναφέρεται και το γεγονός ότι για αρκετά βοηθητικά χημικά και φινιριστικά δεν έχει αναφερθεί η ακριβής δοσολογία τους ανά παρτίδα, παρά μόνο η παρουσία τους στη διαδικασία. Ακόμη ένας περιορισμός είναι ότι το νερό που υπολογίζεται από τον λόγο λουτρού δεν είναι η συνολική κατανάλωση νερού για τη βαφή της παρτίδας, αλλά αντιπροσωπεύει μόνο το θεωρητικό αρχικό λουτρό. Δεν συμπεριλαμβάνονται στους υπολογισμούς τα ξεπλύματα, ο καθαρισμός των μηχανών και διαφορετικές άλλες απαραίτητες χρήσεις. Επιπροσθέτως, για τον νερό δεν μπορεί να υπολογιστεί η μείωση της κατανάλωσης φρέσκου νερού που υπάρχει καθώς δεν υπάρχουν δεδομένα για την επαναχρησιμοποίηση του νερού ψύξης και τη συλλογή όμβριων υδάτων που κάνει το βαφείο. Τέλος, το δείγμα της εργασίας είναι μικρό και δεν μπορούν τα αποτελέσματα να γενικευθούν σε ολόκληρη την Κλωστοϋφαντουργία ή σε όλες τις βαφές βαμβακιού και πολυεστέρα.

5.3 Συμπεράσματα

Η παρούσα μελέτη αξιοποιώντας τη λογική της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής, κατέληξε σε ποσοτική εκτίμηση του αποτυπώματος του άνθρακα για το στάδιο της βαφής και φινιρίσματος για τρεις διαφορετικές παρτίδες υφασμάτων. Η εκτίμηση πραγματοποιήθηκε με βάση πρωτογενή βιομηχανικά δεδομένα και εθνικούς συντελεστές εκπομπών, στο πλαίσιο μιας απλοποιημένης προσέγγισης gate-to-gate, λόγω μη διαθεσιμότητας εμπορικής βάσης δεδομένων κύκλου ζωής.

Το κυριότερο συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί είναι ότι ο παράγοντας ο οποίος επηρεάζει περισσότερο το περιβάλλον κατά τη διαδικασία της βαφής είναι η θερμική ενέργεια από το φυσικό αέριο, η οποία κυριαρχεί ανεξαρτήτως σύνθεσης υφάσματος. Το εύρημα αυτό υποδεικνύει ότι οι δράσεις μείωσης εκπομπών θα πρέπει να εστιάσουν πρωτίστως στη διαχείριση της θερμικής ενέργειας (μέσω για παράδειγμα βελτίωσης της απόδοσης των λεβήτων) και δευτερευόντως στη μείωση της ηλεκτρικής κατανάλωσης, όπου η μεγαλύτερη χρήση ενέργειας από τα φωτοβολταϊκά μπορεί να συμβάλει σε ουσιαστικά.

Ως προς τη σύγκριση μεταξύ συμβατικού πολυεστέρα και βαμβακιού, οι δύο παρτίδες παρουσίασαν τις ίδιες εκπομπές ανά λειτουργική μονάδα, δηλαδή 2,85 kg CO₂e/kg υφάσματος. Το αποτέλεσμα δεν υποδηλώνει ότι οι δύο διεργασίες έχουν ταυτόσημη πραγματική ενεργειακή συμπεριφορά, αλλά οφείλεται στη μέθοδο επιμερισμού που εφαρμόστηκε, καθώς και οι δύο παρτίδες παράχθηκαν τον ίδιο μήνα και υπολογίστηκαν με βάση τα ίδια συνολικά μηνιαία δεδομένα κατανάλωσης ενέργειας του βαφείου. Συνεπώς, με βάση τα διαθέσιμα δεδομένα, δεν μπορεί να εξαχθεί ασφαλές συμπέρασμα ότι το βαμβάκι ή ο συμβατικός πολυεστέρας παρουσιάζει υψηλότερο αποτύπωμα άνθρακα στο στάδιο της βαφής. Η διαφοροποίηση των δύο παρτίδων αναδεικνύεται κυρίως στη χημική ένταση των χρωστικών όπου η βαμβακερή παρτίδα εμφανίζει μεγαλύτερη κατανάλωση χρωστικών σε σχέση με την παρτίδα συμβατικού πολυεστέρα.

