



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΠΕΙΡΑΙΩΣ
ΤΜΗΜΑ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΔΙΟΙΚΗΣΗΣ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ
ΠΜΣ ΣΤΗ ΒΙΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΔΙΟΙΚΗΣΗ ΚΑΙ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ
ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ: ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗ ΕΡΓΩΝ ΚΑΙ ΑΝΑΠΤΥΞΗ ΠΡΟΪΟΝΤΩΝ

ΑΝΑΛΥΣΗ ΚΥΚΛΟΥ ΖΩΗΣ ΣΕ ΠΡΟΪΟΝΤΑ COVID-19

ΚΑΡΑΓΙΑΝΝΟΠΟΥΛΟΥ ΔΗΜΗΤΡΑ

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΚΑΡΑΛΕΚΑΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ

ΑΘΗΝΑ, 2026

Δήλωση

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

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

Η Φοιτήτρια

Δήμητρα Καραγιαννοπούλου

Ο Επιβλέπων

Δημήτριος Καραλέκας

Περίληψη

Η αυξημένη κατανάλωση πόρων και η παραγωγή αποβλήτων από προϊόντα μίας χρήσης εντείνουν τις περιβαλλοντικές πιέσεις, ιδιαίτερα όταν τα προϊόντα βασίζονται σε υλικά υψηλής ενεργειακής και ανθρακικής έντασης. Η παρούσα διπλωματική εργασία εξετάζει, σε συγκριτικό επίπεδο, δυνατότητες μείωσης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος προϊόντων που χρησιμοποιήθηκαν ευρέως κατά την περίοδο της COVID-19 και εξακολουθούν να χρησιμοποιούνται σε υγειονομικές και καθημερινές εφαρμογές.

Με χρήση του Ansys Granta EduPack και του εργαλείου Eco Audit αξιολογήθηκαν σενάρια για μάσκες FFP2, απλές χειρουργικές μάσκες και αντισηπτικά μαντηλάκια. Εξετάστηκαν εναλλακτικές συνθέσεις από Banana, Flax, Kenaf, Jute, Sugarcane και PET, η επίδραση της συσκευασίας, διαφορετικές αποστάσεις μεταφοράς (150, 330 και 2.395 km) και, για τα σενάρια PET, εναλλακτικές στρατηγικές τέλους ζωής. Οι βασικοί δείκτες σύγκρισης ήταν η συνολική κατανάλωση ενέργειας (MJ) και οι εκπομπές CO₂ (kg).

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι, στα εξεταζόμενα μοντέλα, το στάδιο των υλικών αποτελεί συνήθως την κυρίαρχη συνιστώσα του αποτυπώματος. Το Banana fiber εμφάνισε τις χαμηλότερες τιμές Energy και CO₂ μεταξύ των φυσικών υλικών που συγκρίθηκαν, ενώ οι επιδράσεις του Flax, του Kenaf και του Sugarcane διαφοροποιήθηκαν ανά δείκτη. Στα σενάρια PET, η επιλογή End-of-Life επηρέασε σημαντικά το καθαρό αποτέλεσμα, με το Reuse και το Re-manufacture να εμφανίζουν μικρότερη επιβάρυνση από το Landfill. Η αύξηση της μεταφορικής απόστασης επιβάρυνε επίσης τα αποτελέσματα, χωρίς στις περισσότερες περιπτώσεις να αλλάζει τη βασική κατάταξη των υλικών.

Abstract

The increasing consumption of resources and the generation of waste from single-use products intensify environmental pressures, particularly when products rely on materials with high energy and carbon intensity. This thesis comparatively examines options for reducing the environmental footprint of products that were widely used during the COVID-19 period and continue to be used in healthcare and everyday applications.

Using Ansys Granta EduPack and its Eco Audit tool, alternative scenarios were assessed for FFP2 masks, surgical face masks and antiseptic wipes. The analysis considered alternative material compositions based on banana, flax, kenaf, jute, sugarcane and PET, the effect of packaging, transport distances of 150, 330 and 2,395 km, and, for PET scenarios, alternative end-of-life strategies. The main comparison indicators were total energy demand (MJ) and CO₂ emissions (kg).

The results indicate that, within the examined models, the material stage is generally the dominant contributor to the environmental footprint. Banana fiber showed the lowest Energy and CO₂ values among the natural materials compared, while flax, kenaf and sugarcane exhibited different trade-offs depending on the indicator. In the PET scenarios, the selected end-of-life strategy substantially affected the net result, with reuse and remanufacturing showing lower burdens than landfill. Longer transport distances also increased the footprint, although in most cases they did not change the basic ranking of the materials.

Ευχαριστίες

Θα ήταν παράλειψή μου να μην ευχαριστήσω όλους εκείνους τους ανθρώπους που μου στάθηκαν καθ' όλη τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας.

Αρχικά, θα ήθελα να εκφράσω τις θερμές μου ευχαριστίες στον επιβλέποντα καθηγητή μου, κύριο Καραλέκα Δημήτριο, για την ευκαιρία που μου έδωσε να ασχοληθώ με ένα τόσο ενδιαφέρον και πολύπλευρο θέμα, καθώς και για τις γνώσεις που μου μετέδωσε μέσα από τα μαθήματα και το γνωστικό του αντικείμενο.

Ένα μεγάλο ευχαριστώ θα ήθελα επίσης να εκφράσω στην κυρία Χαζτηνταή για την πολύτιμη και καθοριστική βοήθειά της, για την εξαιρετική συνεργασία μας καθ' όλη τη διάρκεια της μελέτης, καθώς και για τον χρόνο που αφιέρωσε.

Τέλος, θέλω να ευχαριστήσω την οικογένειά μου, το σύζυγό μου και τους φίλους μου για τη στήριξη, την υπομονή, την κατανόηση και τη βοήθεια που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής μου εργασίας, των σπουδών μου και όχι μόνο.

Περιεχόμενα

Δήλωση	1
Περίληψη	2
Abstract	3
Ευχαριστίες	4
1 Εισαγωγή	14
1.1 Γενικά.....	14
2 Απόβλητα.....	17
2.1 Γενικά.....	17
2.2 Αστικά Απόβλητα	17
2.3 Βιομηχανικά Απόβλητα	19
2.4 Τύποι Αποβλήτων	20
2.4.1 Βαρέα Μέταλλα.....	20
2.4.2 Μικροπλαστικά	22
3 Υλικά.....	26
3.1 Γενικά.....	26
3.2 Πολυπροπυλένιο (Polypropylene) - PP.....	27
3.2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά	27
3.2.2 Πολυπροπυλένιο: Ανακύκλωση & Βιοδιάσπαση.....	29
3.2.3 Πολυπροπυλένιο & Μικροπλαστικά	31
3.3 Αλουμίνιο	32
3.3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά	32
3.3.2 Αλουμίνιο: Ανακύκλωση και περιβαλλοντικές επιπτώσεις	35
3.4 Ίνες από Μπανάνα / Banana Fiber	37
3.4.1 Γενικά	37
3.4.2 Ίνες Μπανάνας: Ανακύκλωση και Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις.....	40
3.5 Τερεφθαλικό Πολυαιθυλένιο / Polyethylene Terephthalate - PET.....	41
3.5.1 Γενικά	41
3.5.2 PET: Ανακύκλωση και Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις	43
3.6 Bio-PET (Βιολογικής Προέλευσης Πολυαιθυλενοτερεφθαλικό)	46
3.6.1 Βασικά χαρακτηριστικά του Bio-PET	47
3.7 Ίνα Ζαχαροκάλαμου / Sugarcane Fiber	48
3.7.1 Γενικά	48

3.7.2 Ίνες Ζαχαροκάλαμου: Ανακύκλωση και περιβαλλοντικές επιπτώσεις.....	51
3.8 Ίνες Λιναριού / Flax Fiber	53
3.8.1 Γενικά	53
3.8.2 Ανακύκλωση και Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις Ίνών Λιναριού	56
3.9 Ίνες Γιούτα / Jute Fiber	58
3.9.1 Γενικά	58
3.9.2 Ίνες Γιούτα: Ανακύκλωση & Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις.....	60
3.10 Ίνες Κέναφ / Kenaf Fiber	62
3.10.1 Γενικά	62
3.10.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις για ίνες κενάφ και ανακύκλωση	64
4 Κύκλος Ζωής Προϊόντων.....	65
5 Μέθοδοι	70
5.1 Εισαγωγή.....	70
5.2 Λογισμικό.....	70
5.3 Δεδομένα.....	70
5.3.1 Γενικές Πληροφορίες για Μάσκα Τύπου FFP2	70
5.3.1.1 Κατασκευή και υλικά της FFP2	71
5.3.1.2 Σημασία της εφαρμογής της FFP2	72
5.3.2 Γενικές Πληροφορίες για Απλή Χειρουργική Μάσκα	72
5.3.2.1 Κατασκευή της χειρουργικής μάσκας.....	72
5.3.3 Γενικές Πληροφορίες για Αντισηπτικά Μαντηλάκια.....	73
5.3.3.1 Σύσταση των αντισηπτικών μαντηλιών	73
5.3.3.2 Υλικά κατασκευής μαντηλιού και συσκευασίας.....	73
5.3.3.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα.....	74
6 Πειραματική Διαδικασία.....	75
6.1 Εισαγωγή.....	75
6.2 FFP2	75
6.2.1 Test 1 - Επίδραση της σύνθεσης των φυσικών ινών	76
6.2.1.1 Σχεδιασμός του Test 1	76
6.2.1.2 FFP2-BFK: Banana, Flax, Kenaf και Jute.....	76
6.2.1.3 FFP2-BF: Banana, Flax και Jute	77
6.2.1.4 FFP2-B: Banana και Jute	78
6.2.1.5 Σύγκριση των επιμέρους life-cycle stages - Test 1	79
6.2.1.6 Συζήτηση των αποτελεσμάτων του Test 1	79
6.2.1.7 Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 1	80
6.2.2 Test 2 - Επίδραση της Sugarcane συσκευασίας	81
6.2.2.1 Σχεδιασμός του Test 2.....	81
6.2.2.2 FFP2-BFK-SC.....	82
6.2.2.3 FFP2-BF-SC.....	82
6.2.2.4 FFP2-B-SC.....	83
6.2.2.5 Σύγκριση των επιμέρους life-cycle stages - Test 2	83

6.2.2.6 Συζήτηση των αποτελεσμάτων του Test 2	84
6.2.2.7 Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 2	84
6.2.3 Test 3 - Ενσωμάτωση Sugarcane στις κύριες στρώσεις.....	85
6.2.3.1 Σχεδιασμός του Test 3.....	85
6.2.3.2 BFSC-BagSC	86
6.2.3.3 BSC-BagSC.....	86
6.2.3.4 SC-BagSC	87
6.2.3.5 Σύγκριση των επιμέρους life-cycle stages - Test 3	88
6.2.3.6 Συζήτηση των αποτελεσμάτων του Test 3	88
6.2.3.7 Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 3	89
6.2.4 Test 4 - Απομόνωση της επίδρασης του υλικού.....	90
6.2.4.1 Σχεδιασμός του Test 4.....	90
6.2.4.2 Banana.....	91
6.2.4.3 Flax.....	91
6.2.4.4 Sugarcane	92
6.2.4.5 Σύγκριση των επιμέρους life-cycle stages - Test 4	92
6.2.4.6 Συζήτηση των αποτελεσμάτων του Test 4	93
6.2.4.7 Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 4	93
6.2.5 Test 5 - Επίδραση διαφορετικών End-of-Life σεναρίων για PET	94
6.2.5.1 Σχεδιασμός του Test 5.....	94
6.2.5.2 PET-R - Recycling χωρίς bag	94
6.2.5.3 PET-B-R - Recycling με bag.....	95
6.2.5.4 PET-B-RU - Reuse.....	96
6.2.5.5 PET-B-LF - Landfill.....	97
6.2.5.6 PET-B-RM - Re-manufacture	98
6.2.5.7 Σύγκριση των επιμέρους life-cycle stages - Test 5	98
6.2.5.8 Συζήτηση των αποτελεσμάτων του Test 5	99
6.2.5.9 Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 5	100
6.3 Surgical Face Mask	102
6.3.1 Test 1 - Επίδραση της σύνθεσης των φυσικών ινών	103
6.3.1.1 SFM-BFK.....	103
6.3.1.2 SFM-BF.....	104
6.3.1.3 SFM-B.....	105
6.3.1.4 Σύγκριση των επιμέρους life-cycle stages - Test 1	105
6.3.1.5 Συζήτηση των αποτελεσμάτων του Test 1	106
6.3.1.6 Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 1.....	106
6.3.2 Test 2 - Προσθήκη Sugarcane Bag.....	107
6.3.2.1 SFM-BFK-BagSC	108
6.3.2.2 SFM-BF-BagSC	108
6.3.2.3 SFM-B-BagSC	109
6.3.2.4 Σύγκριση των επιμέρους life-cycle stages - Test 2	110
6.3.2.5 Συνολικό συμπέρασμα Test 2	110
6.3.2.6 Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 2.....	111
6.3.3 Test 3 - Sugarcane στις κύριες στρώσεις.....	112
6.3.3.1 SFM-BFSC-BagSC	112
6.3.3.2 SFM-BSC-BagSC	112
6.3.3.3 SFM-SC-BagSC	113
6.3.3.4 Σύγκριση των επιμέρους life-cycle stages - Test 3	114
6.3.3.5 Συνολική εικόνα Test 3	114
6.3.3.6 Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 3.....	115
6.3.4 Test 4 - Όλα τα στοιχεία από ένα υλικό	116
6.3.4.1 SFM-B-ALL.....	116

6.3.4.2 SFM-F-ALL	117
6.3.4.3 SFM-SC-ALL	117
6.3.4.4 Σύγκριση των επιμέρους life-cycle stages - Test 4	118
6.3.4.5 Συνολική εικόνα Test 4	118
6.3.4.6 Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 4.....	118
6.3.5 Test 5 - 3 Layer PET Surgical Face Mask.....	120
6.3.5.1 SFM-PET-R - Recycling χωρίς bag	120
6.3.5.2 SFM-PET-B-R - Recycling με PET bag	121
6.3.5.3 SFM-PET-B-RU - Reuse	121
6.3.5.4 SFM-PET-B-LF - Landfill	122
6.3.5.5 SFM-PET-B-RM - Re-manufacture.....	122
6.3.5.6 Σύγκριση των επιμέρους life-cycle stages - Test 5	122
6.3.5.7 Συνολική εικόνα Test 5	123
6.3.5.8 Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 5.....	124
6.4 Alcohol Wipes.....	126
6.4.1 Test 1 – Banana fiber σε wipes, package και cap.....	126
6.4.2 Test 2 - Flax fiber σε wipes, package και cap	127
6.4.3 Test 3 - Sugarcane fiber σε wipes, package και cap.....	127
6.4.4 Test 4 - Banana wipes + Sugarcane package/cap	128
6.4.5 Test 5 - Sugarcane wipes + Banana package/cap	129
6.4.6 Συνολική εικόνα βασικών αποτελεσμάτων	130
6.4.7 Επίδραση του υλικού των wipes	131
6.4.8 Επίδραση των σταδίων του κύκλου ζωής.....	131
6.4.9 Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Alcohol Wipes	132
7 Συζήτηση-Συμπέρασμα.....	134
7.1 Συμπεράσματα για τη μάσκα FFP2.....	134
7.2 Συμπεράσματα για τη χειρουργική μάσκα	135
7.3 Συμπεράσματα για τα Alcohol Wipes.....	137
7.4 Συνολικό συμπέρασμα	138
8 Βιβλιογραφία	140

Κατάλογος Πινάκων

Πίνακας 1: Ιδιότητες ινών μπανάνας (Ansys, 2022).....	39
Πίνακας 2: Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων φυσικών ινών	41
Πίνακας 3: Ιδιότητες PET (Ansys, 2022)	42
Πίνακας 4: Ιδιότητες Bio-PET (Ansys, 2022)	47
Πίνακας 5: Ιδιότητες ινών ζαχαροκάλαμου (Ansys, 2022)	50
Πίνακας 6: Ιδιότητες ινών λιναριού (Ansys, 2022)	55
Πίνακας 7: Ιδιότητες ινών γιούτα (Ansys, 2022).....	59
Πίνακας 8: Ιδιότητες ινών κενάφ (Ansys, 2022)	63
Πίνακας 9: FFP2-BFK: Banana, Flax, Kenaf και Jute - Υλικό, Ποσότητα	76
Πίνακας 10: FFP2-BFK: Banana, Flax, Kenaf και Jute - Αποτελέσματα Energy και CO ₂	77
Πίνακας 11: FFP2-BF: Banana, Flax και Jute - Υλικό, Ποσότητα.....	77
Πίνακας 12: FFP2-BF: Banana, Flax και Jute – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	78
Πίνακας 13: FFP2-B: Banana και Jute - Υλικό, Ποσότητα	78
Πίνακας 14: FFP2-B: Banana και Jute – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	78
Πίνακας 15: Συζήτηση των αποτελεσμάτων του Test 1 - Σύνθεση, Banana, Flax.....	79
Πίνακας 16: Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 1	80
Πίνακας 17: Τελική Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 1	81
Πίνακας 18: Σύνθεση και αποτελέσματα - Υλικό, Ποσότητα	82
Πίνακας 19: FFP2-BFK-SC – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	82
Πίνακας 20: Σύνθεση και αποτελέσματα - Υλικό, Ποσότητα	82
Πίνακας 21: FFP2-BF-SC – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	82
Πίνακας 22: Σύνθεση και αποτελέσματα - Υλικό, Ποσότητα	83
Πίνακας 23: FFP2-B-SC – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	83
Πίνακας 24: Συζήτηση των αποτελεσμάτων του Test 2 - Σύνθεση, Μάσκα, Sugarcane bag.....	84
Πίνακας 25: Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 2	84
Πίνακας 26: Τελική Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 2	85
Πίνακας 27: BFSC-BagSC - Υλικό, Ποσότητα	86
Πίνακας 28: BFSC-BagSC – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	86
Πίνακας 29: BSC-BagSC - Υλικό, Ποσότητα	86
Πίνακας 30: BSC-BagSC – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	87
Πίνακας 31: SC-BagSC - Υλικό, Ποσότητα	87
Πίνακας 32: SC-BagSC – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	87

Πίνακας 33: Συζήτηση των αποτελεσμάτων του Test 3 - Σύνθεση, Κύρια υλικά, Energy	88
Πίνακας 34: Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 3	89
Πίνακας 35: Τελική Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 3	89
Πίνακας 36: Banana - Στοιχείο, Ποσότητα.....	91
Πίνακας 37: Banana – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	91
Πίνακας 38: Flax - Στοιχείο, Ποσότητα.....	91
Πίνακας 39: Flax – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	91
Πίνακας 40: Sugarcane - Στοιχείο, Ποσότητα	92
Πίνακας 41: Sugarcane – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	92
Πίνακας 42: Συζήτηση των αποτελεσμάτων του Test 4 - Υλικό, Μάζα, Energy	93
Πίνακας 43: Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 4	93
Πίνακας 44: PET-R - Recycling χωρίς bag - Στοιχείο, Ποσότητα PET	94
Πίνακας 45: PET-R - Recycling χωρίς bag – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	95
Πίνακας 46: PET-B-R - Recycling με bag - Στοιχείο, Ποσότητα PET	95
Πίνακας 47: PET-B-R - Recycling με bag – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	96
Πίνακας 48: PET-B-RU - Reuse – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	97
Πίνακας 49: PET-B-LF - Landfill – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	97
Πίνακας 50: PET-B-RM - Re-manufacture – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	98
Πίνακας 51: Συζήτηση των αποτελεσμάτων του Test 5 - Σενάριο, First-life Energy, First-life CO ₂	99
Πίνακας 52: Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 5 - Σενάριο, Παράμετρος, 150 km	100
Πίνακας 53: Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 5 - Σενάριο, Energy 150 km, Energy 330 km.....	101
Πίνακας 54: Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 5 - Σενάριο, Net Energy 150 km, Net Energy 330 km	102
Πίνακας 55: SFM-BFK - Στοιχείο, Υλικό, Ποσότητα.....	103
Πίνακας 56: SFM-BFK - Στάδιο, Energy (MJ), CO ₂ (kg).....	103
Πίνακας 57: SFM-BF - Στοιχείο, Υλικό, Ποσότητα.....	104
Πίνακας 58: SFM-BF – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	104
Πίνακας 59: SFM-B - Στοιχείο, Υλικό, Ποσότητα.....	105
Πίνακας 60: SFM-B – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	105
Πίνακας 61: Συζήτηση των αποτελεσμάτων του Test 1 - Κωδικός, Energy (MJ), CO ₂ (kg).....	106

Πίνακας 62: Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 1 - Σύνθεση, Παράμετρος, 150 km.....	106
Πίνακας 63: Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 1 - Σύνθεση, 150 km, 330 km	107
Πίνακας 64: SFM-BFK-BagSC - Υλικό, Ποσότητα.....	108
Πίνακας 65: SFM-BFK-BagSC – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	108
Πίνακας 66: SFM-BF-BagSC - Υλικό/στοιχείο, Ποσότητα	109
Πίνακας 67: SFM-BF-BagSC – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	109
Πίνακας 68: SFM-B-BagSC - Υλικό/στοιχείο, Ποσότητα	109
Πίνακας 69: SFM-B-BagSC – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	109
Πίνακας 70: Συνολικό συμπέρασμα Test 2 - Κωδικός, Energy (MJ), CO ₂ (kg)	110
Πίνακας 71: Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 2 - Σύνθεση, Παράμετρος, 150 km.....	111
Πίνακας 72: Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 2 - Σύνθεση, 150 km, 330 km	111
Πίνακας 73: SFM-BFSC-BagSC - Υλικό, Ποσότητα.....	112
Πίνακας 74: SFM-BFSC-BagSC – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	112
Πίνακας 75: SFM-BSC-BagSC - Υλικό, Ποσότητα.....	113
Πίνακας 76: SFM-BSC-BagSC – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	113
Πίνακας 77: SFM-SC-BagSC - Υλικό/στοιχείο, Ποσότητα	113
Πίνακας 78: SFM-SC-BagSC – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	114
Πίνακας 79: Συνολική εικόνα Test 3 - Κωδικός, Energy (MJ), CO ₂ (kg)	114
Πίνακας 80: Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 3 - Σύνθεση, Παράμετρος, 150 km.....	115
Πίνακας 81: Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 3 - Σύνθεση, Energy 150, Energy 330.....	115
Πίνακας 82: SFM-B-ALL - Στοιχείο, Ποσότητα.....	116
Πίνακας 83: SFM-B-ALL – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	117
Πίνακας 84: SFM-F-ALL – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	117
Πίνακας 85: SFM-SC-ALL – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	117
Πίνακας 86: Συνολική εικόνα Test 4 - Κωδικός, Energy (MJ), CO ₂ (kg)	118
Πίνακας 87: Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 4 - Σύνθεση, Παράμετρος, 150 km.....	119