Σε μεθοδολογικό επίπεδο, η εργασία κατέδειξε ότι είναι εφικτή η πραγματοποίηση μιας τεκμηριωμένης προκαταρκτικής εκτίμησης αποτυπώματος άνθρακα με χρήση πρωτογενών βιομηχανικών δεδομένων και εθνικών συντελεστών εκπομπών, ακόμη και απουσίας πρόσβασης σε εμπορική βάση δεδομένων κύκλου ζωής.

5.3 Προτάσεις για μελλοντική έρευνα

Υπάρχει μεγάλο περιθώριο για μελλοντική έρευνα στον κλάδο της Κλωστοϋφαντουργίας και συγκεκριμένα στον τομέα της Βαφικής. Στην παρούσα μελέτη υπήρξαν αρκετοί περιορισμοί αλλά μελλοντικά με τις κατάλληλες διορθωτικές ενέργειες υπάρχει περιθώριο για πιο ολοκληρωμένη μελέτη. Μερικές από τις προτάσεις για μελλοντική έρευνα απαριθμούνται παρακάτω:

1) Μέτρηση ενέργειας ανά μηχανή. Θα πρέπει να τοποθετηθούν μετρητές ενέργειας ανά βαφική και φινιριστική μηχανή, προκειμένου να είναι εφικτός ο επιμερισμός της ενέργειας

ανά διεργασία και ανά παρτίδα βαφής ούτως ώστε να επιτραπεί η πραγματική διαφοροποίηση του αποτυπώματος μεταξύ πολυεστέρα και βαμβακιού.

2) Ποσοτικοποίηση χημικών και νερού. Θα πρέπει να γίνει ολοκληρωμένη καταγραφή των πραγματικών ποσοτήτων αλατιού, σόδας, καυστικού και βοηθητικών χημικών ανά παρτίδα, καθώς και του συνολικού όγκου νερού (συμπεριλαμβανομένων των ξεπλυμάτων).

3) Έρευνα σε περισσότερες κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Δείκτες όπως η κατανάλωση νερού, ο ευτροφισμός, η υδάτινη τοξικότητα και η οξίνιση είναι ιδιαίτερα σημαντικοί για τον περιβαλλοντικό αντίκτυπο που έχει η βαφή υφασμάτων και πρέπει να αναφέρονται σε μελέτες Ανάλυσης Κύκλου Ζωής.

4) Επέκταση των ορίων σε cradle-to-gate. Για μια πιο ολοκληρωμένη παρουσίαση μιας μελέτης LCA στον κλάδο της Κλωστοϋφαντουργίας θα πρέπει να γίνει συμπερίληψη των προηγούμενων σταδίων (παραγωγή ίνας, νηματοποίηση, ύφανση κ.α.), ώστε να αποτυπωθεί το πραγματικό περιβαλλοντικό πλεονέκτημα του ανακυκλωμένου έναντι του παρθένου πολυεστέρα, το οποίο στην παρούσα μελέτη δεν ερευνάται.

5) Αναλυτική μελέτη της θερμικής ενέργειας. Λαμβάνονται υπόψη ότι το φυσικό αέριο αναδείχθηκε ως η κύρια πηγή εκπομπών CO₂e, μελλοντική έρευνα θα μπορούσε να εστιάσει ειδικά στη θερμική κατανάλωση των βαφικών και φινιριστικών διεργασιών. Η εγκατάσταση μετρητών φυσικού αερίου ή ατμού ανά μηχανή, η καταγραφή των θερμικών απωλειών και η αξιολόγηση σεναρίων ανάκτησης θερμότητας θα οδηγούσαν σε εκτίμηση των δυνατοτήτων μείωσης του ανθρακικού αποτυπώματος με περισσότερη ακρίβεια.

BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Abagnato, S., Rigamonti, L., Grosso, M., 2024. Life cycle assessment applications to reuse, recycling and circular practices for textiles: A review. *Waste Manag.* 182, 74–90. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.04.016>
- Adviento-Borbe, M.A.A., Barnes, B.D., Iseyemi, O., Mann, A.M., Reba, M.L., Robertson, W.J., Massey, J.H., Teague, T.G., 2018. Water quality of surface runoff and lint yield in cotton under furrow irrigation in Northeast Arkansas. *Sci. Total Environ.* 613–614, 81–87. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.020>
- Aizenshtein, E.M., 2016. Bottle Wastes – to Textile Yarns. *Fibre Chem.* 47, 343–347. <https://doi.org/10.1007/s10692-016-9691-8>
- Andersson, K., Ohlsson, T., Olsson, P., 1998. Screening life cycle assessment (LCA) of tomato ketchup: a case study. *J. Clean. Prod.* 6, 277–288. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(98\)00027-4](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(98)00027-4)
- Ansari, A.A., Singh Gill, S., Lanza, G.R., Rast, W. (Eds.), 2011. *Eutrophication: causes, consequences and control*. Springer Netherlands, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-9625-8>
- Arivithamani, N., Giri Dev, V.R., 2017. Sustainable bulk scale cationization of cotton hosiery fabrics for salt-free reactive dyeing process. *J. Clean. Prod.* 149, 1188–1199. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.02.162>
- Barbhuiya, S., Das, B.B., 2023. Life Cycle Assessment of construction materials: Methodologies, applications and future directions for sustainable decision-making. *Case Stud. Constr. Mater.* 19, e02326. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02326>
- Baydar, G., Ciliz, N., Mammadov, A., 2015. Life cycle assessment of cotton textile products in Turkey. *Resour. Conserv. Recycl.* 104, 213–223. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.08.007>
- Becker, H.A., 2001. Social impact assessment. *Eur. J. Oper. Res.* 128, 311–321. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(00\)00074-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(00)00074-6)
- Bianco, I., Gerboni, R., Picerno, G., Blengini, G.A., 2022. Life Cycle Assessment (LCA) of MWool® Recycled Wool Fibers. *Resources* 11, 41. <https://doi.org/10.3390/resources11050041>
- Chen, Y.-G., He, X.-L.-S., Huang, J.-H., Luo, R., Ge, H.-Z., Wołowicz, A., Wawrzekiewicz, M., Gładysz-Płaska, A., Li, B., Yu, Q.-X., Kołodyńska, D., Lv, G.-Y., Chen, S.-H., 2021. Impacts of heavy metals and medicinal crops on ecological systems, environmental pollution, cultivation, and production processes in China. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 219, 112336. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112336>
- Chequer, F.M.D., Angeli, J.P.F., Ferraz, E.R.A., Tsuboy, M.S., Marcarini, J.C., Mantovani, M.S., De Oliveira, D.P., 2009. The azo dyes Disperse Red 1 and Disperse Orange 1 increase the micronuclei frequencies in human lymphocytes and in HepG2 cells. *Mutat. Res. Toxicol. Environ. Mutagen.* 676, 83–86. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2009.04.004>
- Cinperi, N.C., Ozturk, E., Yigit, N.O., Kitis, M., 2019. Treatment of woolen textile wastewater using membrane bioreactor, nanofiltration and reverse osmosis for reuse in production processes. *J. Clean. Prod.* 223, 837–848. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.166>
- Clark, M. (Ed.), 2011. *Handbook of textile and industrial dyeing*, Woodhead Publishing Series in Textiles. Woodhead Publishing Limited, Oxford ; Philadelphia.
- Cundubey, F.S., Azgin, S.T., 2024. Comparative life cycle assessment of denim manufacturing: Evaluating conventional vs. recycled cotton in the context of