Πίνακας 88: Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 4 - Σύνθεση, Energy 150, Energy 330.....	119
Πίνακας 89: SFM-PET-R – Recycling χωρίς bag - Component, PET	120
Πίνακας 90: SFM-PET-R - Recycling χωρίς bag – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	120
Πίνακας 91: SFM-PET-B-R – Recycling με PET bag - Component, PET.....	121
Πίνακας 92: SFM-PET-B-R - Recycling με PET bag – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	121
Πίνακας 93: SFM-PET-B-RU - Reuse – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	121
Πίνακας 94: SFM-PET-B-LF - Landfill – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	122
Πίνακας 95: SFM-PET-B-RM - Re-manufacture – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	122
Πίνακας 96: Συνολική εικόνα Test 5 - Κωδικός, First-life Energy, First-life CO ₂	123
Πίνακας 97: Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 5 - Σύνθεση, Παράμετρος, 150 km.....	124
Πίνακας 98: Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 5 - Κωδικός, Energy 150, Energy 330.....	125
Πίνακας 99: Test 1 – Banana fiber σε wipes, package και cap – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	126
Πίνακας 100: Test 2 - Flax fiber σε wipes, package και cap – Αποτελέσματα Energy και CO ₂ ..	127
Πίνακας 101: Test 3 - Sugarcane fiber σε wipes, package και cap – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	128
Πίνακας 102: Test 4 - Banana wipes + Sugarcane package/cap – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	129
Πίνακας 103: Test 5 - Sugarcane wipes + Banana package/cap – Αποτελέσματα Energy και CO ₂	130
Πίνακας 104: Συγκριτικός πίνακας βασικών αποτελεσμάτων - Test, Wipes / Package / Cap, Material Energy (MJ).....	130
Πίνακας 105: Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Alcohol Wipes - Σύνθεση, Παράμετρος, 150 km.....	132
Πίνακας 106: Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Alcohol Wipes - Test, Σύνθεση, 150 km Energy (MJ)	133

Κατάλογος Σχημάτων

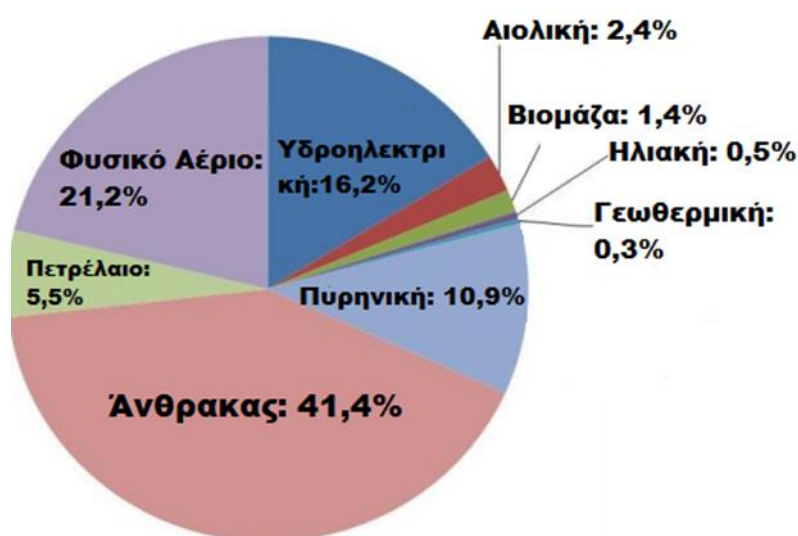
Σχήμα 1: Παγκόσμια ηλεκτρική παραγωγή ανά καύσιμο επί τις % το 2012 (Μαμάσης,2015).	14
Σχήμα 2: Κατανομή ποσοστού αξίας και Emergy ανά είδος ορυκτού καυσίμου (Zhong et al., 2017).	15
Σχήμα 3: Διακύμανση της τιμής του Πολυπροπυλενίου από το Μάιο του 2018 έως τον Ιούνιο του 2027 (Business Analytiq, 2026).	28
Σχήμα 4: Λίστα με τα πιο κοινά πλαστικά και ο κωδικός ανακύκλωσης (García-López et al., 2024)	29
Σχήμα 5: Διαχείριση πλαστικών αποβλήτων ανά τύπο πολυμερούς και μέθοδο τελικής διάθεσης.	30
Σχήμα 6: Παραγωγή αλουμινίου ανά γεωγραφική περιοχή, 1973–2021 Zore, L. (2024)	34
Σχήμα 7: Διαχρονική εξέλιξη της τιμής του αλουμινίου σε δολάρια ΗΠΑ και της συναλλαγματικής ισοτιμίας USD/EUR κατά την περίοδο 2017–2026 Alumeco Group, 2026	34
Σχήμα 8: Οι βασικές θεματικές ενότητες που σχετίζονται με τη βιωσιμότητα, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τον κύκλο ζωής του αλουμινίου. (International Aluminium Institute, 2025)	36
Σχήμα 9: Κύκλος ζωής προϊόντων από το στάδιο της παραγωγής έως την τελική διάθεση (cradle to grave) (Kaynak et al., 2025).	66
Σχήμα 10: 6 Φάσεις του κύκλου ζωής ενός προϊόντος	66
Σχήμα 11: 6 Φάσεις του κύκλου ζωής ενός προϊόντος αλλά με την διάσταση της χρήσης μετά το τέλος του κύκλου ζωής.....	68

1 Εισαγωγή

1.1 Γενικά

Σήμερα, παρατηρείται ανεξέλεγκτη καταστροφή του φυσικού περιβάλλοντος που περιλαμβάνει την αλλαγή του κλίματος, τη μόλυνση των υδάτων και του εδάφους, την καταστροφή της βιοποικιλότητας, τη μείωση του παγκόσμιου φυσικού πληθυσμού, αλλά και την έλλειψη ορυκτών καυσίμων και πρώτων υλών.

Η αύξηση της ζήτησης ενέργειας και πρώτων υλών, οι διακυμάνσεις των τιμών και η ανεπαρκής διαχείριση των αποβλήτων εντείνουν την πίεση στους φυσικούς πόρους και καθιστούν αναγκαία την αναζήτηση υλικών και παραγωγικών λύσεων με χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Σύμφωνα με την International Energy Outlook 2013, η παγκόσμια κατανάλωση ενέργειας προβλεπόταν να αυξηθεί κατά 56% μεταξύ 2010 και 2040, με το μεγαλύτερο μέρος της αύξησης να προέρχεται από τις αναπτυσσόμενες οικονομίες (U.S. EIA, 2013).



Σχήμα 1: Παγκόσμια ηλεκτρική παραγωγή ανά καύσιμο επί τις % το 2012 (Μαμάσης, 2015).

Τα ορυκτά καύσιμα εξακολουθούν να αποτελούν σημαντικό τμήμα του παγκόσμιου ενεργειακού συστήματος και συνδέονται με εκπομπές CO₂ και άλλων αερίων του θερμοκηπίου. Η πεπερασμένη φύση των αποθεμάτων και η γεωγραφική συγκέντρωση της παραγωγής δημιουργούν παράλληλα ζητήματα ενεργειακής ασφάλειας και διακυμάνσεων τιμών. Μελέτες έχουν εξετάσει διαφορετικά σενάρια μελλοντικής παραγωγής πετρελαίου, φυσικού αερίου και άνθρακα (Mohr et al., 2015; Höök et al., 2010). Παράλληλα, η ανάλυση των διεθνών ροών ορυκτών καυσίμων με δείκτες οικονομικής

αξίας και emergy αναδεικνύει τις διαφορετικές ενεργειακές και οικονομικές συνεισφορές των καυσίμων στο παγκόσμιο σύστημα (Zhong et al., 2017).

Είδος	Ποσοστό της Αξίας (\$)	Ποσοστό Emergy (seJ)
Άνθρακας	7.60%	13.96%
Αδιύλιστο πετρέλαιο	81.76%	62.33%
Φυσικό Αέριο	10.64%	23.71%

Σχήμα 2: Κατανομή ποσοστού αξίας και Emergy ανά είδος ορυκτού καυσίμου (Zhong et al., 2017).

Η ρύπανση των υδάτων και του εδάφους αποτελεί επίσης ένα από τα σημαντικότερα σύγχρονα περιβαλλοντικά προβλήματα. Η πρόσβαση σε ασφαλές πόσιμο νερό παραμένει κρίσιμο ζήτημα: σύμφωνα με την κοινή έκθεση WHO και UNICEF του 2017, περίπου 2,1 δισεκατομμύρια άνθρωποι δεν διέθεταν ασφαλές και άμεσα διαθέσιμο νερό στο σπίτι (WHO & UNICEF, 2017). Παράλληλα, η OECD Environmental Outlook to 2050 προέβλεπε αύξηση της παγκόσμιας ζήτησης νερού κατά περίπου 55% μεταξύ 2000 και 2050, κυρίως λόγω αυξημένης ζήτησης στη μεταποίηση, στην ηλεκτροπαραγωγή και στην οικιακή χρήση (OECD, 2012).

Μία κύρια αιτία που ευθύνεται για την ύπαρξη μη καθαρού νερού είναι τα απόβλητα. Τα απόβλητα είναι υποπροϊόντα ενός ευρέως φάσματος βιομηχανικών, εμπορικών ή γεωργικών δραστηριοτήτων και κατά συνέπεια παρουσιάζουν μεταβλητότητα στις χημικές και βιολογικές ιδιότητες τους (Monfet et al., 2017). Η μη σωστή διαχείριση των αποβλήτων έχει σαν αποτέλεσμα την εύρεση μεγάλων ποσοστών μετάλλων, καθώς νιτρικών και φωσφορικών στον υδροφόρο καθώς και μικροπλαστικών. Αυτό έχει αντίκτυπο όχι μόνο στον άνθρωπο αλλά και στην βιοποικιλότητα που τον περικλείει. Οι υψηλές συγκεντρώσεις μετάλλων και μικροπλαστικών παρουσιάζουν βλαβερές επιπτώσεις όπως, θανάτωση ψαριών και παραγωγή τοξινών. Υπάρχουν πολλές στρατηγικές διαχείρισης για τον μετριασμό του αλλά η αντιστροφή διαδικασία και η ανάκαμψη είναι πολύ δαπανηρές και χρειάζονται πολύ χρόνο. Οπότε, η πρόληψη αποτελεί το κλειδί για την αποφυγή απώλειας των οικοσυστημάτων (Wilkinson et al., 2017).

Πέρα από την καταστροφή του υδροφόρου ορίζοντα παρατηρείται και η καταστροφή του εδάφους. Η ανεξέλεγκτη διάθεση στερεών και υγρών αποβλήτων αποτελεί έναν από τους σημαντικότερους παράγοντες υποβάθμισης του εδάφους, καθώς οδηγεί σε σοβαρή ρύπανση και αλλοίωση των φυσικών του ιδιοτήτων. Η απόθεση απορριμμάτων, ιδιαίτερα σε χώρους υγειονομικής ταφής ή ανεξέλεγκτες χωματερές, προκαλεί την παραγωγή στραγγισμάτων, τα οποία περιέχουν

τοξικές ουσίες και βαρέα μέταλλα, όπως μόλυβδος, κάδμιο και υδράργυρος, τα οποία διεισδύουν στο έδαφος και υποβαθμίζουν τη γονιμότητά του (Rana et al., 2025). Οι ρύποι αυτοί μεταβάλλουν τη χημική σύσταση και τη μικροβιακή δραστηριότητα του εδάφους, επηρεάζοντας αρνητικά την ανάπτυξη των φυτών και τη γεωργική παραγωγή. Επιπλέον, η συσσώρευση επικίνδυνων ουσιών στο έδαφος οδηγεί στη μεταφορά τους στην τροφική αλυσίδα μέσω της απορρόφησής τους από τα φυτά, δημιουργώντας σημαντικούς κινδύνους για την ανθρώπινη υγεία αλλοιώνοντας την μοριακή δομή και επηρεάζοντας σε μεγάλο βαθμό το ανθρώπινο σώμα με διάφορες αρνητικές επιπτώσεις (Alloway, 2013). Σε παγκόσμιο επίπεδο, η ρύπανση του εδάφους θεωρείται κρίσιμο περιβαλλοντικό πρόβλημα, καθώς επηρεάζει την ασφάλεια τροφίμων, τη βιοποικιλότητα και γενικότερα τη βιωσιμότητα των οικοσυστημάτων.

2 Απόβλητα

2.1 Γενικά

Με την αύξηση του ανθρώπινου πληθυσμού, η διάθεση των αποβλήτων που παράγονται από τον άνθρωπο δημιουργεί ένα μεγαλύτερο πρόβλημα, κυρίως λόγω των υποπροϊόντων που παράγονται από την επεξεργασία αποβλήτων. Σύμφωνα με την US EPA, η συνολική ποσότητα που παράγεται στις ΗΠΑ αυξήθηκε από 88 εκατομμύρια τόνους το 1960 σε 256 εκατομμύρια τόνους το 2006 και μειώθηκε ελαφρά σε 254 εκατομμύρια τόνους το 2013 (U.S. EPA, 2015). Ως απόβλητα ορίζονται όλα τα υλικά ή ουσίες που απορρίπτονται από τον άνθρωπο και δεν έχουν πλέον άμεση χρήση για τον αρχικό τους σκοπό (European Commission, 2008). Η διαχείρισή τους αποτελεί κρίσιμο ζήτημα για τη βιώσιμη ανάπτυξη, καθώς επηρεάζει το έδαφος, τα ύδατα και την ανθρώπινη υγεία. Τα απόβλητα διακρίνονται σε διάφορες κατηγορίες ανάλογα με την προέλευσή τους και τα χαρακτηριστικά τους:

- **Αστικά απόβλητα:** Περιλαμβάνουν τα οικιακά απορρίμματα και τα απόβλητα από εμπορικές δραστηριότητες.
- **Βιομηχανικά απόβλητα:** Προκύπτουν από παραγωγικές διαδικασίες και συχνά περιέχουν επικίνδυνες ουσίες.
- **Επικίνδυνα απόβλητα:** Περιέχουν τοξικά, εύφλεκτα ή διαβρωτικά υλικά και απαιτούν ειδική διαχείριση.
- **Ιατρικά απόβλητα:** Προέρχονται από νοσοκομεία και υγειονομικές μονάδες και ενδέχεται να είναι μολυσματικά.
- **Ηλεκτρονικά απόβλητα (e-waste):** Περιλαμβάνουν απορριπτόμενο ηλεκτρονικό εξοπλισμό, όπως υπολογιστές και κινητά τηλέφωνα (Tchobanoglous et al., 1993).

2.2 Αστικά Απόβλητα

Τα αστικά απόβλητα αποτελούν σήμερα ένα από τα πλέον επείγοντα περιβαλλοντικά προβλήματα σε όλες τις χώρες λόγω της εκτεταμένης ρύπανσης που προκαλούν στο έδαφος και στα υδάτινα οικοσυστήματα με τη διαρροή τοξικών και επικίνδυνων χημικών ρύπων. Επίσης, μπορούν να καταστούν αιτίες, μεταφοράς μολυσματικών παραγόντων στα υπόγεια νερά και ρύπανσης καλλιεργειών με βαρέα μέταλλα και άλλες χημικές ουσίες. Τις μεγαλύτερες ποσότητες αποβλήτων παράγουν οι ανεπτυγμένες βιομηχανικές χώρες λόγω του σημαντικού ποσοστού αστικού πληθυσμού τους και τον υπέρμετρα καταναλωτικό τρόπο ζωής (Βαλαβανίδης, 2015).

Στερεά αστικά απόβλητα (ΣΑΑ) ονομάζουμε τα στερεά οικιακά απόβλητα που περιέχουν απόβλητα από ιδρύματα όπως σχολεία, νοσοκομεία υπηρεσίες, ξενοδοχεία και ορισμένες φορές μικρό

ποσοστό στερεών βιομηχανικών αποβλήτων (ΣΒΑ). Η ποσότητα των παραγόμενων οικιακών αποβλήτων ανά άτομο διαφέρει τόσο μεταξύ των χωρών όσο και μεταξύ περιοχών της ίδιας χώρας. Τα στερεά απόβλητα περιέχουν οργανική και ανόργανη ύλη σε μορφή στερεών και σε διαλύτη. Το ρυπαντικό τους φορτίο χαρακτηρίζεται από μία σειρά παραμέτρων που αναφέρονται στις οργανικές ουσίες, βιοαποδομήσιμες και μη, στα αιωρούμενα στερεά, στα ολικά στερεά, στις τοξικές για ζωντανούς οργανισμούς, χημικές ενώσεις, οργανικές και ανόργανες κυρίως βαρέα μέταλλα, πλαστικά, άζωτο και φώσφορο. Το 25% των αποβλήτων αποτελείται από ανόργανες ουσίες σε μορφή σωματιδίων που προέρχονται από φυτά, ζώα και ανθρώπινες δραστηριότητες (Κούγκολος, 2007).

Κάποια από τα ανόργανα είναι τα παρακάτω:

- Μέταλλα
 - Αλουμίνιο (κουτιά αναψυκτικών)
 - Σίδηρος, χάλυβας
 - Χαλκός
- Πλαστικά και Συνθετικά Υφάσματα
 - Πολυαιθυλένιο (PE)
 - Πολυπροπυλένιο (PP)
 - PET
 - Πολυεστέρας (polyester)
 - Νάιλον (nylon)
 - Ακρυλικό

Το υπόλοιπο 75% των αποβλήτων αποτελείται από οργανικές ουσίες σε μορφή σωματιδίων που προέρχονται από φυτά, ζώα και ανθρώπινες δραστηριότητες (Κούγκολος, 2007).

Κάποια από τα οργανικά είναι τα παρακάτω:

- Υπολείμματα τροφών και ζωικά απόβλητα
- Φυσικά Υφάσματα
 - Βαμβάκι
 - Μαλλί
 - Λινό
- Φυσικά Υλικά
 - Ξύλο
 - Φύλλα, γρασίδι
 - Κλαδιά

2.3 Βιομηχανικά Απόβλητα

Τα βιομηχανικά απόβλητα αποτελούν μία από τις σημαντικότερες περιβαλλοντικές προκλήσεις της σύγχρονης βιομηχανικής ανάπτυξης, καθώς προκύπτουν από ένα ευρύ φάσμα παραγωγικών δραστηριοτήτων. Η συνεχής αύξηση της παραγωγής και της κατανάλωσης έχει οδηγήσει σε σημαντική αύξηση της ποσότητας των αποβλήτων, τα οποία περιλαμβάνουν τόσο επικίνδυνες όσο και μη επικίνδυνες ουσίες (European Commission, 2008). Η ορθολογική διαχείριση των αποβλήτων αυτών είναι απαραίτητη για την προστασία του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας.

Τα απόβλητα πολλών βιομηχανιών περιέχουν βαρέα μέταλλα και πλαστικά που μπορεί να προέρχονται από μπαταρίες, βυρσοδεψεία, ηλεκτρολογικά, λιπάσματα, παρασιτοκτόνα, μεταλλεία, ραδιενεργά μεταλλεύματα και άλλα. Λόγω των επικίνδυνων συνεπειών τους, της ανθεκτικότητας και της τάσης συσσώρευσης, τα βαρέα μέταλλα και τα πλαστικά μπορούν να θέσουν σε κίνδυνο την υγεία του ανθρώπινου πληθυσμού και του περιβάλλοντος. Η έκθεση σε βαρέα μέταλλα και μικροπλαστικά μπορεί να προκαλέσει βλάβη σε πολλά μέρη του ανθρώπινου σώματος, ακόμη και σε πολύ χαμηλές συγκεντρώσεις. Συνεπώς, η απομάκρυνση βαρέων μετάλλων και μικροπλαστικών από υδατικά διαλύματα είναι εξαιρετικής σημασίας (Nguyen et al., 2013).

Τα βιομηχανικά απόβλητα κατηγοριοποιούνται ανάλογα με τη φυσική τους μορφή και τη χημική τους σύσταση. Συγκεκριμένα, διακρίνονται σε στερεά, υγρά και αέρια απόβλητα (Tchobanoglous et al., 1993).

Τα στερεά απόβλητα περιλαμβάνουν υλικά όπως μεταλλικά υπολείμματα, πλαστικά, ιλύ και άλλα κατάλοιπα παραγωγικών διεργασιών. Τα υγρά απόβλητα περιέχουν οργανικές και ανόργανες ενώσεις, όπως βαρέα μέταλλα και τοξικές χημικές ουσίες, που μπορούν να επιβαρύνουν σημαντικά τους υδάτινους πόρους. Τα αέρια απόβλητα αποτελούνται κυρίως από ρύπους όπως διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), οξείδια του θείου (SO_2) και οξείδια του αζώτου (NO_x), τα οποία συμβάλλουν στην ατμοσφαιρική ρύπανση και την κλιματική αλλαγή (UNEP, 2015).

Επιπλέον, ιδιαίτερη σημασία έχει η διάκριση μεταξύ επικίνδυνων και μη επικίνδυνων αποβλήτων, με τα πρώτα να χαρακτηρίζονται από τοξικότητα, αναφλεξιμότητα ή διαβρωτικότητα (European Commission, 2008).

Η ανεξέλεγκτη διάθεση βιομηχανικών αποβλήτων μπορεί να προκαλέσει σοβαρές περιβαλλοντικές και υγειονομικές επιπτώσεις. Συγκεκριμένα, η απόρριψη υγρών αποβλήτων μπορεί να οδηγήσει σε ρύπανση των επιφανειακών και υπόγειων υδάτων, επηρεάζοντας τον υδροφόρο ορίζοντα και την ποιότητα του πόσιμου νερού (UNEP, 2015).

Παράλληλα, η συσσώρευση τοξικών ουσιών στο έδαφος, όπως βαρέα μέταλλα και μικροπλαστικά, μπορεί να προκαλέσει υποβάθμιση της γονιμότητας και είσοδο αυτών των ουσιών στην τροφική αλυσίδα (Wang et al., 2009). Επιπλέον, οι αέριες εκπομπές συμβάλλουν στην επιδείνωση της ποιότητας του αέρα και σχετίζονται με φαινόμενα όπως η όξινη βροχή και η υπερθέρμανση του πλανήτη (European Commission, 2008). Οι επιπτώσεις αυτές έχουν άμεσες συνέπειες και στην ανθρώπινη υγεία, προκαλώντας αναπνευστικά προβλήματα, νευρολογικές διαταραχές και αυξημένο κίνδυνο καρκίνου (Wang et al., 2009).

Η μόλυνση των επιφανειακών υδάτων από διάφορα συστατικά των υγρών και στερεών αποβλήτων που καταλήγουν στον υδροφόρο έχει οδηγήσει σε εκτεταμένη ρύπανση των υδάτων. Είναι άμεση αναγκαιότητα η πρόληψη πολύ πριν την παραγωγή με πρώτες ύλες απαλλαγμένες από αυτά τα επιβλαβή υλικά με αντικατάσταση νέων βιώσιμων υλικών. Τα βιομηχανικά απόβλητα αποτελούν ένα σύνθετο και πολυδιάστατο πρόβλημα που απαιτεί συνδυασμένη προσέγγιση τεχνολογικών, νομοθετικών και περιβαλλοντικών μέτρων. Η υιοθέτηση βιώσιμων πρακτικών, η ανάπτυξη καινοτόμων τεχνολογιών επεξεργασίας και η αυστηρή εφαρμογή της νομοθεσίας είναι καθοριστικής σημασίας για τον περιορισμό των επιπτώσεων στο περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία (UNEP, 2015).

2.4 Τύποι Αποβλήτων

2.4.1 Βαρέα Μέταλλα

Τα απόβλητα που περιέχουν βαρέα μέταλλα αποτελούν μία από τις πιο επικίνδυνες κατηγορίες βιομηχανικών αποβλήτων λόγω της τοξικότητας, της ανθεκτικότητας και της ικανότητάς τους να συσσωρεύονται στο περιβάλλον και στους ζωντανούς οργανισμούς. Βαρέα μέταλλα όπως ο μόλυβδος (Pb), ο υδράργυρος (Hg), το κάδμιο (Cd) και το χρώμιο (Cr) χρησιμοποιούνται ευρέως σε βιομηχανικές εφαρμογές, γεγονός που οδηγεί στην παραγωγή σημαντικών ποσοτήτων επικίνδυνων αποβλήτων (Alloway, 2013). Η διαχείριση αυτών των αποβλήτων αποτελεί κρίσιμο ζήτημα για την προστασία του περιβάλλοντος και της ανθρώπινης υγείας. Τα απόβλητα βαρέων μετάλλων προέρχονται κυρίως από βιομηχανικές δραστηριότητες όπως η μεταλλουργία, η εξόρυξη, η παραγωγή μπαταριών, η ηλεκτρονική βιομηχανία και η επιμετάλλωση (Fu & Wang, 2011).

Επιπλέον, σημαντικές πηγές αποτελούν:

- Η καύση ορυκτών καυσίμων
- Η παραγωγή χρωμάτων και βαφών
- Η κατασκευή πλαστικών και ηλεκτρονικών εξαρτημάτων

Κατά τη διάρκεια αυτών των διεργασιών, τα βαρέα μέταλλα απελευθερώνονται σε υγρά, στερεά ή αέρια απόβλητα, τα οποία μπορούν εύκολα να διασπαρθούν στο περιβάλλον (Alloway, 2013). Τα βαρέα μέταλλα χαρακτηρίζονται από υψηλή πυκνότητα και χημική σταθερότητα, γεγονός που τα καθιστά μη βιοδιασπώμενα. Ως αποτέλεσμα, παραμένουν στο περιβάλλον για μεγάλα χρονικά διαστήματα και μπορούν να μετακινηθούν μεταξύ εδάφους, νερού και ατμόσφαιρας (Tchounwou et al., 2012).

Ένα βασικό χαρακτηριστικό τους είναι η βιοσυσσωρευση και η βιομεγέθυνση, δηλαδή η αύξηση της συγκεντρώσής τους στους οργανισμούς και κατά μήκος της τροφικής αλυσίδας. Αυτό οδηγεί σε αυξημένες συγκεντρώσεις σε ανώτερους οργανισμούς, συμπεριλαμβανομένου του ανθρώπου (Fu & Wang, 2011). Η παρουσία βαρέων μετάλλων στα απόβλητα έχει σοβαρές περιβαλλοντικές συνέπειες. Στο έδαφος, τα μέταλλα αυτά μπορούν να μειώσουν τη γονιμότητα και να επηρεάσουν τη μικροβιακή δραστηριότητα (Alloway, 2013). Στα υδάτινα συστήματα, η ρύπανση προκαλεί τοξικότητα στους υδρόβιους οργανισμούς και διαταράσσει τα οικοσυστήματα (Fu & Wang, 2011).

Επιπλέον, η μεταφορά βαρέων μετάλλων μέσω της ατμόσφαιρας οδηγεί σε ευρεία διασπορά τους, συμβάλλοντας στη μακροχρόνια περιβαλλοντική επιβάρυνση (Tchounwou et al., 2012). Όπως αναφέραμε και παραπάνω τα βαρέα μέταλλα είναι ιδιαίτερα επικίνδυνα για την ανθρώπινη υγεία, καθώς μπορούν να εισέλθουν στον οργανισμό μέσω της εισπνοής, της κατάποσης ή της επαφής με το δέρμα. Η έκθεση σε αυτά συνδέεται με σοβαρές ασθένειες, όπως νευρολογικές διαταραχές, νεφρική δυσλειτουργία και καρκίνο (Tchounwou et al., 2012). Η τοξικότητα αυτών των στοιχείων οφείλεται στην ικανότητά τους να παρεμβαίνουν σε βασικές βιολογικές λειτουργίες και να προκαλούν οξειδωτικό στρες (Fu & Wang, 2011).

Η παρουσία βαρέων μετάλλων σε υλικά και απόβλητα που σχετίζονται με το αλουμίνιο αποτελεί σημαντικό περιβαλλοντικό ζήτημα, ιδιαίτερα κατά τα στάδια παραγωγής, επεξεργασίας, ανακύκλωσης και τελικής διάθεσής του. Παρότι το αλουμίνιο δεν αποτελεί από μόνο του πηγή παραγωγής άλλων βαρέων μετάλλων, πρώτες ύλες, κράματα και βιομηχανικά απόβλητα που σχετίζονται με την κατεργασία του είναι δυνατόν να περιέχουν ίχνη μεταλλικών στοιχείων, τα οποία μπορούν υπό κατάλληλες περιβαλλοντικές συνθήκες να απελευθερωθούν στο έδαφος ή στο υδάτινο περιβάλλον. Η κινητικότητα και η βιοδιαθεσιμότητα των μετάλλων εξαρτώνται σε σημαντικό βαθμό από παράγοντες όπως το pH, η οργανική ύλη και οι φυσικοχημικές ιδιότητες του εδάφους, οι οποίες καθορίζουν τον βαθμό προσρόφησης, έκπλυσης και μεταφοράς τους στο περιβάλλον (Alloway, 2013). Παράλληλα, μεταλλικοί ρύποι όπως το κάδμιο (Cd), ο μόλυβδος (Pb), το χρώμιο (Cr), το νικέλιο (Ni), ο χαλκός (Cu) και ο ψευδάργυρος (Zn) αποτελούν συχνά αντικείμενο ελέγχου σε βιομηχανικά υγρά απόβλητα, καθώς η απομάκρυνσή τους είναι απαραίτητη για τον περιορισμό της περιβαλλοντικής

ρύπανσης και της έκθεσης ανθρώπων και οικοσυστημάτων (Fu & Wang, 2011). Η σημασία του ελέγχου αυτών των στοιχείων ενισχύεται από το γεγονός ότι ορισμένα βαρέα μέταλλα χαρακτηρίζονται από μεγάλη περιβαλλοντική παραμονή και μπορούν, ανάλογα με το στοιχείο, τη χημική του μορφή, τη συγκέντρωση και τη διάρκεια έκθεσης, να προκαλέσουν τοξικές επιδράσεις σε βιολογικούς οργανισμούς (Tchounwou et al., 2012). Συνεπώς, κατά την αξιολόγηση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος προϊόντων ή αποβλήτων αλουμινίου, η διερεύνηση της πιθανής παρουσίας και απελευθέρωσης βαρέων μετάλλων αποτελεί σημαντική παράμετρο για την εκτίμηση των πιθανών επιπτώσεων στο έδαφος, στο νερό και, κατ' επέκταση, στην ανθρώπινη υγεία.

Πολύ σημαντικό να αναφερθούμε στην επεξεργασία αποβλήτων που περιέχουν βαρέα μέταλλα περιλαμβάνει διάφορες τεχνικές:

- Χημική καθίζηση: μετατροπή των διαλυτών μετάλλων σε αδιάλυτες μορφές
- Ανταλλαγή ιόντων: απομάκρυνση μεταλλικών ιόντων από υδατικά διαλύματα
- Μembranικές τεχνολογίες: όπως αντίστροφη όσμωση
- Βιοαπορρόφηση: χρήση βιολογικών υλικών για δέσμευση μετάλλων (Fu & Wang, 2011)

Οι σύγχρονες προσεγγίσεις εστιάζουν επίσης στην ανάκτηση και επαναχρησιμοποίηση των μετάλλων, σύμφωνα με τις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης (Alloway, 2013). Τα απόβλητα βαρέων μετάλλων αποτελούν σημαντική απειλή για το περιβάλλον και την ανθρώπινη υγεία λόγω της τοξικότητας και της παραμονής τους στη φύση. Η ορθολογική διαχείριση, η ανάπτυξη αποτελεσματικών τεχνολογιών επεξεργασίας και η αυστηρή εφαρμογή περιβαλλοντικών κανονισμών είναι απαραίτητες για τον περιορισμό των επιπτώσεών τους (Tchounwou et al., 2012).

2.4.2 Μικροπλαστικά

Τα μικροπλαστικά αποτελούν μία από τις σημαντικότερες μορφές σύγχρονης περιβαλλοντικής ρύπανσης και συνδέονται άμεσα με την εκτεταμένη παραγωγή, χρήση και απόρριψη πλαστικών προϊόντων. Ως μικροπλαστικά χαρακτηρίζονται γενικά τα πλαστικά σωματίδια με μέγεθος μικρότερο των 5 mm, τα οποία μπορούν να εμφανίζονται με τη μορφή ινών, θραυσμάτων, σφαιριδίων ή λεπτών πλαστικών μεμβρανών. Παράλληλα, για τον ακριβέστερο χαρακτηρισμό τους λαμβάνονται υπόψη ιδιότητες όπως το μέγεθος, η μορφή, η χημική σύσταση και η προέλευσή τους (Frias & Nash, 2019).

Τα μικροπλαστικά διακρίνονται σε πρωτογενή και δευτερογενή. Τα πρωτογενή μικροπλαστικά κατασκευάζονται εξ αρχής σε μικρές διαστάσεις για συγκεκριμένες βιομηχανικές ή καταναλωτικές εφαρμογές. Αντίθετα, τα δευτερογενή μικροπλαστικά δημιουργούνται από τον σταδιακό κατακερματισμό μεγαλύτερων πλαστικών προϊόντων που έχουν απορριφθεί στο περιβάλλον. Η

ηλιακή και υπεριώδης ακτινοβολία, η θερμοκρασία, η οξείδωση, η μηχανική καταπόνηση και η τριβή μπορούν να συμβάλουν στη σταδιακή αποδόμηση των πλαστικών και στη δημιουργία ολοένα μικρότερων σωματιδίων (Cole et al., 2011).

Η υψηλή ανθεκτικότητα των συνθετικών πολυμερών αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα κατά τη διάρκεια χρήσης των πλαστικών προϊόντων, αλλά δημιουργεί σημαντικό περιβαλλοντικό πρόβλημα μετά την απόρριψή τους. Τα πλαστικά μπορούν να παραμένουν για μεγάλα χρονικά διαστήματα στο φυσικό περιβάλλον και, αντί να αποδομούνται πλήρως, κατακερματίζονται σταδιακά σε μικρότερα σωματίδια. Τα σωματίδια αυτά μπορούν να μεταφερθούν μέσω του νερού, του αέρα και του εδάφους και να εισέλθουν σε διαφορετικά οικοσυστήματα. Η μικρή διάστασή τους επιτρέπει επίσης την πρόσληψή τους από διάφορους υδρόβιους οργανισμούς, γεγονός που δημιουργεί ανησυχία σχετικά με την πιθανή μεταφορά τους μέσω των τροφικών αλυσίδων (Cole et al., 2011).

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η σχέση μεταξύ της παραγωγής μικροπλαστικών και των προϊόντων ατομικής προστασίας μιας χρήσης, των οποίων η κατανάλωση αυξήθηκε σημαντικά κατά τη διάρκεια της πανδημίας COVID-19. Οι χειρουργικές μάσκες και οι μάσκες υψηλής προστασίας, όπως οι FFP2 και KN95, αποτελούνται σε μεγάλο βαθμό από συνθετικά πολυμερή. Ένα από τα σημαντικότερα υλικά που χρησιμοποιούνται στην κατασκευή τους είναι το πολυπροπυλένιο (PP), το οποίο συναντάται στις στρώσεις της μάσκας και ιδιαίτερα στο εσωτερικό φίλτρο τύπου melt-blown. Όταν οι μάσκες αυτές απορρίπτονται ανεξέλεγκτα στο φυσικό περιβάλλον, τα πολυμερή υλικά τους μπορούν σταδιακά να υποστούν φθορά και κατακερματισμό, μετατρέποντας τις χρησιμοποιημένες μάσκες σε πιθανή πηγή μικροπλαστικών ινών και σωματιδίων (Fadare & Okoffo, 2020).

Παρουσιάζεται μεγάλη ποσότητα μασκών που απορρίφθηκαν σε δρόμους, ακτές και υδάτινα οικοσυστήματα κατά την περίοδο της πανδημίας, με αποτέλεσμα να δημιουργήσει έναν πρόσθετο τύπο πλαστικού αποβλήτου. Λόγω της πολυμερικής τους σύστασης, οι μάσκες μιας χρήσης μπορούν να συμβάλουν στην παραγωγή δευτερογενών μικροπλαστικών όταν παραμένουν εκτεθειμένες για μεγάλο χρονικό διάστημα στις εξωτερικές περιβαλλοντικές συνθήκες. Η έκθεση στην ηλιακή ακτινοβολία, στην υγρασία και στη μηχανική καταπόνηση διευκολύνει την υποβάθμιση των ινών και τον σχηματισμό μικρότερων πλαστικών σωματιδίων, τα οποία μπορούν στη συνέχεια να διασπαρούν στο περιβάλλον (Aragaw, 2020).

Η περιβαλλοντική γήρανση των μασκών αποτελεί ιδιαίτερα σημαντικό παράγοντα όσον αφορά την απελευθέρωση μικροπλαστικών. Η έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία μπορεί να προκαλέσει μεταβολές στη δομή και στις μηχανικές ιδιότητες των πολυμερών, μειώνοντας την ανθεκτικότητά του υλικού και διευκολύνοντας τον κατακερματισμό του. Παράλληλα, η μηχανική τριβή που μπορεί να

προκύψει από την επαφή των απορριφθεισών μασκών με άμμο, χώμα ή άλλες επιφάνειες μπορεί να ενισχύσει περαιτέρω την απελευθέρωση πλαστικών ινών και μικροσκοπικών σωματιδίων (Wang et al., 2021).

Οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις των μικροπλαστικών σχετίζονται όχι μόνο με την παραμονή τους στο φυσικό περιβάλλον αλλά και με τη δυνατότητα αλληλεπίδρασής τους με άλλους ρύπους. Η επιφάνειά τους μπορεί να προσροφά διάφορες χημικές ουσίες που βρίσκονται στο περιβάλλον, ενώ παράλληλα τα ίδια τα πλαστικά υλικά μπορούν να περιέχουν πρόσθετες ουσίες που έχουν χρησιμοποιηθεί κατά την παραγωγή τους. Για τον λόγο αυτό, η περιβαλλοντική συμπεριφορά τους εξαρτάται από το είδος του πολυμερούς, το μέγεθος και το σχήμα των σωματιδίων, τη συγκέντρωσή τους και τις συνθήκες του οικοσυστήματος στο οποίο βρίσκονται (Cole et al., 2011).

Η μικρή διάστασή τους και το χαμηλό τους βάρος διευκολύνουν τη μεταφορά τους μέσω του αέρα και των υδάτινων ρευμάτων, γεγονός που οδηγεί στη συσσώρευσή τους ακόμη και σε απομακρυσμένες περιοχές. Η παρουσία μικροπλαστικών στο περιβάλλον αποτελεί σημαντική απειλή για τα οικοσυστήματα. Λόγω του μικρού τους μεγέθους, μπορούν να καταποθούν εύκολα από υδρόβιους οργανισμούς, όπως πλαγκτόν, ψάρια και οστρακοειδή. (Biology Insights, 2025)

Η κατάποση αυτή μπορεί να προκαλέσει:

- φυσική απόφραξη του πεπτικού συστήματος
- μείωση της πρόσληψης τροφής
- μεταφορά τοξικών ουσιών στον οργανισμό

Επιπλέον, τα μικροπλαστικά λειτουργούν ως φορείς ρύπων, καθώς η επιφάνειά τους μπορεί να προσροφά επικίνδυνες χημικές ουσίες, όπως φυτοφάρμακα και ανθεκτικούς οργανικούς ρύπους. Μέσω της τροφικής αλυσίδας, οι επιπτώσεις αυτές μπορεί να επεκταθούν και στον άνθρωπο. Τα μικροπλαστικά από πολυπροπυλένιο είναι ιδιαίτερα ανθεκτικά και διασπείρονται ευρέως στο περιβάλλον. Έχουν ανιχνευθεί σε θαλάσσια και γλυκά νερά, εδάφη, καθώς και στην ατμόσφαιρα. (Biology Insights, 2026)

Στο πλαίσιο της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής των προϊόντων που χρησιμοποιήθηκαν κατά την πανδημία COVID-19, η πιθανή παραγωγή μικροπλαστικών αποτελεί επομένως σημαντική παράμετρο κατά την αξιολόγηση του σταδίου τέλους ζωής των προϊόντων. Η σωστή συλλογή και διαχείριση των χρησιμοποιημένων μασκών, η αποτροπή της ανεξέλεγκτης απόρριψής τους στο φυσικό περιβάλλον και η διερεύνηση εναλλακτικών υλικών με μικρότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα μπορούν να συμβάλουν στον περιορισμό της συγκεκριμένης μορφής ρύπανσης. Η παράμετρος αυτή αποκτά

ιδιαίτερη σημασία κατά τη σύγκριση συμβατικών πολυμερικών υλικών με ανακυκλώσιμες, βιοδιασπώμενες ή άλλες περισσότερο αειφόρες εναλλακτικές λύσεις.

3 Υλικά

3.1 Γενικά

Τα προϊόντα ατομικής προστασίας, ιδιαίτερα κατά τη διάρκεια της πανδημίας COVID-19, κατασκευάζονται κυρίως από συνθετικά πολυμερή υλικά. Το βασικό συστατικό τους είναι το πολυπροπυλένιο (polypropylene), ένα θερμοπλαστικό πολυμερές που χρησιμοποιείται ευρέως λόγω του χαμηλού κόστους, της αντοχής και της υψηλής ικανότητας φιλτραρίσματος (Memon et al., 2024). Τα υλικά αυτά διαμορφώνονται σε μορφή μη υφαντού υφάσματος (non-woven), το οποίο παράγεται μέσω τεχνικών όπως η μέθοδος spunbond και melt-blown, που επιτρέπουν τη δημιουργία λεπτών ινών με μεγάλη επιφάνεια και αποτελεσματικότητα στη συγκράτηση σωματιδίων (Fang et al., 2025).

Οι περισσότερες μάσκες, όπως οι χειρουργικές και FFP2, αποτελούνται από πολλαπλά στρώματα. Τα εξωτερικά στρώματα προσφέρουν μηχανική αντοχή και προστασία, ενώ το ενδιάμεσο στρώμα, γνωστό ως melt-blown φίλτρο, είναι υπεύθυνο για τη βασική λειτουργία φιλτραρίσματος, συγκρατώντας μικροσωματίδια, βακτήρια και ιούς (Memon et al., 2024). Παράλληλα, οι μάσκες περιλαμβάνουν και πρόσθετα υλικά, όπως μεταλλικά ελάσματα για καλύτερη προσαρμογή στη μύτη και ελαστικά στοιχεία (λάστιχα) για τη στερέωση πίσω από τα αυτιά.

Παρά την υψηλή αποτελεσματικότητά τους στην προστασία της δημόσιας υγείας, τα υλικά αυτά παρουσιάζουν σημαντικά περιβαλλοντικά μειονεκτήματα. Επειδή πρόκειται κυρίως για πλαστικά μίας χρήσης, δεν βιοδιασπώνται εύκολα και μπορούν να οδηγήσουν στη δημιουργία μικροπλαστικών στο περιβάλλον (Chen et al., 2021). Η μαζική παραγωγή και απόρριψη масκών έχει αυξήσει τον όγκο των πλαστικών αποβλήτων, συμβάλλοντας στη ρύπανση εδαφών και υδάτων, καθώς και στη διαταραχή των οικοσυστημάτων (UNEP, 2022). Επιπλέον, η αποσύνθεση των масκών οδηγεί στην απελευθέρωση μικροπλαστικών και χημικών ουσιών, τα οποία μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τόσο τους υδάτινους οργανισμούς όσο και την ανθρώπινη υγεία (Anene et al., 2025).

Τα υλικά χαμηλού ανθρακικού αποτυπώματος (low-carbon materials) αποτελούν βασικό στοιχείο της βιώσιμης ανάπτυξης, καθώς σχεδιάζονται ώστε να μειώνουν τις εκπομπές άνθρακα σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής τους, από την εξόρυξη των πρώτων υλών έως την τελική διάθεση ή ανακύκλωσή τους. Χαρακτηρίζονται από ιδιότητες όπως το χαμηλό βάρος, η δυνατότητα ανακύκλωσης και επανακατασκευής, η μεγάλη διάρκεια ζωής, οι μειωμένες απαιτήσεις συντήρησης, η χρήση ανανεώσιμων ή βιολογικής προέλευσης πρώτων υλών και η ασφάλεια για την ανθρώπινη υγεία. Η ανάπτυξή τους βασίζεται στη μείωση της κατανάλωσης πρώτων υλών, ενέργειας και νερού, καθώς και στον περιορισμό των εκπομπών και των αποβλήτων κατά την παραγωγή. Παράλληλα, δίνεται έμφαση στην αύξηση της ανακυκλωσιμότητας, της επαναχρησιμοποίησης και της κομποστοποίησης

των προϊόντων στο τέλος της ζωής τους, υποστηρίζοντας τις αρχές της κυκλικής οικονομίας. Σημαντικές στρατηγικές περιλαμβάνουν τη χρήση τοπικών και ανανεώσιμων πόρων, την ενσωμάτωση ανακυκλωμένων υλικών, την αξιοποίηση ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και την αποτελεσματική διαχείριση των αποβλήτων. (Kaynak et al., 2025).