- renewable energy. *J. Clean. Prod.* 434, 140117.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140117>
- Department of Textiles and Apparel Designing, College of Community Science, AAU
 Jorhat, Konwar, M., 2020. Textile Industry and Its Environmental Impacts: A Review.
Indian J. Pure Appl. Biosci. 8, 134–139. <https://doi.org/10.18782/2582-2845.7848>
- Edirisinghe, L.G.L.M., De Alwis, A.A.P., Wijayasundara, M., 2024. Sustainable circular
 practices in the textile product life cycle: A comprehensive approach to
 environmental impact mitigation. *Environ. Chall.* 16, 100985.
<https://doi.org/10.1016/j.envc.2024.100985>
- Ellen MacArthur Foundation, 2017. A new textiles economy: redesigning fashion's future.
- European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and
 Sustainability., 2010. International Reference Life Cycle Data System (ILCD)
 Handbook :general guide for life cycle assessment : detailed guidance.
 Publications Office, LU. <https://doi.org/10.2788/38479>
- Ferrari, A.M., Volpi, L., Settembre-Blundo, D., García-Muiña, F.E., 2021. Dynamic life cycle
 assessment (LCA) integrating life cycle inventory (LCI) and Enterprise resource
 planning (ERP) in an industry 4.0 environment. *J. Clean. Prod.* 286, 125314.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125314>
- Fidan, F.Ş., Aydoğan, E.K., Uzal, N., 2025. Comprehensive analysis of social subcategories
 throughout life cycle assessment approach for the textile industry. *Int. J. Life Cycle
 Assess.* 30, 1464–1479. <https://doi.org/10.1007/s11367-024-02340-8>
- Fidan, F.Ş., Aydoğan, E.K., Uzal, N., 2024. Sustainability assessment of denim fabric made
 of PET fiber and recycled fiber from postconsumer PET bottles using LCA and LCC
 approach with the EDAS method. *Integr. Environ. Assess. Manag.* 20, 2347–2365.
<https://doi.org/10.1002/ieam.4979>
- Fonseca, A., Ramalho, E., Gouveia, A., Henriques, R., Figueiredo, F., Nunes, J., 2023.
 Systematic Insights into a Textile Industry: Reviewing Life Cycle Assessment and
 Eco-Design. *Sustainability* 15, 15267. <https://doi.org/10.3390/su152115267>
- Gong, J., Wang, F., Ren, Y., Li, Z., Zhang, J., Li, Q., 2018. Preparation of biomass pigments
 and dyeing based on bioconversion. *J. Clean. Prod.* 182, 301–312.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.219>
- Hammar, T., Peñaloza, D., Hanning, A.-C., 2024. Life cycle assessment of a circular textile
 value chain: the case of a garment made from chemically recycled cotton. *Int. J.
 Life Cycle Assess.* 29, 1880–1898. <https://doi.org/10.1007/s11367-024-02346-2>
- Hassan, M.M., Carr, C.M., 2018. A critical review on recent advancements of the removal
 of reactive dyes from dyehouse effluent by ion-exchange adsorbents.
Chemosphere 209, 201–219. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.06.043>
- Islam, S., Bhat, G., Mani, S., 2024a. Life cycle assessment of thermal insulation materials
 produced from waste textiles. *J. Mater. Cycles Waste Manag.* 26, 1071–1085.
<https://doi.org/10.1007/s10163-023-01882-7>
- Islam, S., Hasan, A.K.M.M., Bhuiyan, M.A.R., Bhat, G., 2024b. Evaluation of environmental
 impacts of cotton polo shirt production in Bangladesh using life cycle assessment.
Sci. Total Environ. 926, 172097. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172097>
- ISO 14040:2006 Environmental management—Life cycle assessment—Principles and
 framework., n.d.
- ISO 14044:2006 Environmental management—Life cycle assessment—Requirements and
 guidelines., n.d.
- Jadhav, J.P., Kalyani, D.C., Telke, A.A., Phugare, S.S., Govindwar, S.P., 2010. Evaluation of
 the efficacy of a bacterial consortium for the removal of color, reduction of heavy
 metals, and toxicity from textile dye effluent. *Bioresour. Technol.* 101, 165–173.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.027>