Παρακάτω θα εμβαθύνουμε σε υλικά που χρησιμοποιούνται ήδη για την παραγωγή των μασκών αλλά και υλικά που μελετήθηκαν στην παρούσα διπλωματική με σκοπό ένα καλύτερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

3.2 Πολυπροπυλένιο (Polypropylene) - PP

3.2.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

Το πολυπροπυλένιο (polypropylene, PP) είναι ένα θερμοπλαστικό πολυμερές που ανήκει στην οικογένεια των πολυолеφινών και παράγεται μέσω πολυμερισμού του μονομερούς προπυλενίου. Αποτελεί ένα από τα πιο διαδεδομένα πλαστικά υλικά παγκοσμίως, λόγω του χαμηλού κόστους παραγωγής, της ευκολίας επεξεργασίας και των εξαιρετικών φυσικοχημικών ιδιοτήτων του (TDD Global, 2026). Αποτελείται από επαναλαμβανόμενες μονάδες $(C_3H_6)_n$ και παράγεται μέσω αντίδρασης πολυμερισμού του προπυλενίου, συνήθως με τη χρήση καταλυτών τύπου Ziegler–Natta ή μεταλλοκενικών καταλυτών (SpecialChem, 2026).

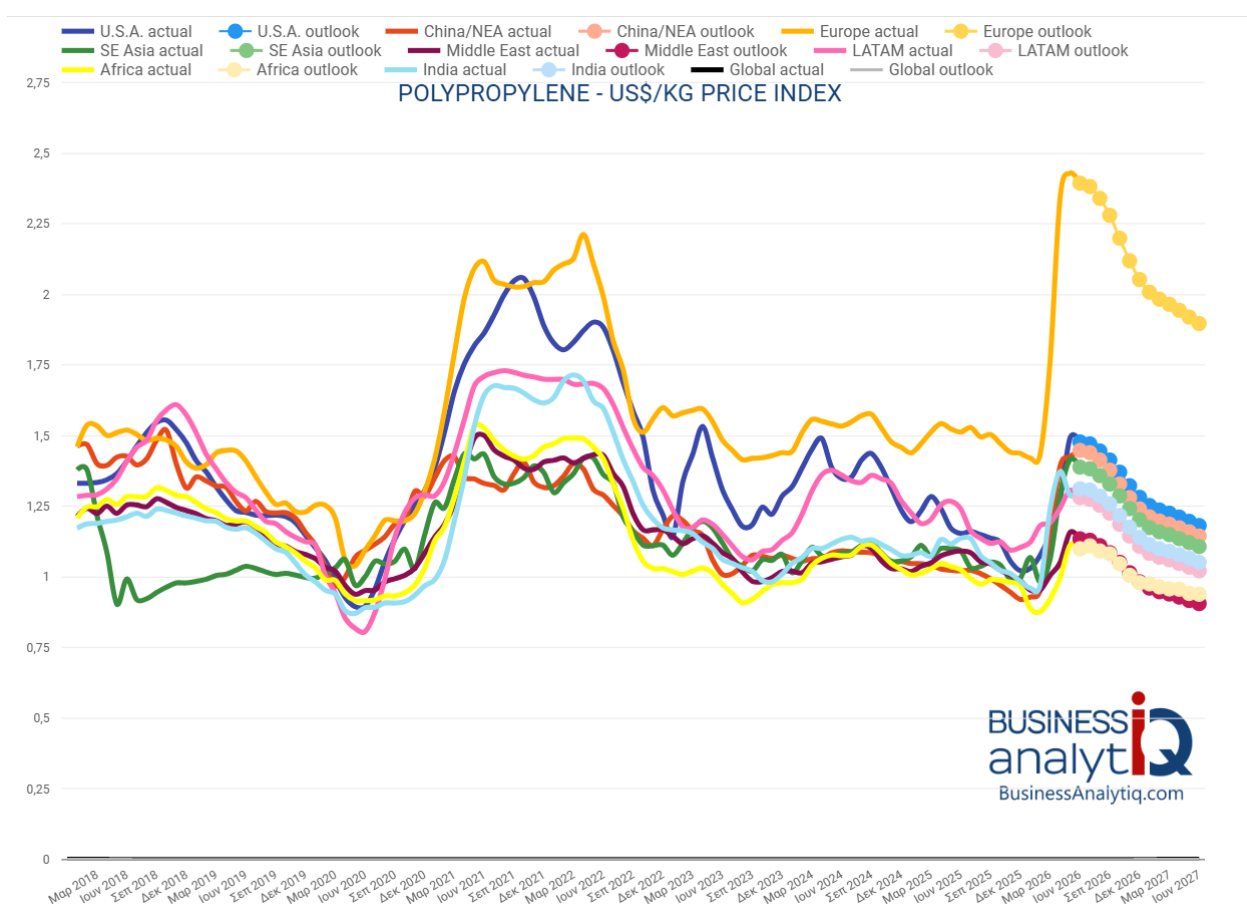
Το υλικό χαρακτηρίζεται ως ημικρυσταλλικό, γεγονός που του προσδίδει καλή ισορροπία μεταξύ αντοχής, σκληρότητας και ευκαμψίας. Επιπλέον, εμφανίζεται συνήθως ως λευκό ή ημιδιαφανές υλικό, με χαμηλή πυκνότητα (περίπου $0.89\text{--}0.91\text{ g/cm}^3$), καθιστώντας το ένα από τα ελαφρύτερα εμπορικά πλαστικά. (TDD Global, 2026). Το σημείο τήξης του κυμαίνεται συνήθως μεταξύ $160\text{--}170\text{ }^\circ\text{C}$, ενώ το εύρος θερμοκρασίας λειτουργίας του είναι από $-20\text{ }^\circ\text{C}$ έως $120\text{ }^\circ\text{C}$, καλύπτοντας τις απαιτήσεις των περισσότερων εφαρμογών. (TDD Global, 2026).

Ανακαλύφθηκε τυχαία από τους επιστήμονες Paul Hogan και Robert Banks το 1951, ενώ εργάζονταν στην εταιρεία Phillips Petroleum. Στη συνέχεια, η Phillips Petroleum ξεκίνησε την πρώτη εμπορική παραγωγή πολυπροπυλενίου το 1954. Το υλικό αρχικά διατέθηκε στην αγορά ως PP και αργότερα με την εμπορική ονομασία “Marlex”. (Hossain et al., 2024). Μέσα στα χρόνια άλλαξε η σύστασή του με αποκορύφωμα τη δεκαετία του 2000, όπου η πρόοδος στην επιστήμη των πολυμερών και η συνεχής έρευνα οδήγησαν στην ανάπτυξη νέων ποιοτήτων και συνθέσεων πολυπροπυλενίου, διευρύνοντας περαιτέρω το φάσμα των ιδιοτήτων και εφαρμογών του (Hossain et al., 2024).

Αποτελεί το δεύτερο περισσότερο παραγόμενο πλαστικό μετά το πολυαιθυλένιο, καλύπτοντας περίπου το 17% της ετήσιας παγκόσμιας παραγωγής πλαστικών. Ως πλαστικό κατάλληλο για επαφή

με τρόφιμα, με υψηλή ευκαμψία και αντοχή σε διάτρηση, το PP έχει εκτεταμένες εφαρμογές σε συσκευασίες σνακ και φαρμάκων, καθώς και στη βιομηχανία παραγωγής (Bonée, 2024).

Το πολυπροπυλένιο (PP) αποτελεί ένα από τα πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα θερμοπλαστικά πολυμερή, κυρίως λόγω του χαμηλού του κόστους και των ικανοποιητικών μηχανικών του ιδιοτήτων. Η τιμή του στην ευρωπαϊκή αγορά κυμαίνεται συνήθως περίπου μεταξύ 1,3 και 2,3 USD/kg ($\approx$ 1,2–2,1 €/kg), και στην Κίνα κάτω από 1€/kg (τη δεδομένη χρονική περίοδο) ανάλογα με τις συνθήκες αγοράς και το κόστος των πρώτων υλών, το οποίο εξαρτάται άμεσα από τις τιμές του πετρελαίου. Το γεγονός ότι είναι τόσο οικονομικό το καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικό για εφαρμογές μαζικής παραγωγής, όπως τα ιατρικά προϊόντα και υλικά ατομικής προστασίας. (Business Analytiq, 2026).



Σχήμα 3: Διακύμανση της τιμής του Πολυπροπυλενίου από το Μάιο του 2018 έως τον Ιούνιο του 2027 (Business Analytiq, 2026).

Σύμφωνα με το παραπάνω παρατηρούμε ότι την περίοδο του COVID-19 υπήρχε μεγάλη άνοδος στην τιμή του πολυπροπυλενίου, λόγω της υψηλής του ζήτησης, όπως και τώρα λόγω του πολέμου με την αύξηση της τιμής του πετρελαίου αυξήθηκε και η τιμή της πρώτης ύλης.

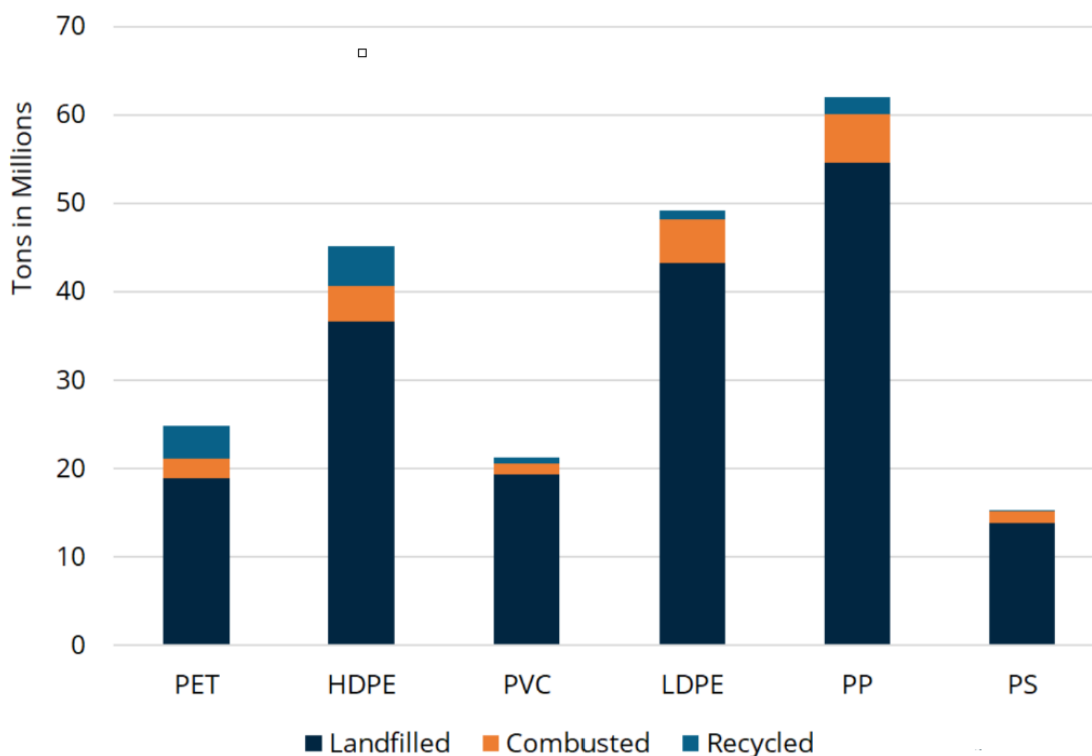
3.2.2 Πολυπροπυλένιο: Ανακύκλωση & Βιοδιάσπαση

Το πλαστικό Πολυπροπυλένιο επισημαίνεται με τον κωδικό αναγνώρισης ρητίνης αριθμό 5 στο κάτω μέρος των συσκευασιών (κωδικός ανακύκλωσης #5) είναι θεωρητικά ανακυκλώσιμο υλικό, μέσω κυρίως μηχανικής επεξεργασίας που περιλαμβάνει τήξη και επαναδιαμόρφωση του πολυμερούς. (Bonée, 2024)

Identification code	Plastic type	Monomer
 PETE	PET 	$\left[\text{O}-\text{C}(=\text{O})-\text{C}_6\text{H}_4-\text{C}(=\text{O})-\text{O}-(\text{CH}_2)_2 \right]_n$
 HDPE	HDPE 	$\left(\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} \right)_n$
 PVC	PVC 	$\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{Cl} \\ \backslash \quad / \\ \text{C}=\text{C} \\ / \quad \backslash \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array}$
 LDPE	LDPE 	$\left(\begin{array}{c} \text{H} \quad \text{H} \\ \quad \\ -\text{C}-\text{C}- \\ \quad \\ \text{H} \quad \text{H} \end{array} \right)_n$
 PP	PP 	$\left[\begin{array}{c} \text{CH}_3 \\ \\ -\text{C}-\text{CH}_2- \\ \\ \text{H} \end{array} \right]_n$
 PS	PS 	$\left[\begin{array}{c} \text{C}_6\text{H}_5 \\ \\ -\text{C}-\text{CH}_2- \\ \\ \text{H} \end{array} \right]_n$
 OTHER	Other 	$\left[\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ -\text{C}-\text{O}- \\ \\ \text{H} \end{array} \right]_n$; $\begin{array}{c} \text{H} \\ \\ \text{H}-\text{C}=\text{C}-\text{C}\equiv\text{N} \\ \\ \text{H} \end{array}$

Σχήμα 4: Λίστα με τα πιο κοινά πλαστικά και ο κωδικός ανακύκλωσης (García-López et al., 2024)

Ωστόσο, παρά τις ποικίλες εφαρμογές και τη μεγάλη ζήτηση για το PP, το ποσοστό ανακύκλωσής του παραμένει εξαιρετικά χαμηλό. Συγκεκριμένα, μόλις στο 3%, το ποσοστό αυτό είναι σημαντικά μικρότερο σε σύγκριση με εκείνο του πολυαιθυλενίου υψηλής πυκνότητας (10%) και του τερεφθαλικού πολυαιθυλενίου (15%). (Bonée, 2024)



Σχήμα 5: Διαχείριση πλαστικών αποβλήτων ανά τύπο πολυμερούς και μέθοδο τελικής διάθεσης (Bonée, 2024)

Παρόλο που υπάρχει δυνατότητα ανακύκλωσης, τα πραγματικά ποσοστά όπως είδαμε και παραπάνω, παραμένουν χαμηλά λόγω τεχνικών δυσκολιών διότι είναι ευαίσθητο στις υψηλές θερμοκρασίες με αποτέλεσμα την αλλοίωση του, με αντίκτυπο την μόλυνση των αποβλήτων και η υποβάθμιση των ιδιοτήτων του υλικού μετά από επαναλαμβανόμενους κύκλους χρήσης, αντέχει μόνο 2-3 κύκλους ανακύκλωσης (Bonée, 2024).

Η ανακύκλωση των πλαστικών πραγματοποιείται κυρίως μέσω αποπολυμερισμού, μερικής οξειδωσης ή πυρόλυσης (cracking). Ο αποπολυμερισμός είναι αποτελεσματικός για πολυαμίδια και πολυεστέρες, όπως το PET, αλλά δεν είναι κατάλληλος για το πολυπροπυλένιο (PP). Για τον λόγο αυτό, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζουν οι φωτοκαταλυτικές μέθοδοι και ειδικότερα το photoreforming, μία βιώσιμη τεχνολογία που αξιοποιεί το φως, το νερό και έναν φωτοκαταλύτη για την ταυτόχρονη αποδόμηση πλαστικών αποβλήτων και την παραγωγή καθαρού υδρογόνου (H_2) σε συνθήκες περιβάλλοντος. Κατά τη διαδικασία αυτή, το νερό ανάγεται παράγοντας υδρογόνο, ενώ τα οργανικά υλικά οξειδώνονται είτε πλήρως σε διοξείδιο του άνθρακα CO_2 και νερό H_2O είτε μετατρέπονται σε χημικές ενώσεις υψηλότερης προστιθέμενης αξίας. Πρόσφατες έρευνες δείχνουν ότι οι φωτοκαταλυτικές μέθοδοι είναι πιο φιλικές προς το περιβάλλον σε σχέση με τις θερμοκαταλυτικές διεργασίες, αν και βρίσκονται ακόμη σε πρώιμο στάδιο ανάπτυξης. Μελέτες έχουν

αποδεικνύει ότι το πολυπροπυλένιο (PP) μπορεί να μετατραπεί φωτοκαταλυτικά σε υδρογόνο, αέριο σύνθεσης (syngas) ή πολύτιμες χημικές ουσίες, όπως γλυκολικό οξύ, οξικό οξύ και μυρμηκικό οξύ. Τα αποτελέσματα αυτά καταδεικνύουν ότι η φωτοκαταλυτική αναβάθμιση (upcycling) των πλαστικών αποβλήτων αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη λύση για τη συνδυασμένη αντιμετώπιση της πλαστικής ρύπανσης και της παραγωγής καθαρής ενέργειας (García-López et al., 2024).

Όσον αφορά τη βιοδιάσπαση, το πολυπροπυλένιο δεν θεωρείται βιοδιασπώμενο υλικό, καθώς η χημική του δομή παρουσιάζει υψηλή ανθεκτικότητα στη μικροβιακή αποικοδόμηση. Ο χρόνος αποδόμησής του στο περιβάλλον είναι ιδιαίτερα μεγάλος, κυμαινόμενος από εκατοντάδες έως και πάνω από χίλια έτη, ανάλογα με τις περιβαλλοντικές συνθήκες. Κατά τη διάρκεια αυτής της μακροχρόνιας διαδικασίας, το υλικό δεν αποδομείται πλήρως, αλλά διασπάται σε μικρότερα σωματίδια, συμβάλλοντας στον σχηματισμό μικροπλαστικών που επιβαρύνουν σοβαρά τα οικοσυστήματα. (Biology Insights, 2026).

3.2.3 Πολυπροπυλένιο & Μικροπλαστικά

Παρόλο που η χημική δομή του πολυπροπυλενίου το καθιστά σχετικά ανθεκτικό σε φυσικές συνθήκες, η ταχύτητα υποβάθμισής του επηρεάζεται σημαντικά από εξωτερικούς περιβαλλοντικούς παράγοντες. Ιδιαίτερα σημαντικό ρόλο διαδραματίζει η υπεριώδης ακτινοβολία (UV), η οποία μπορεί να προκαλέσει φωτοοξειδωτική γήρανση, σχηματισμό ελευθέρων ριζών, οξείδωση και θραύση των πολυμερικών αλυσίδων. Με την πάροδο του χρόνου οι διεργασίες αυτές οδηγούν σε απώλεια μηχανικών ιδιοτήτων, ευθραυστότητα και ευκολότερο κατακερματισμό του υλικού (Andersone et al., 2024).

Η παρουσία οξυγόνου και οι υψηλότερες θερμοκρασίες επιταχύνουν σημαντικά τις χημικές αντιδράσεις που ακολουθούν την αρχική φθορά από την UV ακτινοβολία. Αυτή η διεργασία, γνωστή ως φωτο-οξείδωση, είναι πολύ ταχύτερη σε καλά αεριζόμενα και ηλιόλουστα περιβάλλοντα, όπως στην επιφάνεια της θάλασσας ή σε εκτεθειμένες χερσαίες περιοχές. Αντίθετα, η αποσύνθεση είναι σημαντικά πιο αργή σε περιβάλλοντα όπου απουσιάζουν αυτοί οι παράγοντες, όπως σε ιζήματα βαθιάς θάλασσας ή στις αναερόβιες και σκοτεινές συνθήκες ενός σύγχρονου χώρου υγειονομικής ταφής (Biology Insights, 2026).

Άλλες εξωτερικές καταπονήσεις, όπως η μηχανική φθορά από τον άνεμο ή τα κύματα και οι μεταβολές στα επίπεδα υγρασίας, δεν προκαλούν άμεσα αποδόμηση του πολυμερούς, αλλά συμβάλλουν στην εξασθένησή του. Οι φυσικές αυτές δυνάμεις δημιουργούν ρωγμές και αυξάνουν την επιφάνεια του υλικού, επιτρέποντας στο φως UV και στο οξυγόνο να διεισδύουν πιο αποτελεσματικά (Andersone et al., 2024).

Η διαδικασία αποδόμησης του πολυπροπυλενίου δεν οδηγεί σε πλήρη διάλυση του υλικού, αλλά σε σταδιακό κατακερματισμό του. Αρχικά, το πλαστικό υλικό μετατρέπεται σε μικρότερα κομμάτια μέσω διαδοχικών θραύσεων της πολυμερικής αλυσίδας. Καθώς η υποβάθμιση προχωρά, το υλικό γίνεται εύθραυστο και διασπάται σε:

- μακροπλαστικά
- μεσοπλαστικά
- μικροπλαστικά (<5 mm)

Τα μικροπλαστικά αποτελούν το τελικό στάδιο αυτής της διαδικασίας και δεν είναι αποτέλεσμα βιολογικής αποδόμησης, αλλά φυσικού και χημικού κατακερματισμού (García-López et al., 2024).

Συνολικά, παρόλο που το πολυπροπυλένιο αποτελεί οικονομικά αποδοτικό και τεχνικά χρήσιμο υλικό, η περιορισμένη του ανακύκλωση και η εξαιρετικά αργή αποδόμησή του στο περιβάλλον το καθιστούν σημαντική πηγή περιβαλλοντικής ρύπανσης, ιδιαίτερα υπό το πρίσμα της αυξανόμενης παραγωγής πλαστικών αποβλήτων.

3.3 Αλουμίνιο

3.3.1 Γενικά Χαρακτηριστικά

Το αλουμίνιο (Al) είναι ένα από τα σημαντικότερα και πιο ευρέως χρησιμοποιούμενα μέταλλα στη σύγχρονη βιομηχανία. Πρόκειται για ένα ελαφρύ, ασημόλευκο μέταλλο με ατομικό αριθμό 13, το οποίο αποτελεί ένα από τα πιο άφθονα στοιχεία στον φλοιό της Γης και απαντάται κυρίως στο ορυκτό βωξίτης (Corner, 2025). Η ευρεία χρήση του οφείλεται στον συνδυασμό μοναδικών φυσικών, χημικών και μηχανικών ιδιοτήτων που παρουσιάζει. Ανακαλύφθηκε το 1825, από το Δανό Hans Christian Ørsted που ήταν ο πρώτος που παρήγαγε μικρές ποσότητες μεταλλικού αλουμινίου (Tilcon, 2026).

Το αλουμίνιο χαρακτηρίζεται από μια σειρά ιδιοτήτων που το καθιστούν ιδιαίτερα κατάλληλο για πολλές εφαρμογές. Μία από τις σημαντικότερες ιδιότητές του είναι το χαμηλό του βάρος, καθώς η πυκνότητά του είναι περίπου 2,7 g/cm³, δηλαδή περίπου το ένα τρίτο του χάλυβα. Παράλληλα, παρουσιάζει καλή μηχανική αντοχή, ιδιαίτερα όταν χρησιμοποιείται σε μορφή κραμάτων. Θερμαίνεται στους 660.3 °C που συγκριτικά με άλλα μέταλλα είναι χαμηλή θερμοκρασία (Corner, 2025).

Επιπλέον, το αλουμίνιο εμφανίζει υψηλή αντοχή στη διάβρωση, λόγω του σχηματισμού ενός λεπτού προστατευτικού στρώματος οξειδίου (Al₂O₃) στην επιφάνειά του, το οποίο εμποδίζει την

περαιτέρω οξείδωση (Corner, 2025). Διακρίνεται επίσης για την καλή θερμική και ηλεκτρική αγωγιμότητα, γεγονός που επιτρέπει τη χρήση του σε ηλεκτρικές εφαρμογές και συστήματα μεταφοράς θερμότητας (Ελληνική Ένωση Αλουμινίου, 2026)

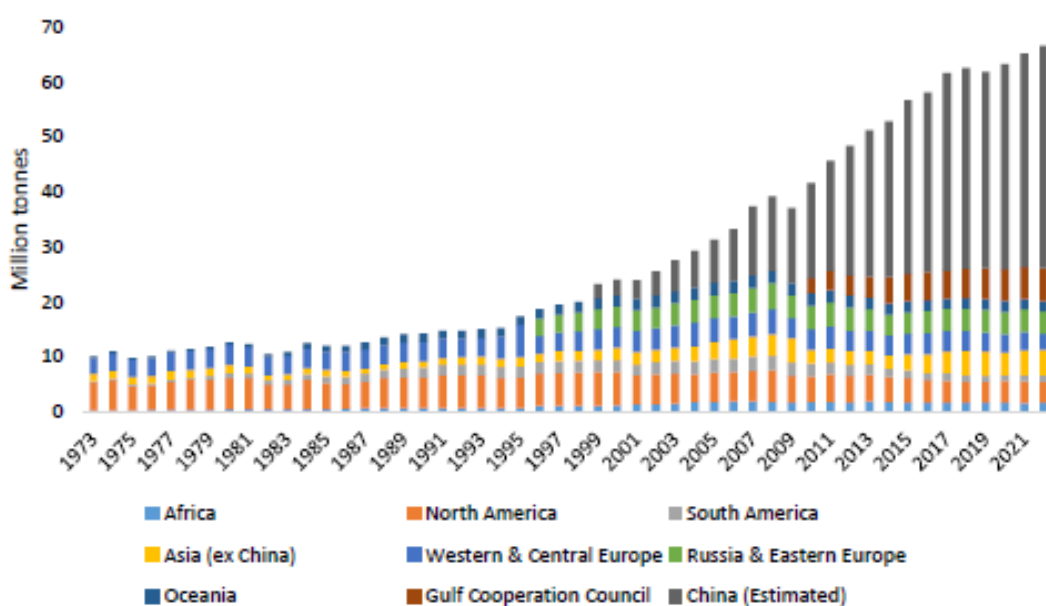
Άλλες σημαντικές ιδιότητες είναι η ευκολία κατεργασίας και μορφοποίησης (όλκιμο και εύπλαστο υλικό), η μη τοξικότητα, η μη μαγνητική συμπεριφορά και η υψηλή ανακλαστικότητα στο φως και τη θερμότητα. Ο συνδυασμός αυτών των χαρακτηριστικών καθιστά το αλουμίνιο ένα εξαιρετικά ευέλικτο υλικό (Tilcon, 2026).

Το αλουμίνιο δεν βρίσκεται στη φύση σε καθαρή μορφή, αλλά εξάγεται κυρίως από τον βωξίτη. Η παραγωγή του περιλαμβάνει δύο βασικά στάδια:

- Μετατροπή του βωξίτη σε αλουμίνια (Al_2O_3) μέσω της διαδικασίας Bayer
- Ηλεκτρολυτική παραγωγή μεταλλικού αλουμινίου μέσω της διαδικασίας Hall-Héroult (Tilcon, 2026).

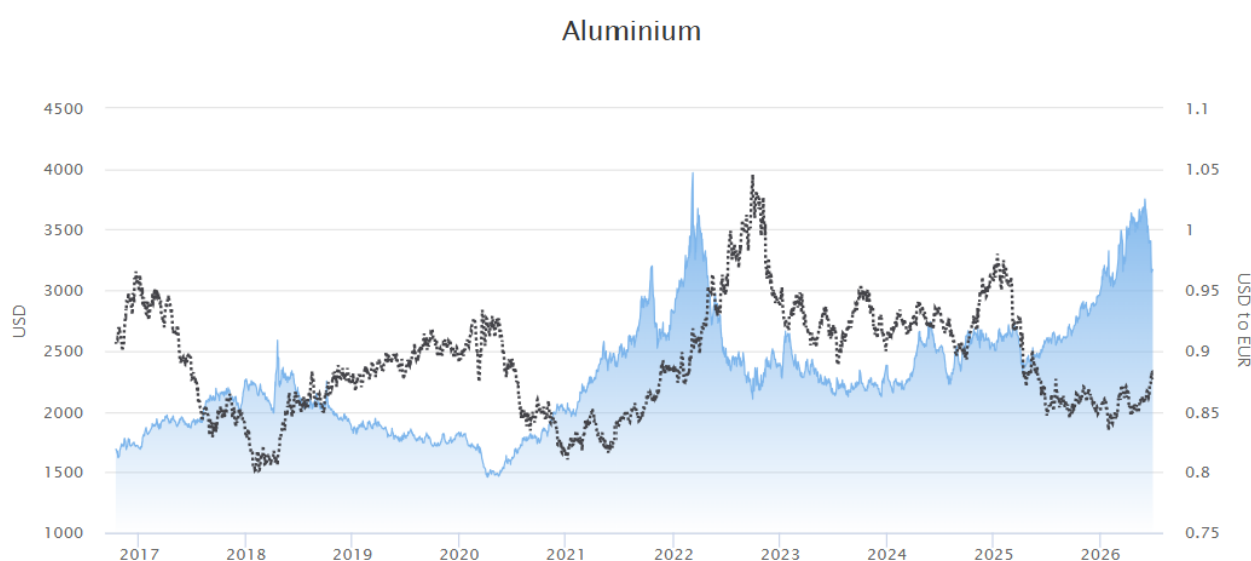
Η διαδικασία αυτή είναι ενεργοβόρα, γεγονός που επηρεάζει σημαντικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα του υλικού.

Κυρίως παραγωγή έχουν χώρες με φθινό ενεργειακό κόστος, όπως η υδροηλεκτρική ενέργεια σε Καναδά και Νορβηγία ή με ισχυρή ανεπτυγμένη βιομηχανική υποδομή που είναι η Κίνα και Ινδία. Πιο συγκεκριμένα οι κύριες χώρες παραγωγής αλουμινίου είναι η Κίνα, η οποία κυριαρχεί παγκοσμίως καλύπτοντας περίπου το 60% της παραγωγής, ακολουθούμενη από την Ινδία, τη Ρωσία, τον Καναδά και τα Ηνωμένα Αραβικά Εμιράτα (Statranker, 2025).



Σχήμα 6: Παραγωγή αλουμινίου ανά γεωγραφική περιοχή, 1973–2021 (Zore, 2024)

Η τιμή του πρωτογενούς αλουμινίου κυμαίνεται περίπου μεταξύ 2,8–3,2 €/kg, ενώ τα επεξεργασμένα προϊόντα αλουμινίου παρουσιάζουν υψηλότερο κόστος λόγω κατεργασίας, φτάνοντας έως και 8 €/kg. Αντίθετα, η αξία του σκραπ αλουμινίου είναι σημαντικά χαμηλότερη, κυμαινόμενη περίπου από 0,6 έως 1,8 €/kg (Alumeco Group, 2026)



Σχήμα 7: Διαχρονική εξέλιξη της τιμής του αλουμινίου σε δολάρια ΗΠΑ και της συναλλαγματικής ισοτιμίας USD/EUR κατά την περίοδο 2017–2026 (Alumeco Group, 2026)

Το αλουμίνιο χρησιμοποιείται σε ένα ευρύ φάσμα εφαρμογών λόγω των ιδιοτήτων του. Στον κατασκευαστικό τομέα αξιοποιείται σε κουφώματα, στέγες και προσόψεις κτιρίων, ενώ στη βιομηχανία μεταφορών χρησιμοποιείται για την κατασκευή αυτοκινήτων, αεροσκαφών και πλοίων, μειώνοντας το βάρος και την κατανάλωση ενέργειας. (Sun, 2023)

Επιπλέον, χρησιμοποιείται ευρέως:

- Στη συσκευασία τροφίμων (κουτιά, αλουμινόχαρτο) λόγω της αδιαπερατότητας σε φως και υγρασία
- Στα ηλεκτρικά συστήματα ως αγωγός
- Σε οικιακά σκεύη και εξοπλισμό
- Στον τομέα της ενέργειας και ηλεκτρονικών

Η δυνατότητα σχηματισμού κραμάτων με άλλα στοιχεία βελτιώνει περαιτέρω τις μηχανικές του ιδιότητες, επεκτείνοντας τις εφαρμογές του σε απαιτητικούς τομείς όπως η αεροναυπηγική (Sun, 2023).

3.3.2 Αλουμίνιο: Ανακύκλωση και περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Ωστόσο, η πρωτογενής παραγωγή αλουμινίου είναι ιδιαίτερα ενεργοβόρα και συνδέεται με περιβαλλοντικές επιπτώσεις, όπως εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου και παραγωγή αποβλήτων (π.χ. κόκκινη λάσπη). Για τον λόγο αυτό, η ενίσχυση της ανακύκλωσης και η βελτίωση των τεχνολογιών παραγωγής αποτελούν βασικούς στόχους της βιώσιμης ανάπτυξης (Silveira et al., 2021). Το αλουμίνιο αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα υλικά που ανήκουν στα μέταλλα της σύγχρονης βιομηχανίας, με ευρεία χρήση σε τομείς όπως οι συσκευασίες, μεταφορές, κατασκευές και ηλεκτρολογικός εξοπλισμός. Ως αποτέλεσμα της εκτεταμένης χρήσης του, μεγάλες ποσότητες αλουμινίου καταλήγουν απορρίματα μετά το τέλος του κύκλου ζωής των προϊόντων. Τα απορρίματα αλουμινίου προέρχονται τόσο από βιομηχανικές διαδικασίες παραγωγής όσο και από μεταχειρισμένα προϊόντα που έχουν ολοκληρώσει τον κύκλο ζωής τους.

Σε αντίθεση με πολλά άλλα υλικά, το αλουμίνιο δεν βιοδιασπάται στο περιβάλλον. Ωστόσο, η περιβαλλοντική του επιβάρυνση είναι σημαντικά μικρότερη όταν συλλέγεται και ανακυκλώνεται αποτελεσματικά. Το υλικό μπορεί να ανακυκλωθεί απεριόριστες φορές χωρίς να χάνει τις μηχανικές ή χημικές του ιδιότητες, γεγονός που το καθιστά ιδιαίτερα κατάλληλο για εφαρμογές κυκλικής οικονομίας. Περισσότεροι από 30 εκατομμύρια τόνοι αλουμινίου ανακυκλώνονται κάθε χρόνο παγκοσμίως, ενώ το παγκόσμιο ποσοστό αποδοτικότητας ανακύκλωσης ανέρχεται περίπου στο 76%. Η ανακύκλωσή του είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς απαιτεί μόλις περίπου 5% της ενέργειας που χρειάζεται για την πρωτογενή παραγωγή. Αυτό συνεπάγεται σημαντική εξοικονόμηση πόρων και μείωση εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (International Aluminium Institute, 2025).



Σχήμα 8: Οι βασικές θεματικές ενότητες που σχετίζονται με τη βιωσιμότητα, τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις και τον κύκλο ζωής του αλουμινίου. (International Aluminium Institute, 2025)

Η ανακύκλωση των αποβλήτων αλουμινίου παρουσιάζει σημαντικά περιβαλλοντικά οφέλη. Η παραγωγή δευτερογενούς αλουμινίου από ανακυκλωμένο υλικό απαιτεί πολύ λιγότερη ενέργεια σε σύγκριση με την παραγωγή πρωτογενούς αλουμινίου από βωξίτη. Ως αποτέλεσμα, μειώνονται οι εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, η κατανάλωση φυσικών πόρων και οι περιβαλλοντικές πιέσεις που σχετίζονται με τις εξορυκτικές δραστηριότητες. Παράλληλα, η αξιοποίηση ανακυκλωμένου αλουμινίου συμβάλλει στη μείωση του όγκου των αποβλήτων που καταλήγουν σε χώρους υγειονομικής ταφής (Morris, 2025).

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση λειτουργούν περισσότερες από 100 μονάδες ανακύκλωσης αλουμινίου, οι οποίες διαφέρουν ως προς το μέγεθος, τη δυναμικότητα και τον τομέα εξειδίκευσής τους. Η ακριβής ποσότητα του αλουμινίου που ανακυκλώνεται είναι δύσκολο να προσδιοριστεί, καθώς δεν υπάρχουν πλήρη και εναρμονισμένα διαθέσιμα δεδομένα για όλες τις χώρες. Ωστόσο, σύμφωνα με μελέτη του Κοινού Κέντρου Ερευνών της Ευρωπαϊκής Επιτροπής (Joint Research Centre – JRC), εκτιμάται ότι

το 2019 χρησιμοποιήθηκαν περίπου 5,6 εκατομμύρια τόνοι νέων και παλαιών απορριμμάτων αλουμινίου (scrap) για την παραγωγή αλουμινίου στην Ευρώπη. Η εκτίμηση αυτή βασίστηκε στη δευτερογενή παραγωγική ικανότητα ανακύκλωσης που διαθέτει κάθε κράτος μέλος (Zore, 2024).

Τα μετακαταναλωτικά απορρίμματα αλουμινίου προέρχονται από προϊόντα που έχουν ολοκληρώσει τον κύκλο ζωής τους, όπως κουτιά αναψυκτικών, εξαρτήματα οχημάτων και δομικά υλικά. Λόγω της μακροχρόνιας χρήσης τους, συχνά περιέχουν διάφορες προσμίξεις και ρύπους, γεγονός που καθιστά απαραίτητη την εφαρμογή προηγμένων διαδικασιών διαλογής και προεπεξεργασίας πριν από την ανακύκλωσή τους (European Aluminium, 2018). Για την απομάκρυνση των ανεπιθύμητων υλικών χρησιμοποιούνται τεχνικές όπως ο τεμαχισμός, ο μαγνητικός διαχωρισμός και ο διαχωρισμός με επαγωγικά ρεύματα, οι οποίες βελτιώνουν την ποιότητα του ανακτώμενου μετάλλου αλλά αυξάνουν τις ενεργειακές απαιτήσεις της διαδικασίας. Παρά τις τεχνικές αυτές προκλήσεις, τα μετακαταναλωτικά απορρίμματα αποτελούν πολύτιμη πηγή δευτερογενούς αλουμινίου, συμβάλλοντας στη μείωση της κατανάλωσης φυσικών πόρων, στον περιορισμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της πρωτογενούς παραγωγής και στην ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας (Zore, 2024).

Η ορθή διαχείριση των αποβλήτων αλουμινίου θεωρείται κρίσιμη για τη βιώσιμη ανάπτυξη. Η συλλογή, ο διαχωρισμός και η ανακύκλωση των αλουμινένιων προϊόντων συμβάλλουν στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων της βιομηχανίας και στην εξοικονόμηση ενεργειακών πόρων. Για τον λόγο αυτό, πολλές χώρες εφαρμόζουν προγράμματα ανακύκλωσης συσκευασιών αλουμινίου και ενθαρρύνουν τη χρήση ανακυκλωμένου μετάλλου στην παραγωγή νέων προϊόντων (Morris, 2025).

Συνεπώς, ενώ τα υλικά που χρησιμοποιούνται στις μάσκες προσφέρουν υψηλό επίπεδο προστασίας, δημιουργούν ταυτόχρονα σημαντικές προκλήσεις όσον αφορά τη διαχείριση αποβλήτων και την περιβαλλοντική βιωσιμότητα. Άρα υπάρχει ανάγκη για εύρεση υλικών όπου θα έχουν χαμηλό ανθρακικό αποτύπωμα.

3.4 Ίνες από Μπανάνα / Banana Fiber

3.4.1 Γενικά

Οι ίνες μπανάνας (banana fibers) αποτελούν μία από τις πλέον υποσχόμενες φυσικές λιγνοκυτταρινικές ίνες που προέρχονται από το ψευδοστέλεχος του φυτού της μπανάνας (*Musa species*). Το υλικό αυτό προκύπτει ως υποπροϊόν της αγροτικής παραγωγής μετά τη συγκομιδή των καρπών και παραδοσιακά θεωρούνταν γεωργικό απόβλητο (Siddiqui, 2026). Οι ίνες μπανάνας είναι λιγνοκυτταρινικές ίνες που αποτελούνται κυρίως από κυτταρίνη, ημικυτταρίνη και λιγνίνη. Η υψηλή

περιεκτικότητα σε κυτταρίνη είναι υπεύθυνη για τη σημαντική μηχανική αντοχή και ακαμψία τους. Παρουσιάζουν επίσης χαμηλή πυκνότητα, γεγονός που τις καθιστά ελκυστικές για εφαρμογές όπου απαιτούνται ελαφριά υλικά με καλές μηχανικές ιδιότητες (Nurcahyani et al., 2026).

Οι ίνες αυτές χαρακτηρίζονται από υψηλή αναλογία αντοχής προς βάρος, βιοδιασπασιμότητα, ανανεωσιμότητα και χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σύγκριση με συνθετικές ίνες όπως ο πολυεστέρας (Ansys, 2022). Η μπανάνα καλλιεργείται σε περισσότερες από 130 χώρες παγκοσμίως με πρωτοπόρες την Ινδία με παραγωγή περίπου στα 30 εκατομμύρια τόνους και δεύτερη την Κίνα με 10 εκατομμύρια τόνους και στο σύνολο η ετήσια παραγωγή ξεπερνά τα 110 εκατομμύρια τόνους (Fan, 2023). Μετά τη συγκομιδή των καρπών, το ψευδοστέλεχος του φυτού απορρίπτεται συνήθως ως βιομάζα, παρά το γεγονός ότι περιέχει σημαντικές ποσότητες ινών υψηλής ποιότητας. Οι ίνες εξάγονται κυρίως από το εξωτερικό και το μεσαίο τμήμα του ψευδοστελέχους με μηχανικές, χημικές ή βιολογικές μεθόδους. Η αξιοποίηση αυτού του γεωργικού υπολείμματος συμβάλλει στη μείωση των αποβλήτων και στην ενίσχυση της κυκλικής οικονομίας (Samanta & Chattopadhyay, 2022).

Η μηχανική εξαγωγή αποτελεί τη συνηθέστερη μέθοδο, καθώς είναι οικονομική και φιλική προς το περιβάλλον. Στη συνέχεια, οι ίνες υφίστανται επεξεργασία απολιγνινοποίησης (degumming) προκειμένου να απομακρυνθούν η λιγνίνη, οι πηκτίνες και άλλα μη κυτταρινικά συστατικά που επηρεάζουν τις τελικές ιδιότητές τους (Akhila et al., 2025).

Τα τελευταία χρόνια, η αυξανόμενη ανάγκη για βιώσιμα και ανανεώσιμα υλικά έχει οδηγήσει σε σημαντικό ερευνητικό ενδιαφέρον για την αξιοποίηση των ινών μπανάνας σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς, όπως η κλωστοϋφαντουργία, τα σύνθετα υλικά, η χαρτοποιία και η βιοϊατρική. Χρησιμοποιούνται κυρίως για την παραγωγή νημάτων και υφασμάτων είτε αυτούσιες είτε σε μίγματα με άλλες φυσικές ίνες όπως το βαμβάκι, η γιούτα και το λινάρι. Τα υφάσματα που παράγονται χαρακτηρίζονται από καλή αντοχή, και διαπνοή, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για ενδύματα, οικιακά υφάσματα και τεχνικά κλωστοϋφαντουργικά προϊόντα (Samanta & Chattopadhyay, 2022).

Άλλος ένας από τους τομείς εφαρμογής είναι η παραγωγή βιοσύνθετων υλικών. Οι ίνες μπανάνας χρησιμοποιούνται ως ενίσχυση σε θερμοπλαστικά και θερμοσκληρυνόμενα πολυμερή, βελτιώνοντας τις μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών ενώ παράλληλα μειώνουν το βάρος τους. (Fan, 2023). Οι εφαρμογές περιλαμβάνουν εξαρτήματα αυτοκινήτων, δομικά στοιχεία, έπιπλα και περιβαλλοντικά φιλικά κατασκευαστικά υλικά (Singh et al., 2022).

Ταυτόχρονα η υψηλή περιεκτικότητα σε κυτταρίνη καθιστά τις ίνες μπανάνας κατάλληλες για παραγωγή χαρτιού υψηλής ποιότητας. Το χαρτί που παράγεται διαθέτει αυξημένη αντοχή και ανθεκτικότητα σε σχέση με πολλά συμβατικά χαρτιά ξυλοπολτού (Akhila et al., 2025).

Τέλος λόγω της βιοσυμβατότητας και της μεγάλης ειδικής επιφάνειας, οι ίνες μπανάνας έχουν μελετηθεί ως υλικά προσρόφησης ρύπων σε υδατικά απόβλητα καθώς και ως πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοπολυμερών, κυτταρίνης και βιοϊατρικών υλικών. Παράλληλα, χρησιμοποιούνται στην ανάπτυξη βιοδιασπώμενων συσκευασιών και υγειονομικών προϊόντων (Akhila et al., 2025).