- Kishor, R., Purchase, D., Saratale, G.D., Saratale, R.G., Ferreira, L.F.R., Bilal, M., Chandra, R., Bharagava, R.N., 2021. Ecotoxicological and health concerns of persistent coloring pollutants of textile industry wastewater and treatment approaches for environmental safety. *J. Environ. Chem. Eng.* 9, 105012. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.105012>
- Liscio, M.C., Sospiro, P., n.d. Life Cycle Assessment on fashion industry: four case studies. Presented at the CEST2023, Athens, Greece. <https://doi.org/10.30955/gnc2023.00283>
- Liu, Y., Zhu, L., Zhang, C., Ren, F., Huang, H., Liu, Z., 2020. Life cycle assessment of melange yarns from the manufacturer perspective. *Int. J. Life Cycle Assess.* 25, 588–599. <https://doi.org/10.1007/s11367-019-01705-8>
- Luján-Ornelas, C., Güereca, L.P., Franco-García, M.-L., Heldeweg, M., 2020. A Life Cycle Thinking Approach to Analyse Sustainability in the Textile Industry: A Literature Review. *Sustainability* 12, 10193. <https://doi.org/10.3390/su122310193>
- Mao, J., Chen, H., Xu, X., Zhu, L., 2024. Assessing greenhouse gas emissions from the printing and dyeing wastewater treatment and reuse system: Potential pathways towards carbon neutrality. *Sci. Total Environ.* 927, 172301. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.172301>
- Moazzem, S., Crossin, E., Daver, F., Wang, L., 2021. Life Cycle Assessment of Apparel Consumption in Australia. *Environ. Clim. Technol.* 25, 71–111. <https://doi.org/10.2478/rtuct-2021-0006>
- Monteiro, R.C.P., Ivar Do Sul, J.A., Costa, M.F., 2018. Plastic pollution in islands of the Atlantic Ocean. *Environ. Pollut.* 238, 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.096>
- Nakhate, P.H., Moradiya, K.K., Patil, H.G., Marathe, K.V., Yadav, G.D., 2020. Case study on sustainability of textile wastewater treatment plant based on lifecycle assessment approach. *J. Clean. Prod.* 245, 118929. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118929>
- Nayak, L., Mishra, S.P., 2016. Prospect of bamboo as a renewable textile fiber, historical overview, labeling, controversies and regulation. *Fash. Text.* 3, 2. <https://doi.org/10.1186/s40691-015-0054-5>
- Osei, M.B., Papadopoulos, T., Acquaye, A., Stamati, T., 2023. Improving sustainable supply chain performance through organisational culture: A competing values framework approach. *J. Purch. Supply Manag.* 29, 100821. <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2023.100821>
- Panda, S.K.B.C., Sen, K., Mukhopadhyay, S., 2021. Sustainable pretreatments in textile wet processing. *J. Clean. Prod.* 329, 129725. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129725>
- Peng, L., Chen, Y., Wan, Z., Zhu, Y., Guo, F., Zhu, D., Yi, C., 2023. Chemical recycling of waste cellulose denim fabric and re-dyeing process. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3113781/v1>
- Periyasamy, A., 2023. Microfiber Emissions from Functionalized Textiles: Potential Threat for Human Health and Environmental Risks. *Toxics* 11, 406. <https://doi.org/10.3390/toxics11050406>
- Periyasamy, A.P., 2024. Recent Advances in the Remediation of Textile-Dye-Containing Wastewater: Prioritizing Human Health and Sustainable Wastewater Treatment. *Sustainability* 16, 495. <https://doi.org/10.3390/su16020495>
- Qianwen, H., Cai, H., Can, L., Xin, L., Lisha, Z., Laili, W., 2024. Comprehensive assessment methods of environmental impacts during textile production. *Ind. Textila* 75, 157–163. <https://doi.org/10.35530/IT.075.02.20238>