Πίνακας 1: Ιδιότητες ινών μπανάνας (Ansys, 2022)

Κατηγορία	Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδα Μέτρησης
Γενικές Ιδιότητες	Πυκνότητα	1,30 – 1,50	g/cm ³
	Διάμετρος ίνας	80 – 250	μm
	Περιεκτικότητα σε κυτταρίνη	60 – 65	% κ.β.
	Περιεκτικότητα σε ημικυτταρίνη	6 – 19	% κ.β.
	Περιεκτικότητα σε λιγνίνη	5 – 10	% κ.β.
	Απορρόφηση υγρασίας	10 – 15	%
	Τιμή Υλικού	3-5	EUR/kg
Μηχανικές Ιδιότητες	Αντοχή σε εφελκυσμό	400 – 900	MPa
	Μέτρο ελαστικότητας (Young's Modulus)	17 – 32	GPa
	Επιμήκυνση θραύσης	1,0 – 3,5	%
Θερμικές Ιδιότητες	Θερμική σταθερότητα	Έως 220	°C
	Θερμοκρασία αποδόμησης	220 – 300	°C
Ενέργεια	Ενσωματωμένη ενέργεια πρωτογενούς παραγωγής	10 – 25	MJ/kg ίνας
Κλιματική Αλλαγή	Ανθρακικό αποτύπωμα	0,8 – 2,5	kg CO ₂ -eq/kg ίνας
Υδατικοί Πόροι	Κατανάλωση νερού	Χαμηλή έως μέτρια	L/kg ίνας
Ανανεωσιμότητα	Προέλευση πρώτης ύλης	Γεωργικό υπόλειμμα	Ποιοτικός δείκτης
Ανακυκλωσιμότητα	Ανακύκλωση υλικού	Υψηλή	Ποιοτικός δείκτης
Βιοαποικοδόμηση	Πλήρης βιοδιάσπαση	Ναι	Ποιοτικός δείκτης
Τέλος ζωής	Κομποστοποίηση	Ναι	Ποιοτικός δείκτης
Κυκλική Οικονομία	Δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης σε βιοσύνθετα	Υψηλή	Ποιοτικός δείκτης
Γεωργικά Απόβλητα	Αξιοποίηση υπολειμμάτων καλλιέργειας	>90	% αξιοποίησης διαθέσιμης βιομάζας
Διάσπαση στο περιβάλλον	Χρόνος βιοαποδόμησης	1 – 5	έτη (ανάλογα με τις συνθήκες)

Οι ίνες μπανάνας παρουσιάζουν έναν ιδιαίτερα ελκυστικό συνδυασμό φυσικών, μηχανικών και περιβαλλοντικών ιδιοτήτων, γεγονός που εξηγεί το αυξανόμενο ερευνητικό και βιομηχανικό

ενδιαφέρον για την αξιοποίησή τους. Η σχετικά χαμηλή πυκνότητά τους $1,30\text{--}1,50\text{ g/cm}^3$ σε συνδυασμό με την υψηλή αντοχή σε εφελκυσμό $400\text{--}900\text{ MPa}$ και το υψηλό μέτρο ελαστικότητας $17\text{--}32\text{ GPa}$ τις καθιστούν κατάλληλες για εφαρμογές όπου απαιτείται υψηλή μηχανική απόδοση και ταυτόχρονα μικρό βάρος, όπως στα βιοσύνθετα υλικά. Ταυτόχρονα όμως, η υψηλή περιεκτικότητα σε κυτταρίνη και η σχετικά χαμηλή περιεκτικότητα σε λιγνίνη συμβάλλουν στην καλή μηχανική συμπεριφορά και στην ευκολία επεξεργασίας της ίνας.

3.4.2 Ίνες Μπανάνας: Ανακύκλωση και Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

Οι ίνες μπανάνας θεωρούνται ένα από τα πλέον βιώσιμα φυσικά υλικά, καθώς προέρχονται από τον ψευδοκορμό του φυτού της μπανάνας (*Musa spp.*), ο οποίος συνήθως απορρίπτεται μετά τη συγκομιδή των καρπών. Η αξιοποίηση αυτού του γεωργικού υπολείμματος για την παραγωγή ινών συμβάλλει στη μείωση των αποβλήτων, στην εξοικονόμηση φυσικών πόρων και στην προώθηση των αρχών της κυκλικής οικονομίας (Johansson, 2024).

Η ανακύκλωση των ινών μπανάνας πραγματοποιείται κυρίως μέσω μηχανικών διεργασιών, κατά τις οποίες οι χρησιμοποιημένες ίνες ή τα σύνθετα υλικά που τις περιέχουν υφίστανται τεμαχισμό και επαναχρησιμοποιούνται ως ενισχυτικά υλικά σε νέα προϊόντα. Παράλληλα, λόγω της φυτικής τους προέλευσης και της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε κυτταρίνη, οι ίνες μπορούν να αξιοποιηθούν σε εφαρμογές κομποστοποίησης και παραγωγής βιοϋλικών στο τέλος του κύκλου ζωής τους (Singh et al., 2022).

Ένα από τα σημαντικότερα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα των ινών μπανάνας είναι το χαμηλό ανθρακικό τους αποτύπωμα συγκριτικά με πολλές συνθετικές ίνες. Επειδή η πρώτη ύλη αποτελεί παραπροϊόν μιας ήδη υπάρχουσας αγροτικής δραστηριότητας, οι περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις της καλλιέργειας κατανέμονται κυρίως στην παραγωγή του καρπού και όχι στην παραγωγή της ίνας. Επιπλέον, η καλλιέργεια της μπανάνας απαιτεί γενικά λιγότερες πρόσθετες εισροές για την παραγωγή της ίνας σε σχέση με άλλες βιομηχανικές καλλιέργειες φυσικών ινών (Ruangnarong et al., 2024).

Οι μελέτες Ανάλυσης Κύκλου Ζωής έχουν δείξει ότι η σημαντικότερη περιβαλλοντική επιβάρυνση συνδέεται με το στάδιο εξαγωγής και επεξεργασίας των ινών, όπου απαιτείται ενέργεια για τον διαχωρισμό, τον καθαρισμό και την ξήρανση του υλικού (Cristobal, 2024). Παρ' όλα αυτά, η συνολική κατανάλωση ενέργειας και οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου παραμένουν χαμηλότερες από εκείνες πολλών συνθετικών υλικών που βασίζονται σε ορυκτές πρώτες ύλες (Siddiqui, 2026).

Στο τέλος του κύκλου ζωής τους, οι ίνες μπανάνας παρουσιάζουν το σημαντικό πλεονέκτημα της βιοαποικοδόμησης. Υπό κατάλληλες συνθήκες υγρασίας και παρουσίας μικροοργανισμών

διασπώνται φυσικά χωρίς να αφήνουν τοξικά κατάλοιπα ή μικροπλαστικά στο περιβάλλον. Το χαρακτηριστικό αυτό τις καθιστά ιδιαίτερα ελκυστικές για εφαρμογές όπου η περιβαλλοντική βιωσιμότητα αποτελεί βασικό κριτήριο επιλογής υλικών (Johansson, 2024).

Συνολικά, οι ίνες μπανάνας αποτελούν ένα υλικό με ιδιαίτερα θετικό περιβαλλοντικό προφίλ, καθώς συνδυάζουν την αξιοποίηση γεωργικών αποβλήτων, τη δυνατότητα ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης, τη βιοδιασπασιμότητα και τις χαμηλές περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά τον κύκλο ζωής τους. (Johansson, 2024) Για τον λόγο αυτό προσελκύουν αυξανόμενο ενδιαφέρον σε τομείς όπως η κλωστοϋφαντουργία, οι συσκευασίες και τα βιοσύνθετα υλικά, στο πλαίσιο της μετάβασης προς μια περισσότερο κυκλική και βιώσιμη οικονομία (Siddiqui, 2026).

Πίνακας 2: Σύγκριση μηχανικών ιδιοτήτων φυσικών ινών

Ίνα	Αντοχή σε Εφέλκυσμό (MPa)	Μέτρο Ελαστικότητας (GPa)	Πυκνότητα (g/cm ³)
Μπανάνα	400 – 914	17 – 32	1,30 – 1,50
Γιούτα	393 – 773	10 – 30	1,46
Κενάφ	295 – 930	14 – 53	1,45
Σιζάλ	350 – 700	9 – 22	1,45
Λινάρι	500 – 1500	27 – 80	1,40
Βαμβάκι	287 – 800	5 – 12	1,54

3.5 Τερεφθαλικό Πολυαιθυλένιο / Polyethylene Terephthalate - PET

3.5.1 Γενικά

Το Τερεφθαλικό Πολυαιθυλένιο–PET αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα θερμοπλαστικά πολυμερή της οικογένειας των πολυεστέρων και συγκαταλέγεται μεταξύ των πλέον διαδεδομένων πλαστικών παγκοσμίως. Χρησιμοποιείται κυρίως στην παραγωγή φιαλών ποτών, συσκευασιών τροφίμων, υφαντουργικών ινών (πολυεστέρας) και τεχνικών εφαρμογών, χάρη στον συνδυασμό υψηλής μηχανικής αντοχής, χαμηλού βάρους, διαφάνειας και χημικής ανθεκτικότητας (Benyathiar et al., 2022). Η ευρεία χρήση του PET οφείλεται επίσης στις εξαιρετικές ιδιότητες φραγμού απέναντι στην υγρασία και τα αέρια, οι οποίες συμβάλλουν στη διατήρηση της ποιότητας των προϊόντων συσκευασίας (Sarda et al., 2022). Το PET συντίθεται μέσω πολυσυμπύκνωσης του τερεφθαλικού οξέος (TPA) ή του διμεθυλεστέρα του τερεφθαλικού οξέος (DMT) με αιθυλενογλυκόλη (EG), σχηματίζοντας έναν θερμοπλαστικό πολυεστέρα με υψηλό βαθμό κρυσταλλικότητας. Η δομή αυτή προσδίδει στο υλικό εξαιρετική ακαμψία, καλή θερμική σταθερότητα και μεγάλη διάρκεια ζωής (Sarda et al., 2022). Σύμφωνα με πρόσφατες μελέτες, η παγκόσμια παραγωγή PET υπερβαίνει τους 30

εκατομμύρια τόνους ετησίως, ενώ ένα σημαντικό μέρος αυτής αφορά τη βιομηχανία συσκευασίας και τις πολυεστερικές ίνες (Sarda et al., 2022).

Το PET χρησιμοποιείται σε πολλούς βιομηχανικούς τομείς όπως την συσκευασία τροφίμων και ποτών, την κλωστοϋφαντουργία και σε διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές. Πιο συγκεκριμένα η σημαντικότερη χρήση του PET αφορά την παραγωγή φιαλών νερού, αναψυκτικών, χυμών και άλλων ποτών. Η υψηλή διαφάνειά του, η αντοχή σε κρούση και οι ιδιότητες φραγμού συμβάλλουν στη διατήρηση της ποιότητας των προϊόντων και στην παράταση του χρόνου ζωής τους (Benyathiar et al., 2022).

Ταυτόχρονα όμως το PET αποτελεί τη βασική πρώτη ύλη για τις ίνες πολυεστέρα, οι οποίες χρησιμοποιούνται ευρέως σε ενδύματα, χαλιά, υφάσματα επίπλωσης και τεχνικά υφάσματα. Οι πολυεστερικές ίνες διακρίνονται για την αντοχή τους στη φθορά, το χαμηλό κόστος παραγωγής και την εύκολη συντήρηση (Guo et al., 2025). Τέλος χρησιμοποιείται επίσης σε ηλεκτρικές και ηλεκτρονικές συσκευές, σε εξαρτήματα αυτοκινήτων, σε φιλμ συσκευασίας και σε σύνθετα υλικά λόγω της μηχανικής του αντοχής και της χημικής σταθερότητας που παρουσιάζει. (Sarda et al., 2022).

Πίνακας 3: Ιδιότητες PET (Ansys, 2022)

Κατηγορία	Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδα
Φυσικές Ιδιότητες	Πυκνότητα	1,34–1,39	g/cm ³
	Απορρόφηση υγρασίας	0,1–0,5	%
	Διαφάνεια	Υψηλή	–
	Τιμή Αγοράς	1,45–1,90	€/kg
Μηχανικές Ιδιότητες	Αντοχή σε εφελκυσμό	55–75	MPa
	Μέτρο ελαστικότητας (Young's Modulus)	2,0–3,0	GPa
	Επιμήκυνση στη θραύση	50–300	%
	Αντοχή σε κρούση	2–5	kJ/m ²
Θερμικές Ιδιότητες	Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (T _g)	67–81	°C
	Θερμοκρασία τήξης	245–265	°C
	Θερμική αγωγιμότητα	0,15–0,24	W/m·K
Περιβαλλοντικοί Δείκτες	Ενσωματωμένη ενέργεια πρωτογενούς παραγωγής	80–95	MJ/kg
	Ανθρακικό αποτύπωμα πρωτογενούς παραγωγής	2,2–3,5	kg CO ₂ -eq/kg
	Ανακυκλωμένο περιεχόμενο στην τρέχουσα παραγωγή	15–35	%

Κατηγορία	Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδα
	Ποσοστό ανακύκλωσης στην Ευρώπη	55–60	%
	Βιοδιασπασσιμότητα	Όχι	–
	Χρόνος αποδόμησης στο περιβάλλον	>450	έτη
Ανακύκλωση Υλικού	Δυνατότητα ανακύκλωσης	Πολύ υψηλή	–
	Υποβάθμιση ιδιοτήτων μετά από μηχανική ανακύκλωση	Μέτρια	–
	Δυνατότητα χημικής ανακύκλωσης	Ναι	–
	Δυνατότητα επαναχρησιμοποίησης	Υψηλή	–

Το PET όπως εμφανίζεται στον παραπάνω πίνακα φαίνεται να διαθέτει υψηλή μηχανική αντοχή και ακαμψία σε σύγκριση με πολλά συσκευαστικά πολυμερή, γεγονός που εξηγεί την εκτεταμένη χρήση του στη συσκευασία τροφίμων. Η πυκνότητά του κυμαίνεται μεταξύ 1,34 και 1,39 g/cm³, ενώ η αντοχή σε εφελκυσμό μπορεί να φτάσει τα 75 MPa, προσφέροντας εξαιρετική ανθεκτικότητα κατά τη χρήση. Παράλληλα, η υψηλή διαφάνειά του και οι καλές ιδιότητες φραγμού στα αέρια και την υγρασία το καθιστούν ιδανικό υλικό για τη χρήση του σε μάσκες.

Παρά τη μεγάλη ανακυκλωσιμότητά του, το PET δεν είναι βιοδιασπώμενο και παρουσιάζει υψηλή ανθεκτικότητα στις φυσικές διεργασίες αποδόμησης, με αποτέλεσμα, όταν δεν συλλέγεται και δεν διαχειρίζεται σωστά, να μπορεί να παραμένει για πολύ μεγάλα χρονικά διαστήματα στο περιβάλλον και να συμβάλλει στη συσσώρευση πλαστικών αποβλήτων (Guo et al., 2025). Για τον λόγο αυτό, η ενίσχυση της συλλογής και της ανακύκλωσης του PET αποτελεί σημαντικό στοιχείο της μετάβασης προς μία περισσότερο κυκλική οικονομία. Η μηχανική ανακύκλωση επιτρέπει την επανεπεξεργασία του υλικού, ενώ η χημική ανακύκλωση μπορεί να οδηγήσει στην αποδόμηση του πολυμερούς σε μονομερή ή άλλα ενδιάμεσα προϊόντα, τα οποία μπορούν να επαναχρησιμοποιηθούν για την παραγωγή νέων υλικών. Μέθοδοι όπως η γλυκόλυση, η υδρόλυση και η μεθανόλυση εξετάζονται ως σημαντικές τεχνολογίες για την ανάκτηση της αξίας του PET και τον περιορισμό της τελικής διάθεσης των αποβλήτων του (Guo et al., 2025).

3.5.2 PET: Ανακύκλωση και Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

Το PET θεωρείται ένα από τα πλέον ανακυκλώσιμα πλαστικά υλικά και φέρει τον κωδικό ανακύκλωσης «1». Η δυνατότητα ανακύκλωσής του αποτελεί σημαντικό πλεονέκτημα στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας. Οι κυριότερες μέθοδοι ανακύκλωσης είναι:

- Μηχανική ανακύκλωση:

Η μηχανική ανακύκλωση περιλαμβάνει τη συλλογή, διαλογή, καθαρισμό, άλεση και τήξη του υλικού για την παραγωγή νέων προϊόντων. Πρόκειται για την πιο διαδεδομένη και οικονομικά βιώσιμη μέθοδο ανακύκλωσης PET

- Χημική ανακύκλωση:

Η χημική ανακύκλωση βασίζεται στον αποπολυμερισμό του PET στα αρχικά μονομερή του, τα οποία μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή νέου PET ποιότητας παρθένου υλικού. Τεχνολογίες όπως η γλυκόλυση, η μεθανόλυση και η υδρόλυση παρουσιάζουν αυξανόμενο επιστημονικό και βιομηχανικό ενδιαφέρον (Sousa et al., 2021).

Το ανακυκλωμένο πολυαιθυλενοτερεφθαλικό (rPET) προέρχεται από τη συλλογή και επεξεργασία μεταχειρισμένων προϊόντων PET, κυρίως φιαλών ποτών και συσκευασιών τροφίμων, και αποτελεί σήμερα ένα από τα σημαντικότερα ανακυκλωμένα πλαστικά υλικά παγκοσμίως. Η χρήση ανακυκλωμένου PET (rPET) συμβάλλει σημαντικά στη μείωση της κατανάλωσης ενέργειας, των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου και της χρήσης πρωτογενών πετρελαϊκών πόρων. Σήμερα το rPET χρησιμοποιείται ευρέως στην παραγωγή νέων φιαλών, υφασμάτων και συσκευασιών τροφίμων. Παρά την αυξανόμενη ανακύκλωση, μόνο ένα μέρος των παραγόμενων ποσοτήτων επανεισάγεται στον παραγωγικό κύκλο ως rPET (Sarda et al., 2022).

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση συλλέγονται κάθε χρόνο περισσότερα από 3 εκατομμύρια τόνοι φιαλών PET, με τα ποσοστά συλλογής να ξεπερνούν το 60%, ενώ η ανακύκλωση φιαλών σε νέες φιάλες (bottle-to-bottle recycling) αυξάνεται συνεχώς λόγω της νομοθεσίας για την κυκλική οικονομία. Παράλληλα, η χρήση του rPET στην παραγωγή νέων συσκευασιών αυξάνεται με ταχείς ρυθμούς, καθώς μεγάλες βιομηχανίες ποτών έχουν δεσμευθεί να ενσωματώνουν ολοένα μεγαλύτερα ποσοστά ανακυκλωμένου υλικού στα προϊόντα τους (Benyathiar et al., 2022).

Η περιβαλλοντική σημασία του rPET είναι ιδιαίτερα μεγάλη, καθώς η παραγωγή του μπορεί να μειώσει την κατανάλωση ενέργειας κατά 57% και τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου κατά 40% σε σύγκριση με την παραγωγή παρθένου PET (Sarda et al., 2022). Επιπλέον, κάθε τόνος rPET που χρησιμοποιείται στη βιομηχανία συμβάλλει στη μείωση της κατανάλωσης πετρελαϊκών πόρων και στην αποφυγή διάθεσης σημαντικών ποσοτήτων πλαστικών αποβλήτων σε χώρους υγειονομικής ταφής ή στο φυσικό περιβάλλον. Για τον λόγο αυτό, το rPET θεωρείται βασικό υλικό για την επίτευξη των στόχων βιωσιμότητας και κυκλικότητας της βιομηχανίας πλαστικών. Μέσω μηχανικής ανακύκλωσης το PET δεν μπορεί να ανακυκλώνεται απεριόριστα. Σε κάθε κύκλο ανακύκλωσης οι πολυμερικές αλυσίδες υφίστανται θερμική και μηχανική υποβάθμιση, γεγονός που οδηγεί σε μείωση του μοριακού βάρους και σταδιακή υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων του υλικού, για αυτό το

λόγο μπορεί συνήθως να ανακυκλωθεί μηχανικά 5–10 φορές, ανάλογα με την καθαρότητα του υλικού, τις συνθήκες επεξεργασίας και την παρουσία προσθέτων ή προσμίξεων. Μετά από πολλαπλούς κύκλους ανακύκλωσης, συχνά απαιτείται ανάμειξη με παρθένο PET ώστε να διατηρηθούν οι επιθυμητές ιδιότητες του τελικού προϊόντος. Αντίθετα όμως μέσω χημικής ανακύκλωσης το PET μπορεί να αποπολυμεριστεί στα αρχικά του μονομερή (τερεφθαλικό οξύ και αιθυλενογλυκόλη) και να επανασυντεθεί σε νέο PET ποιότητας παρθένου υλικού. Θεωρητικά, αυτή η διαδικασία επιτρέπει απεριόριστους κύκλους ανακύκλωσης, καθώς το υλικό επανέρχεται στη μοριακή του μορφή χωρίς τη συσσώρευση υποβάθμισης που παρατηρείται στη μηχανική ανακύκλωση (Sousa et al., 2021).

Από περιβαλλοντική άποψη, το PET απαιτεί σημαντική κατανάλωση ενέργειας κατά την πρωτογενή παραγωγή του, η οποία κυμαίνεται περίπου μεταξύ 80 και 95 MJ/kg, ενώ το ανθρακικό αποτύπωμα ανέρχεται σε 2,2–3,5 kg CO₂-eq/kg υλικού. Ωστόσο, το υλικό διαθέτει ένα από τα πιο ανεπτυγμένα συστήματα ανακύκλωσης παγκοσμίως, επιτρέποντας την παραγωγή ανακυκλωμένου PET (rPET) με σημαντικά χαμηλότερες περιβαλλοντικές επιπτώσεις σε σχέση με το παρθένο υλικό. (Guo et al., 2025)

Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματά του, η αυξημένη κατανάλωση PET δημιουργεί σημαντικές περιβαλλοντικές προκλήσεις. Η παραγωγή του βασίζεται κυρίως σε πετροχημικές πρώτες ύλες και συνδέεται με κατανάλωση ενέργειας και εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα. Παράλληλα, η αυξανόμενη παραγωγή και ανεπαρκής διαχείριση των αποβλήτων PET ενισχύουν την ανάγκη ανάπτυξης αποτελεσματικότερων συστημάτων συλλογής, ανακύκλωσης και ανάκτησης του υλικού (Sarda et al., 2022).

Επιπλέον, η ανεξέλεγκτη διάθεση πλαστικών αποβλήτων στο φυσικό περιβάλλον μπορεί να οδηγήσει στον σταδιακό κατακερματισμό τους και στον σχηματισμό μικροπλαστικών. Τα μικροπλαστικά είναι ευρέως διαδεδομένα στα υδάτινα οικοσυστήματα και μπορούν να προσληφθούν από διάφορους θαλάσσιους οργανισμούς, δημιουργώντας ανησυχίες σχετικά με τις πιθανές επιπτώσεις τους στην τροφική αλυσίδα και στη λειτουργία των οικοσυστημάτων (Cole et al., 2011).

Ωστόσο, σε σύγκριση με εναλλακτικά υλικά συσκευασίας, όπως το γυαλί, το PET παρουσιάζει σημαντικά μικρότερο βάρος και μπορεί να εμφανίζει χαμηλότερο ανθρακικό αποτύπωμα κατά την παραγωγή και τη μεταφορά των προϊόντων. Το μικρότερο βάρος των φιαλών PET μειώνει τις απαιτήσεις μεταφοράς και αποτελεί ένα από τα βασικά περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα του υλικού σε εφαρμογές συσκευασίας ποτών (Benyathiar et al., 2022).

Παράλληλα, η αύξηση των ποσοστών ανακύκλωσης και η ενσωμάτωση ανακυκλωμένου PET (rPET) στην παραγωγή νέων προϊόντων μπορούν να περιορίσουν τις απαιτήσεις για πρωτογενείς πρώτες ύλες και να μειώσουν την ενεργειακή κατανάλωση και τις συνολικές περιβαλλοντικές επιπτώσεις κατά τον κύκλο ζωής του υλικού. Η περαιτέρω ανάπτυξη της μηχανικής και χημικής

ανακύκλωσης θεωρείται επομένως ιδιαίτερα σημαντική για την ενίσχυση της κυκλικότητας του PET (Sarda et al., 2022).

Το PET αποτελεί ένα από τα σημαντικότερα υλικά της σύγχρονης βιομηχανίας λόγω της υψηλής μηχανικής αντοχής, της διαφάνειας, της χημικής σταθερότητας και της δυνατότητας ανακύκλωσης που παρουσιάζει. Οι ιδιότητες αυτές, σε συνδυασμό με το χαμηλό βάρος και τις καλές ιδιότητες φραγμού, έχουν οδηγήσει στην εκτεταμένη χρήση του σε εφαρμογές συσκευασίας, ιδιαίτερα σε φιάλες τροφίμων και ποτών, αλλά και στην παραγωγή ινών και υφαντουργικών προϊόντων (Guo et al., 2025).

Παράλληλα, οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με την αυξανόμενη παραγωγή και τη διαχείριση των αποβλήτων PET καθιστούν απαραίτητη την ενίσχυση των συστημάτων συλλογής και ανακύκλωσης. Εκτός από τη συμβατική μηχανική ανακύκλωση, ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η ανάπτυξη τεχνολογιών χημικής ανακύκλωσης, μέσω των οποίων το PET μπορεί να αποπολυμεριστεί και να μετατραπεί σε μονομερή ή άλλα χρήσιμα χημικά προϊόντα, διευκολύνοντας την επαναχρησιμοποίησή του στην παραγωγική διαδικασία (Benyathiar et al., 2022).

Η μετάβαση προς μία περισσότερο κυκλική οικονομία βασίζεται επομένως στην αύξηση της ανάκτησης και αξιοποίησης του ανακυκλωμένου PET, στη βελτίωση της ποιότητας των ανακυκλωμένων ρευμάτων και στην περαιτέρω ανάπτυξη τεχνολογιών μηχανικής και χημικής ανακύκλωσης. Η ενσωμάτωση ανακυκλωμένου PET σε νέα προϊόντα μπορεί να περιορίσει την ανάγκη για πρωτογενείς πρώτες ύλες και να συμβάλει στη μείωση των συνολικών περιβαλλοντικών επιπτώσεων του υλικού κατά τον κύκλο ζωής του (Sarda et al., 2022).

3.6 Bio-PET (Βιολογικής Προέλευσης Πολυαιθυλενοτερεφθαλικό)

Το Bio-PET (Bio-based Polyethylene Terephthalate) αποτελεί μια βιολογικής προέλευσης εκδοχή του συμβατικού PET, στην οποία μέρος ή το σύνολο των πρώτων υλών μπορεί να προέρχεται από ανανεώσιμες πηγές βιομάζας αντί από ορυκτές πετροχημικές πηγές. Στο Bio-PET που παράγεται σήμερα σε εμπορική κλίμακα, συνήθως μόνο η μονοαιθυλενογλυκόλη (MEG) παράγεται από ανανεώσιμες πρώτες ύλες, όπως φυτικά σάκχαρα ή αιθανόλη που προέρχεται από ζαχαροκάλαμο, ενώ το τερεφθαλικό οξύ (TPA) εξακολουθεί να προέρχεται κυρίως από πετροχημικές πηγές. Για τον λόγο αυτό, το σημερινό εμπορικό Bio-PET χαρακτηρίζεται συνήθως ως μερικώς βιοβασισμένο πολυμερές, με βιοβασισμένο περιεχόμενο που μπορεί να κυμαίνεται περίπου στο 20–30%, ανάλογα με την πρώτη ύλη και τη μέθοδο υπολογισμού του βιοβασισμένου περιεχομένου (Wojnowska-Baryła et al., 2020).

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα του Bio-PET είναι ότι διατηρεί ουσιαστικά την ίδια χημική δομή και αντίστοιχες μηχανικές, θερμικές και φυσικές ιδιότητες με το συμβατικό PET. Ως αποτέλεσμα, παρουσιάζει υψηλή διαφάνεια, μηχανική αντοχή και κατάλληλες ιδιότητες φραγμού,

χαρακτηριστικά που επιτρέπουν τη χρήση του σε εφαρμογές όπως οι συσκευασίες τροφίμων, οι φιάλες, οι μεμβράνες και οι ίνες. Παράλληλα, ως “drop-in” πολυμερές μπορεί να υποστεί επεξεργασία με τις ήδη υπάρχουσες τεχνολογίες παραγωγής PET, χωρίς να απαιτούνται σημαντικές αλλαγές στον βιομηχανικό εξοπλισμό. Επιπλέον, λόγω της χημικής του ομοιότητας με το συμβατικό PET, μπορεί να ενσωματωθεί στα υφιστάμενα ρεύματα ανακύκλωσης PET (Sousa et al., 2021).

Από περιβαλλοντική άποψη, η χρήση ανανεώσιμων πρώτων υλών για την παραγωγή μέρους των μονομερών του Bio-PET μπορεί να συμβάλει στον περιορισμό της εξάρτησης από πετροχημικές πρώτες ύλες και να προσφέρει δυνατότητες μείωσης του ανθρακικού αποτυπώματος, ανάλογα με την προέλευση της βιομάζας, την παραγωγική διαδικασία και τα συνολικά δεδομένα του κύκλου ζωής του προϊόντος. Ωστόσο, η βιολογική προέλευση ενός πολυμερούς δεν συνεπάγεται απαραίτητα και βιοδιασπασιμότητα. Το Bio-PET δεν θεωρείται βιοδιασπώμενο, καθώς η τελική χημική δομή του είναι ουσιαστικά ίδια με αυτή του συμβατικού PET. Κατά συνέπεια, η περιβαλλοντική διαχείρισή του στο τέλος του κύκλου ζωής του βασίζεται κυρίως στην επαναχρησιμοποίηση και στην ανακύκλωση και όχι στη βιοαποδόμηση (Wojnowska-Baryła et al., 2020).

3.6.1 Βασικά χαρακτηριστικά του Bio-PET

Πίνακας 4: Ιδιότητες Bio-PET (Ansys, 2022)

Κατηγορία	Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδα
Φυσικές Ιδιότητες	Πυκνότητα	1,34–1,39	g/cm ³
	Ανανεώσιμο βιολογικής προέλευσης περιεχόμενο	20–30	%
	Διαφάνεια	Υψηλή	–
	Απορρόφηση υγρασίας	0,1–0,5	%
Μηχανικές Ιδιότητες	Αντοχή σε εφελκυσμό	50–75	MPa
	Μέτρο ελαστικότητας (Young's Modulus)	2,0–3,0	GPa
	Επιμήκυνση στη θραύση	50–300	%
	Αντοχή σε κρούση	2–5	kJ/m ²
Θερμικές Ιδιότητες	Θερμοκρασία υαλώδους μετάπτωσης (Tg)	70–80	°C
	Θερμοκρασία τήξης	245–265	°C
	Θερμική αγωγιμότητα	0,15–0,24	W/m·K
Περιβαλλοντικοί Δείκτες (LCA)	Ενσωματωμένη ενέργεια παραγωγής	60–85	MJ/kg

Κατηγορία	Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδα
	Ανθρακικό αποτύπωμα	1,5–2,8	kg CO ₂ -eq/kg
	Χρήση μη ανανεώσιμων πρώτων υλών	Μειωμένη	–
	Προέλευση άνθρακα από βιομάζα	Έως 30	%
	Βιοδιασπασιμότητα	Όχι	–
	Χρόνος αποδόμησης στο περιβάλλον	>450	έτη
Ανακύκλωση Υλικού	Δυνατότητα ανακύκλωσης	Πολύ υψηλή	–
	Συμβατότητα με ρεύμα ανακύκλωσης PET	100	%
	Δυνατότητα παραγωγής rBio-PET	Ναι	–
	Αριθμός κύκλων μηχανικής ανακύκλωσης	5–10	κύκλοι
	Δυνατότητα χημικής ανακύκλωσης	Ναι	–

3.7 Ίνα Ζαχαροκάλαμου / Sugarcane Fiber

3.7.1 Γενικά

Το ζαχαροκάλαμο είναι το μεγαλύτερο γεωργικό προϊόν παγκοσμίως, με συνολική ετήσια συγκομιδή περίπου 1,8 δισεκατομμυρίων τόνων. Το ζαχαροκάλαμο θρυμματίζεται για την εξαγωγή του χυμού του, αφήνοντας πίσω ένα ινώδες υπόλειμμα που ονομάζεται bagasse (βαγάσση) ως παραπροϊόν. Η βαγάσση χαρακτηρίζεται ως λιγνοκυτταρινούχο υλικό, αποτελούμενο κυρίως από κυτταρίνη (45–55%), ημικυτταρίνη (20–25%) και λιγνίνη (18–24%) (Ansys, 2022).

Η βαγάσση τεμαχίζεται για να ανακτηθεί η ίνα του ζαχαροκάλαμου, ενώ το υπόλειμμα χημικά επεξεργάζεται ώστε να μετατραπεί σε ιξώξη (viscose), η οποία στη συνέχεια μεταβάλλεται σε ημι-συνθετικές ίνες όπως η ρεγιόν και το μοντάλ, καθώς και σε πιο λείο και περισσότερο μεταξοειδές πολτό ξύλου για την παραγωγή Iyocell. Οι ίνες ζαχαροκάλαμου είναι πιο γυαλιστερές και πιο μεταξένιες σε σύγκριση με τη ρεγιόν από ξυλοπολτό, γεγονός που ενισχύει το ενδιαφέρον για τη χρήση τους σε κλωστοϋφαντουργικές εφαρμογές υψηλής προστιθέμενης αξίας (Ansys, 2022). Περίπου το 25–30% της μάζας του ζαχαροκάλαμου μετατρέπεται σε βαγάσση, γεγονός που δημιουργεί μεγάλες διαθέσιμες ποσότητες πρώτης ύλης για την παραγωγή φυσικών ινών και βιοσύνθετων υλικών (Mahmud & Anannya, 2021).

Οι ίνες που λαμβάνονται από τη βαγάσση συνήθως υποβάλλονται σε αλκαλική κατεργασία με διάλυμα NaOH, προκειμένου να απομακρυνθούν λιγνίνη, κηρώδεις ουσίες και μέρος της ημικυτταρίνης. Η κατεργασία αυτή αυξάνει την τραχύτητα της επιφάνειας και βελτιώνει την πρόσφυση μεταξύ ίνας και πολυμερικής μήτρας στα σύνθετα υλικά. Ως αποτέλεσμα παρατηρείται σημαντική βελτίωση της αντοχής σε εφελκυσμό και κάμψη (Sakura et al., 2025).

Επιπλέον, από τις ίνες ζαχαροκάλαμου μπορούν να παραχθούν:

- καθαρή κυτταρίνη,
- νανοϊνες κυτταρίνης (CNFs),
- νανοκρύσταλλοι κυτταρίνης (CNCs),
- αναγεννημένες κυτταρινικές ίνες για κλωστοϋφαντουργικές εφαρμογές. (Mahmud & Anannya, 2021)

Η υψηλή περιεκτικότητα σε κυτταρίνη προσδίδει στις ίνες ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες, χαμηλή πυκνότητα και αυξημένη ειδική αντοχή, χαρακτηριστικά που τις καθιστούν ελκυστικές για εφαρμογές σε σύνθετα υλικά και στην κλωστοϋφαντουργία (Devadiga et al., 2020). Οι μεγαλύτερες χώρες παραγωγής ζαχαροκάλαμου είναι η Βραζιλία, η Ινδία, η Κίνα, η Ταϊλάνδη και το Πακιστάν, γεγονός που εξασφαλίζει μεγάλη διαθεσιμότητα του υλικού και χαμηλό κόστος προμήθειας. Μόνο στην Ινδία η παραγωγή είναι 200 εκατομμύρια βαγάσσης το χρόνο. Η αξιοποίηση της βαγάσσης συμβάλλει παράλληλα στη μείωση των αγροτικών αποβλήτων και στην προώθηση της κυκλικής οικονομίας. (Devadiga et al., 2020).

Οι ίνες ζαχαροκάλαμου χρησιμοποιούνται ευρέως σε διάφορους βιομηχανικούς τομείς. Παραδοσιακά, η βαγάσση αξιοποιείται για την παραγωγή χαρτιού, χαρτονιού, μοριοσανίδων και ινοσανίδων. (Devadiga et al., 2020). Άλλες εφαρμογές είναι η παραγωγή βιοσύνθετων υλικών, βιοδιασπώμενων συσκευασιών, βιομηχανία χαρτιού, νανοκυτταρίνη. Πιο συγκεκριμένα οι ίνες χρησιμοποιούνται ως ενισχυτικά μέσα σε πολυμερή θερμοπλαστικά και θερμοσκληρυνόμενα υλικά, βελτιώνοντας τις μηχανικές ιδιότητες και μειώνοντας το βάρος των τελικών προϊόντων (Fong et al., 2018). Παράλληλα λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε κυτταρίνη, η βαγάσση χρησιμοποιείται στην παραγωγή βιοδιασπώμενων πιάτων, δίσκων τροφίμων και συσκευασιών μιας χρήσης ως υποκατάστατο των πλαστικών προϊόντων (Ndikumana et al., 2025). Τα τελευταία χρόνια, η αυξανόμενη ζήτηση για βιώσιμα υλικά έχει οδηγήσει στη χρήση τους ως ενισχυτικά μέσα σε σύνθετα πολυμερή υλικά για εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία, τις κατασκευές και τα καταναλωτικά προϊόντα (Mahmud & Anannya, 2021).

Παράλληλα, η υψηλή περιεκτικότητα της βαγάσσης σε κυτταρίνη επιτρέπει την παραγωγή καθαρής κυτταρίνης, νανοκυτταρίνης και αναγεννημένων κυτταρινικών ινών όπως η βισκόζη (viscose), το modal και το lyocell. Οι εφαρμογές αυτές προσδίδουν αυξημένη προστιθέμενη αξία στο αγροτικό παραπροϊόν και συμβάλλουν στην ανάπτυξη βιώσιμων κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων (Mahmud & Anannya, 2021).

Επιπρόσθετα, πρόσφατες ερευνητικές μελέτες έχουν δείξει ότι οι μηχανικές και δομικές ιδιότητες των βιοσύνθετων υλικών μπορούν να βελτιωθούν σημαντικά μέσω της ενίσχυσής τους με ίνες βαγάσσης που προέρχονται από διαγονιδιακό ζαχαροκάλαμο με αυξημένη ικανότητα σύνθεσης σακχαρόζης. Ειδικότερα, η επεξεργασία αλκαλοποίησης των ινών βαγάσσης από το διαγονιδιακό ζαχαροκάλαμο SPS3 οδήγησε σε αισθητή αύξηση της αντοχής τους σε εφελκυσμό, ενισχύοντας την αποτελεσματικότητά τους ως υλικό ενίσχυσης. Αντίθετα, η ανθρακοποίηση των ινών είχε ως αποτέλεσμα τη μείωση της εφελκυστικής αντοχής, συνοδευόμενη όμως από ελαφρά αύξηση της επιμήκυνσης κατά τη θραύση και υψηλότερες τιμές μέτρου ελαστικότητας, γεγονός που υποδηλώνει μεγαλύτερη ακαμψία του παραγόμενου βιοσύνθετου. Παράλληλα, οι μορφολογικές αναλύσεις έδειξαν ότι η αλκαλοποίηση προκαλεί αύξηση της τραχύτητας της επιφάνειας των ινών, βελτιώνοντας τη διεπιφανειακή πρόσφυση μεταξύ ίνας και μήτρας, ενώ στα ανθρακοποιημένα σύνθετα υλικά παρατηρήθηκε σχηματισμός πόρων και κενών. Συνεπώς, οι επεξεργασίες αλκαλοποίησης και ανθρακοποίησης αποτελούν αποτελεσματικές μεθόδους τροποποίησης των ιδιοτήτων της βαγάσσης, επιτρέποντας τη βελτιστοποίηση των μηχανικών και δομικών χαρακτηριστικών των βιοσύνθετων υλικών ανάλογα με τις απαιτήσεις της εκάστοτε εφαρμογής (Sakura et al., 2025).

Πίνακας 5: Ιδιότητες ινών ζαχαροκάλαμου (Ansys, 2022)

Κατηγορία	Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδα
Γενικές Ιδιότητες	Επιφάνεια διατομής ίνας	0,0038 – 0,0095	mm ²
	Πυκνότητα	1.220 – 1.280	kg/m ³
	Ανακτώμενη υγρασία (Moisture regain)	7 – 10	%
	Τιμή	0,895 – 1,35	EUR/kg
	Έτος πρώτης χρήσης	1650	-
Μηχανικές Ιδιότητες	Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus)	17,9 – 27,1	GPa
	Μέτρο διάτμησης (Shear modulus)	2 – 4	GPa
	Ογκομετρικό μέτρο (Bulk modulus)	14 – 15	GPa

Κατηγορία	Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδα
	Λόγος Poisson	0,34 – 0,35	-
	Όριο διαρροής	190 – 260	MPa
	Αντοχή σε εφελκυσμό	190 – 260	MPa
	Επιμήκυνση θραύσης	2 – 6	%
	Συντελεστής μηχανικών απωλειών (tan δ)	0,05 – 0,08	-
Θερμικές Ιδιότητες	Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας	130 – 150	°C
	Ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας	-60 – -50	°C
	Θερμική συμπεριφορά	Καλός μονωτής	-
	Θερμική αγωγιμότητα	0,30 – 0,35	W/m·°C
	Ειδική θερμοχωρητικότητα	1.200 – 1.220	J/kg·°C
	Συντελεστής θερμικής διαστολής	15 – 30	μstrain/°C
Ανθεκτικότητα / Ευφλεκτότητα	Δείκτης περιοριστικού οξυγόνου (LOI)	17 – 19	%
Κίνδυνος Κρίσιμων Πρώτων Υλών	Υψηλός κίνδυνος κρίσιμων υλικών	Όχι	-
Περιβαλλοντικοί Δείκτες (LCA)	Ενσωματωμένη ενέργεια πρωτογενούς παραγωγής	6 – 7	MJ/kg
	Ανθρακικό αποτύπωμα CO ₂	0,6 – 0,7	kg CO ₂ /kg
	Κατανάλωση νερού	3.500 – 4.500	L/kg
Ανακύκλωση Υλικού	Ανακύκλωση	Όχι	-
	Downcycling	Ναι	-

Όπως εμφανίζεται και στον πίνακα παραπάνω οι ίνες ζαχαροκάλαμου χαρακτηρίζονται από χαμηλή πυκνότητα 1.220–1.280 kg/m³, η οποία είναι σημαντικά μικρότερη από εκείνη των συνθετικών ινών όπως το γυαλί. Παρουσιάζουν μέτρο ελαστικότητας μεταξύ 17,9 και 27,1 GPa και αντοχή σε εφελκυσμό 190–260 MPa, τιμές που τις καθιστούν κατάλληλες ως ενισχυτικό μέσο σε βιοσύνθετα υλικά. Θερμικά, οι ίνες μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε θερμοκρασίες έως περίπου 150°C, ενώ εμφανίζουν χαμηλή θερμική αγωγιμότητα (0,30–0,35 W/m·°C), χαρακτηριστικό που τις καθιστά καλούς θερμομονωτές.

3.7.2 Ίνες Ζαχαροκάλαμου: Ανακύκλωση και περιβαλλοντικές επιπτώσεις

Οι ίνες ζαχαροκάλαμου θεωρούνται ένα από τα πλέον φιλικά προς το περιβάλλον φυσικά υλικά, καθώς προέρχονται από ανανεώσιμη πηγή και αξιοποιούν γεωργικά υπολείμματα που διαφορετικά θα

απορρίπτονταν ή θα καίγονταν. Η πρωτογενής παραγωγή τους απαιτεί σχετικά χαμηλή ενέργεια 6–7 MJ/kg και συνοδεύεται από χαμηλό ανθρακικό αποτύπωμα 0,6–0,7 kg CO₂/kg συγκριτικά με συνθετικές ίνες όπως ο πολυεστέρας και οι ίνες γυαλιού. Ωστόσο, η καλλιέργεια ζαχαροκάλαμου παρουσιάζει υψηλές απαιτήσεις σε νερό, οι οποίες εκτιμώνται σε 3.500–4.500 L/kg προϊόντος. (Ansys, 2022)

Αν και οι ίνες ζαχαροκάλαμου δεν ανακυκλώνονται εύκολα σε νέα ίνα ίδιας ποιότητας, μπορούν να αξιοποιηθούν μέσω διαδικασιών downcycling για παραγωγή χαρτιού, μοριοσανίδων ή βιοσύνθετων υλικών. Παράλληλα, λόγω της φυσικής λιγνοκυτταρινούχου δομής τους, είναι βιοδιασπώμενες και αποσυντίθενται σημαντικά ταχύτερα από τα συμβατικά συνθετικά πολυμερή (Mahmud & Anannya, 2021). Παρουσιάζει υψηλή βιοαποικοδομησιμότητα και μπορεί να αποσυντεθεί πλήρως στο φυσικό περιβάλλον μέσω της δράσης μικροοργανισμών, όπως βακτήρια και μύκητες. Ο ακριβής χρόνος αποσύνθεσης εξαρτάται από τις περιβαλλοντικές συνθήκες (υγρασία, θερμοκρασία, αερισμός και μικροβιακή δραστηριότητα), ωστόσο τα μη επεξεργασμένα υπολείμματα βαγάσσης μπορούν να βιοαποικοδομηθούν σε χρονικό διάστημα από μερικούς μήνες έως περίπου 1–2 έτη σε φυσικές εδαφικές συνθήκες. Η σχετικά γρήγορη αποδόμησή τους αποδίδεται στην υψηλή περιεκτικότητα σε κυτταρίνη και ημικυτταρίνη, ενώ η λιγνίνη αποικοδομείται πιο αργά και παρατείνει τη συνολική διαδικασία αποσύνθεσης. Η ιδιότητα αυτή καθιστά τη βαγάσση ιδιαίτερα ελκυστική ως ανανεώσιμη και περιβαλλοντικά φιλική πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοσύνθετων και βιοαποικοδομήσιμων προϊόντων, συμβάλλοντας στη μείωση των αποβλήτων και στην εφαρμογή των αρχών της κυκλικής οικονομίας. (Devadiga et al., 2020).