- Rana, S., Karunamoorthy, S., Parveen, S., Fanguiero, R., 2015. Life cycle assessment of cotton textiles and clothing, in: *Handbook of Life Cycle Assessment (LCA) of Textiles and Clothing*. Elsevier, pp. 195–216. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100169-1.00009-5>
- Ribul, M., Lanot, A., Tommencioni Pisapia, C., Purnell, P., McQueen-Mason, S.J., Baurley, S., 2021. Mechanical, chemical, biological: Moving towards closed-loop bio-based recycling in a circular economy of sustainable textiles. *J. Clean. Prod.* 326, 129325. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129325>
- Roos, S., Peters, G.M., 2015. Three methods for strategic product toxicity assessment—the case of the cotton T-shirt. *Int. J. Life Cycle Assess.* 20, 903–912. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0895-6>
- Rubik, F., Nebel, K., Klusch, C., Karg, H., Hecht, K., Gerbig, M., Gärtner, S., Boldrini, B., 2024. Textiles on the Path to Sustainability and Circularity—Results of Application Tests in the Business-to-Business Sector. *Sustainability* 16, 5954. <https://doi.org/10.3390/su16145954>
- Salazar-Sogamoso, L.M., Gómez-García, M.-Á., Dobrosz-Gómez, I., 2025. Comparative life cycle assessment of sequential chemical and electrochemical processes for the treatment of industrial textile wastewater. *J. Solid State Electrochem.* 29, 3379–3399. <https://doi.org/10.1007/s10008-024-05976-6>
- Saleem, M.A., Pei, L., Saleem, M.F., Shahid, S., Wang, J., 2020. Sustainable dyeing of nylon with disperse dyes in Decamethylcyclopentasiloxane waterless dyeing system. *J. Clean. Prod.* 276, 123258. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123258>
- Sandin, G., Peters, G.M., 2018. Environmental impact of textile reuse and recycling – A review. *J. Clean. Prod.* 184, 353–365. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.266>
- Shirvanimoghaddam, K., Motamed, B., Ramakrishna, S., Naebe, M., 2020. Death by waste: Fashion and textile circular economy case. *Sci. Total Environ.* 718, 137317. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137317>
- Solis, M., Huygens, D., Tonini, D., Fruergaard Astrup, T., 2024. Management of textile waste in Europe: An environmental and a socio-economic assessment of current and future scenarios. *Resour. Conserv. Recycl.* 207, 107693. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107693>
- Sun, G., Cao, X., Wang, Y., Sun, X., Chen, Q., 2024. Comparative life cycle assessment of two different waste materials for recycled fiber. *Resour. Conserv. Recycl.* 205, 107518. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107518>
- Telli, A., Özdil, N., 2015. Effect of Recycled PET Fibers on the Performance Properties of Knitted Fabrics. *J. Eng. Fibers Fabr.* 10, 155892501501000206. <https://doi.org/10.1177/155892501501000206>
- Textile Exchange, 2025. *Materials Market Report 2025*.
- Ussiri, D.A.N., Lal, R., 2017. *Carbon Sequestration for Climate Change Mitigation and Adaptation*. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-53845-7>
- Woolridge, A.C., Ward, G.D., Phillips, P.S., Collins, M., Gandy, S., 2006. Life cycle assessment for reuse/recycling of donated waste textiles compared to use of virgin material: An UK energy saving perspective. *Resour. Conserv. Recycl.* 46, 94–103. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2005.06.006>
- Xiao, H., Zhao, T., Li, C.-H., Li, M.-Y., 2017. Eco-friendly approaches for dyeing multiple type of fabrics with cationic reactive dyes. *J. Clean. Prod.* 165, 1499–1507. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.174>
- Xu, C., Yu, H., Zhang, S., Shen, C., Ma, C., Wang, J., Li, F., 2024. Cleaner production evaluation system for textile industry: An empirical study from LCA perspectives. *Sci. Total Environ.* 913, 169632. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169632>

- Xu, X., Cui, X., Zhang, Y., Chen, X., Li, W., 2023. Carbon neutrality and green technology innovation efficiency in Chinese textile industry. *J. Clean. Prod.* 395, 136453. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136453>
- Yalcin-Enis, I., Kucukali-Ozturk, M., Sezgin, H., 2019. Risks and Management of Textile Waste, in: Gothandam, K.M., Ranjan, S., Dasgupta, N., Lichtfouse, E. (Eds.), *Nanoscience and Biotechnology for Environmental Applications, Environmental Chemistry for a Sustainable World*. Springer International Publishing, Cham, pp. 29–53. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97922-9_2
- Yan, Y., Wang, C., Ding, D., Zhang, Yingnan, Wu, G., Wang, L., Liu, X., Du, C., Zhang, Yajun, Zhao, C., 2016. Industrial carbon footprint of several typical Chinese textile fabrics. *Acta Ecol. Sin.* 36, 119–125. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2015.09.002>
- Yang, Y., He, W., Chen, F., Wang, L., 2020. Water footprint assessment of silk apparel in China. *J. Clean. Prod.* 260, 121050. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121050>
- Zhang, R., Ma, X., Shen, X., Zhai, Y., Zhang, T., Ji, C., Hong, J., 2020. PET bottles recycling in China: An LCA coupled with LCC case study of blanket production made of waste PET bottles. *J. Environ. Manage.* 260, 110062. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.110062>
- Βασιλειάδης, Α.Α., 1993. Σημειώσεις Τεχνολογίας Βαφικής και Φινιρίσματος.

Ιστοσελίδες:

- Ellen MacArthur Foundation, 2019
<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/fashion-and-the-circular-economy-deep-dive>
(Προσπελάστηκε: 30 Αυγούστου 2026)
- European Commission, 2022 <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022DC0141> (Προσπελάστηκε: 30 Αυγούστου 2026)
- European Commission, 2026 https://environment.ec.europa.eu/strategy/textiles-strategy_en?prefLang=el (Προσπελάστηκε: 30 Αυγούστου 2026)
- Nowtricity (2026) CO₂ emissions per kWh in Greece. Ιστοσελίδα:
<https://www.nowtricity.com/country/greece/> (Προσπελάστηκε: 25 Ιουνίου 2026).
- Υπουργείο Περιβάλλοντος και Ενέργειας (2026) Συντελεστές μετατροπής της κατανάλωσης ενέργειας σε ισοδύναμους τόνους CO₂ για το έτος 2025. Ιστοσελίδα:
<https://ypen.gov.gr/wp-content/uploads/2026/07/%CE%A3%CF%85%CE%BD%CF%84%CE%B5%CE%BB%CE%B5%CF%83%CF%84%CE%AD%CF%82-%CF%85%CF%80%CE%BF%CE%BB%CE%BF%CE%B3%CE%B9%CF%83%CE%BC%CE%BF%CF%8D-%CE%B3%CE%B9%CE%B1-%CF%84%CE%BF-%CE%AD%CF%84%CE%BF%CF%82-2025.pdf> (Προσπελάστηκε: 25 Ιουνίου 2026).