Επιπλέον, η βαγάσση παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον ως ανανεώσιμη πρώτη ύλη, λόγω του ευρέος φάσματος εφαρμογών της στην ανάπτυξη βιώσιμων υλικών. Η αξιοποίησή της εκτείνεται τόσο στην παραγωγή πλήρως βιοαποικοδομήσιμων όσο και μερικώς βιοαποικοδομήσιμων προϊόντων, τα οποία μπορούν να συμβάλουν στη μείωση της εξάρτησης από τα συμβατικά συνθετικά υλικά που προέρχονται από ορυκτούς πόρους. Η υψηλή περιεκτικότητα της βαγάσσης σε κυτταρίνη, σε συνδυασμό με τη μεγάλη διαθεσιμότητά της ως γεωργικό παραπροϊόν, την καθιστά μια ελκυστική και οικονομικά αποδοτική επιλογή για την παραγωγή σύνθετων υλικών, βιοπολυμερών και άλλων προϊόντων προστιθέμενης αξίας. Ως εκ τούτου, η αξιοποίηση της βαγάσσης εντάσσεται στις αρχές της κυκλικής οικονομίας και της βιώσιμης ανάπτυξης, προσφέροντας μια περιβαλλοντικά φιλική εναλλακτική λύση για την παραγωγή υλικών με μειωμένο περιβαλλοντικό αποτύπωμα (Mahmud & Anannya, 2021).

Οι ίνες ζαχαροκάλαμου είναι ένας ιδιαίτερα πολύτιμος και ανανεώσιμος πόρος με δυνατότητα αξιοποίησης σε πληθώρα εφαρμογών, όπως η παραγωγή βιοενέργειας, βιοπλαστικών, προσροφητικών

υλικών, δομικών υλικών και γεωργικών προϊόντων. Η αξιοποίηση της βαγιάσης συμβάλλει ουσιαστικά στην προώθηση των αρχών της κυκλικής οικονομίας, μέσω της μείωσης των αποβλήτων και του περιορισμού των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Ταυτόχρονα μέσω της τεχνολογίας επιτυγχάνεται βελτίωση της απόδοσης των διεργασιών αεριοποίησης και η ανάπτυξη σύνθετων υλικών ενισχυμένων με νανοκυτταρίνη. Παρότι εξακολουθούν να υφίστανται προκλήσεις που σχετίζονται με τη βελτιστοποίηση των μεθόδων προεπεξεργασίας, οι δυνατότητες μείωσης των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου κατά 40–70% και η εξοικονόμηση φυσικών πόρων καθιστούν τη βαγιάση βασικό πυλώνα για την ανάπτυξη πιο βιώσιμων βιομηχανικών συστημάτων (Ndikumana et al., 2025).

Μελλοντικά, η πλήρης αξιοποίηση των δυνατοτήτων της βαγιάσης προϋποθέτει διεπιστημονική έρευνα και ανάπτυξη σε τομείς όπως η τεχνητή νοημοσύνη για τη βελτιστοποίηση βιομηχανικών διεργασιών, οι υβριδικές βιοδυλιστηριακές εγκαταστάσεις και οι εφαρμογές της νανοτεχνολογίας, με στόχο την αύξηση των αποδόσεων και τη μείωση του κόστους παραγωγής. Υπό αυτό το πρίσμα, η αξιοποίηση της βαγιάσης μπορεί να συμβάλει ουσιαστικά στη μετάβαση προς μια οικονομία χαμηλών εκπομπών άνθρακα και στην επίτευξη των Στόχων Βιώσιμης Ανάπτυξης του ΟΗΕ, ενισχύοντας παράλληλα την ανάπτυξη μιας ανθεκτικής και καινοτόμου βιοοικονομίας. (Ndikumana et al., 2025)

3.8 Ίνες Λιναριού / Flax Fiber

3.8.1 Γενικά

Το λινάρι είναι μια ίνα που προέρχεται από το στέλεχος του φυτού λιναριού (*Linum usitatissimum*). Οι ίνες αποσπώνται από τον βλαστό μέσω μιας διαδικασίας που ονομάζεται εμβροχή (retting). Πολλές από αυτές τις ίνες πρέπει να συναρμολογηθούν/συστραφούν ώστε να δημιουργηθεί νήμα. Το λινάρι καλλιεργείται και επεξεργάζεται εδώ και 8.000 χρόνια, ενώ μεγάλες παραγωγικές περιοχές βρίσκονται στο Βέλγιο και την Ιρλανδία. Χρησιμοποιείται για την παραγωγή λινού νήματος και σχοινιών, ενώ η ιδιαίτερα υψηλή αξία του οφείλεται στις εξαιρετικές του ιδιότητες. Τα λινά υφάσματα χρησιμοποιούνταν ευρέως κατά τον 19ο αιώνα για εσωτερικές διακοσμητικές εφαρμογές σε μεγάλες κατοικίες. (Ansys, 2022)

Το λινάρι, ανήκει σε μια κατηγορία φυτών γνωστών ως «φυτά ινών φλοιού» (bast plants), τα οποία είναι γνωστά για τις μακριές και ανθεκτικές ίνες τους. Τα φυτά ινών φλοιού χαρακτηρίζονται από ένα εξωτερικό στρώμα του στελέχους που περιέχει το 10–40% της ισχυρής ινώδους μάζας του στελέχους. Η παραγωγή τέτοιων φυτών αποτελεί σημαντική πηγή ινωδών υλικών. (Ansys, 2022)

Σχετικά με την σύσταση του λιναριού αποτελείται κυρίως από κυτταρίνη $C_6H_{10}O_5$, με ποσοστό περίπου 65-85% με περίπου 12% κ.β. νερό (H_2O), ημικυτταρίνη 10-20% και το υπόλοιπο από λιγνίνη πηκτικές και λιπαρές ουσίες. Η υψηλή περιεκτικότητα σε κυτταρίνη ευνοεί την ανάπτυξη ισχυρών δεσμών υδρογόνου μεταξύ των μακρομορίων, προσδίδοντας υψηλό μέτρο ελαστικότητας και αντοχή σε εφελκυσμό συγκριτικά με άλλες φυσικές ίνες (Faruk et al., 2012).

Οι ίνες λιναριού (flax fibers) αποτελούν ένα φυσικό υλικό με ευρύ φάσμα εφαρμογών στην κλωστοϋφαντουργία, τη διακόσμηση εσωτερικών χώρων και τη βιομηχανία σύνθετων υλικών. Χρησιμοποιούνται εκτενώς για την παραγωγή υφασμάτων, σχοινιών, επενδύσεων δαπέδων, υφασμάτων επίπλωσης και ταπετσαριών, ενώ τα τελευταία χρόνια έχουν αποκτήσει ιδιαίτερο ενδιαφέρον ως υλικό ενίσχυσης σε πολυμερικά σύνθετα υλικά και σε σκυρόδεμα ενισχυμένο με φυσικές ίνες. Τα τελευταία χρόνια το λινάρι έχει γνωρίσει αυξημένο ερευνητικό και βιομηχανικό ενδιαφέρον λόγω του χαμηλού περιβαλλοντικού αποτυπώματός του, της ανανεώσιμης προέλευσης και της δυνατότητάς του να αντικαθιστά συνθετικές ίνες σε σύνθετα υλικά. Οι ίνες λιναριού χρησιμοποιούνται σήμερα τόσο στην κλωστοϋφαντουργία όσο και στη βιομηχανία αυτοκινήτων, δομικών υλικών και βιοσύνθετων προϊόντων (Pickering et al., 2016).

Τα βασικά πλεονεκτήματά τους περιλαμβάνουν το χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, την ανανεώσιμη προέλευσή τους, την καλή αντοχή στην τριβή και τις υψηλές μηχανικές ιδιότητες σε σχέση με άλλες φυσικές ίνες. Αυτό οφείλεται στην παρουσία της χαρακτηριστικής στοιβάδας G (gelatinous layer), η οποία καταλαμβάνει μεγάλο μέρος του κυτταρικού τοιχώματος και συμβάλλει στις ιδιαίτερα υψηλές μηχανικές ιδιότητες του υλικού (Goudenhooft et al., 2019).

Επιπλέον έχουν ήδη αναπτυχθεί ποικιλίες λιναριού με υψηλότερη απόδοση, αυξημένη ανθεκτικότητα σε ασθένειες και μεγαλύτερη αντίσταση στο πλάγιασμα, διατηρώντας παράλληλα μορφολογικά χαρακτηριστικά που διευκολύνουν τη μηχανική συγκομιδή και επεξεργασία. Συνεπώς, είναι εφικτή η περαιτέρω ανάπτυξη νέων ποικιλιών ειδικά σχεδιασμένων για τεχνικές και βιομηχανικές εφαρμογές, όπως η παραγωγή προηγμένων βιοσύνθετων υλικών (Goudenhooft et al., 2019).

Επιπλέον, η χρήση λειτουργικοποιημένων πολυμερών και κατάλληλων χημικών τροποποιήσεων μπορεί να βελτιώσει τη σταθερότητα της διεπιφάνειας κατά τη γήρανση, οδηγώντας σε σύνθετα υλικά υψηλότερης ποιότητας, μεγαλύτερης ανθεκτικότητας και βελτιωμένων μηχανικών επιδόσεων. Συνεπώς, η διατήρηση και ενίσχυση της διεπιφανειακής πρόσφυσης αποτελεί βασικό παράγοντα για τη μακροχρόνια αξιοπιστία και την εμπορική αξιοποίηση των σύνθετων υλικών με ενίσχυση από ίνες λιναριού (Singh et al., 2022).

Στον κατασκευαστικό τομέα συμβάλλουν στη βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς σύνθετων υλικών και σκυροδέματος, χωρίς όμως να μπορούν να υποκαταστήσουν πλήρως τον συμβατικό

χαλύβδινο οπλισμό σε εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων. Συνολικά, το λινάρι θεωρείται ένα βιώσιμο και φιλικό προς το περιβάλλον υλικό, το οποίο συνδυάζει λειτουργικότητα, αντοχή και μειωμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις (Ricker et al., 2024).

Οι ίνες λιναριού αποτελούν φυσικό υλικό με σημαντικές δυνατότητες αξιοποίησης σε κλωστοϋφαντουργικές και σύνθετες εφαρμογές. Χρησιμοποιούνται στην παραγωγή υφασμάτων, σχοινιών, επενδύσεων δαπέδων και ταπετσαριών επίπλων (Upadhyay & Mehta, 2019). Τα τελευταία χρόνια παρουσιάζουν αυξανόμενο ενδιαφέρον ως ενίσχυση σε σύνθετα πολυμερικά υλικά και σε τσιμεντοειδή στοιχεία, όπου μπορούν να βελτιώσουν επιμέρους μηχανικά χαρακτηριστικά. Ωστόσο, η συμβολή τους είναι συμπληρωματική και δεν υποκαθιστά τον συμβατικό χαλύβδινο οπλισμό σε δομικές εφαρμογές υψηλών απαιτήσεων (Ricker et al., 2024).

Πίνακας 6: Ιδιότητες ινών λιναριού (Ansys, 2022)

Κατηγορία	Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδα
Γενικές Ιδιότητες	Εμβαδόν διατομής ίνας	$1,1 \times 10^{-4} - 2 \times 10^{-4}$	mm ²
	Πυκνότητα	1420 – 1520	kg/m ³
	Υγρασιακή ανάκτηση (Moisture regain)	8 – 10	%
	Τιμή	0,656 – 2,34	€/kg
Μηχανικές Ιδιότητες	Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus)	27 – 80	GPa
	Μέτρο διάτμησης	1,27 – 1,54	GPa
	Μέτρο όγκου (Bulk modulus)	9 – 26	GPa
	Λόγος Poisson	0,35 – 0,36	–
	Όριο διαρροής	150 – 338	MPa
	Αντοχή σε εφελκυσμό	750 – 940	MPa
	Επιμήκυνση θραύσης	1,2 – 3,2	%
	Ανθεκτικότητα σε θραύση	1 – 2	MPa·m ^{1/2}
	Συντελεστής μηχανικών απωλειών (tan δ)	0,01 – 0,05	–
	Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας	110 – 130	°C
Θερμικές Ιδιότητες	Ελάχιστη θερμοκρασία λειτουργίας	-273	°C
	Θερμική αγωγιμότητα	0,20 – 0,30	W/m·K
	Ειδική θερμότητα	1200 – 1220	J/kg·K
	Συντελεστής θερμικής διαστολής	15 – 30	μstrain/°C
	Ηλεκτρική αντίσταση	$10^{14} - 10^{16}$	μΩ·cm

Κατηγορία	Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδα
	Διηλεκτρική σταθερά	3 – 6	–
	Συντελεστής διηλεκτρικών απωλειών	0,050 – 0,057	–
	Διηλεκτρική αντοχή	6 – 8	MV/m
Οπτικές Ιδιότητες	Διαφάνεια	Αδιαφανές	–
Ανθεκτικότητα	Αντοχή σε γλυκό νερό	Αποδεκτή	–
	Αντοχή σε θαλασσινό νερό	Αποδεκτή	–
	Αντοχή στην υπεριώδη ακτινοβολία	Καλή	–
	Αντίσταση στην τριβή	Καλή	–
Ευφλεκτότητα	Συμπεριφορά στη φωτιά	Πολύ εύφλεκτο	–
	Δείκτης οξυγόνου (LOI)	17 – 19	%
Παραγωγή & Περιβάλλον	Παγκόσμια ετήσια παραγωγή	$3,67 \times 10^5$	τόνοι/έτος
	Ενσωματωμένη ενέργεια	10,5 – 11,6	MJ/kg
	Ανθρακικό αποτύπωμα CO ₂	0,42 – 0,46	kg CO ₂ /kg
	Κατανάλωση νερού	3000 – 3300	L/kg
Ανακύκλωση	Δυνατότητα ανακύκλωσης	Όχι	–
	Ποσοστό ανακυκλωμένου υλικού στην αγορά	0,1	%
	Δυνατότητα υποκύκλωσης (downcycling)	Ναι	–
	Θερμογόνος δύναμη	17 – 17,9	MJ/kg
	Εκπομπές CO ₂ από καύση	1,39 – 1,46	kg CO ₂ /kg

Οι ίνες λιναριού εμφανίζουν εξαιρετικό συνδυασμό χαμηλής πυκνότητας και υψηλής μηχανικής αντοχής και ακαμψίας με αντοχή σε εφελκυσμό έως 940 MPa και μέτρο ελαστικότητας έως 80 GPa, τιμές που τις καθιστούν ανταγωνιστικές έναντι άλλων φυσικών ινών. Ωστόσο, η υψηλή ευφλεκτότητα, η αδυναμία ανακύκλωσης σε κλειστό κύκλο και η σημαντική κατανάλωση νερού κατά την παραγωγή αποτελούν βασικούς περιορισμούς που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την επιλογή του υλικού.

3.8.2 Ανακύκλωση και Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις Ινών Λιναριού

Οι ίνες λιναριού θεωρούνται ένα από τα πλέον φιλικά προς το περιβάλλον φυσικά υλικά, καθώς προέρχονται από ανανεώσιμη γεωργική καλλιέργεια και απαιτούν σημαντικά μικρότερη κατανάλωση ενέργειας κατά την παραγωγή τους σε σύγκριση με τις συνθετικές ίνες. Η καλλιέργεια του λιναριού χαρακτηρίζεται από σχετικά χαμηλές απαιτήσεις σε φυτοφάρμακα και λιπάσματα, ενώ το φυτό αξιοποιείται σχεδόν πλήρως, μειώνοντας την παραγωγή αποβλήτων (Goudenhooft et al., 2019). Επιπλέον, κατά την ανάπτυξή του δεσμεύει διοξείδιο του άνθρακα από την ατμόσφαιρα μέσω της

φωτοσύνθεσης, συμβάλλοντας στη μείωση του ανθρακικού αποτυπώματος των τελικών προϊόντων. (Upadhyay & Mehta, 2019)

Ένα από τα σημαντικότερα πλεονεκτήματα των ινών λιναριού είναι η βιοαποικοδομησιμότητά τους. Σε κατάλληλες συνθήκες υγρασίας και μικροβιακής δραστηριότητας, οι ίνες αποδομούνται φυσικά σε διάστημα λίγων μηνών έως λίγων ετών χωρίς να αφήνουν τοξικά κατάλοιπα στο περιβάλλον (Goudenhooft et al., 2019). Αντίθετα με τις συνθετικές ίνες, δεν συμβάλλουν στη δημιουργία μικροπλαστικών, γεγονός που ενισχύει τη βιωσιμότητά τους σε εφαρμογές κλωστοϋφαντουργίας και συσκευασίας (Upadhyay & Mehta, 2019).

Η ανακύκλωση των προϊόντων από λινάρι μπορεί να πραγματοποιηθεί με μηχανικές μεθόδους. Τα υπολείμματα υφαντουργικών προϊόντων και τα απόβλητα παραγωγής μπορούν να τεμαχιστούν και να επαναχρησιμοποιηθούν ως υλικό ενίσχυσης σε σύνθετα υλικά, μονωτικά προϊόντα ή βιοσύνθετα πάνελ (Singh et al., 2022). Στον τομέα των σύνθετων υλικών, οι ίνες λιναριού μπορούν να ανακτηθούν και να επαναχρησιμοποιηθούν, αν και η διαδικασία είναι πιο σύνθετη όταν συνδυάζονται με θερμοσκληρυνόμενες πολυμερικές μήτρες (Goudenhooft et al., 2019).

Παρά τα περιβαλλοντικά τους πλεονεκτήματα, υπάρχουν και ορισμένες επιπτώσεις που σχετίζονται με την παραγωγή τους. Η διαδικασία της εμβροχής (retting), η οποία είναι απαραίτητη για τον διαχωρισμό των ινών από το στέλεχος, μπορεί να προκαλέσει επιβάρυνση των υδάτινων πόρων όταν δεν εφαρμόζονται κατάλληλες πρακτικές διαχείρισης (Upadhyay & Mehta, 2019). Επιπλέον, η μεταφορά και η βιομηχανική επεξεργασία των ινών απαιτούν κατανάλωση ενέργειας και παράγουν εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, αν και σε επίπεδα σημαντικά χαμηλότερα από αυτά των συνθετικών ινών όπως το πολυεστέρας και οι ίνες υάλου (Goudenhooft et al., 2019).

Παράλληλα, το σχετικά χαμηλό ανθρακικό αποτύπωμα 0,42–0,46 kg CO₂/kg και η μικρή ενσωματωμένη ενέργεια παραγωγής 10,5–11,6 MJ/kg αναδεικνύουν το λινάρι ως ένα βιώσιμο υλικό για εφαρμογές πράσινης μηχανικής και βιοσύνθετων υλικών. (Ansys, 2022)

Συνολικά, οι ίνες λιναριού αποτελούν ένα υλικό με ιδιαίτερα θετικό περιβαλλοντικό προφίλ. Η ανανεώσιμη προέλευσή τους, η δυνατότητα ανακύκλωσης και επαναχρησιμοποίησης, η βιοαποικοδομησιμότητα και το χαμηλό ανθρακικό αποτύπωμα καθιστούν το λινάρι μια σημαντική πρώτη ύλη για τη μετάβαση προς πιο βιώσιμα προϊόντα και εφαρμογές στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας.

3.9 Ίνες Γιούτα / Jute Fiber

3.9.1 Γενικά

Η γιούτα είναι μια μακριά, μαλακή και γυαλιστερή φυτική ίνα, η οποία προέρχεται από φυτά του γένους *Corchorus*, της οικογένειας *Malvaceae* (Μαλαχοειδή). Όπως και η κενάφ (*kenaf*), η βιομηχανική κάνναβη, το λινάρι και η ράμι (*ramie*), αποτελεί ίνα από τον φλοιό του φυτού (*bast fiber*), δηλαδή ίνα που εξάγεται από το εξωτερικό τμήμα του στελέχους. Λόγω του χρυσοκίτρινου χρώματός της και της οικονομικής της αξίας, είναι γνωστή και ως «χρυσή ίνα» (*golden fiber*). Η γιούτα καλλιεργείται κυρίως στην Ινδία με 55% της παραγωγής και το Μπανγκλαντές με 42%, να αντιπροσωπεύουν το μεγαλύτερο ποσοστό της παγκόσμιας παραγωγής (Textile Blog, 2025).

Η γιούτα είναι μία από τις οικονομικότερες φυσικές ίνες και κατατάσσεται δεύτερη μετά το βαμβάκι ως προς την παραγόμενη ποσότητα και την ποικιλία των εφαρμογών της. Μπορεί να υφανθεί σε χονδρά και ανθεκτικά νήματα και, όταν χρησιμοποιείται σε υφαντή μορφή, είναι γνωστή ως *hessian* ή *burlap* (Vaishnavi & Krishnaveni, 2022). Παράλληλα, παρουσιάζει αυξανόμενο ενδιαφέρον για την παραγωγή βιοσύνθετων και ενισχυμένων πολυμερικών υλικών, καθώς οι ίνες γιούτας μπορούν σε ορισμένες εφαρμογές να χρησιμοποιηθούν ως εναλλακτική λύση έναντι συμβατικών ενισχυτικών ινών, όπως οι ίνες γυαλιού (Ashraf et al., 2019).

Η ίνα γιούτας αποτελείται κυρίως από κυτταρίνη (58–70%), ημικυτταρίνη (12–24%) και λιγνίνη (5–15%), γεγονός που της προσδίδει καλή μηχανική αντοχή και βιοαποικοδομησιμότητα. Παράλληλα, παρουσιάζει χαμηλό κόστος παραγωγής, καλή θερμομονωτική και ηχομονωτική συμπεριφορά και υψηλή διαθεσιμότητα, χαρακτηριστικά που την καθιστούν ελκυστική για βιομηχανικές και περιβαλλοντικές εφαρμογές (Vaishnavi & Krishnaveni, 2022). Οι ίνες γιούτας παρουσιάζουν ικανοποιητική ειδική αντοχή και ακαμψία σε σχέση με το χαμηλό βάρος τους. Η δομή τους αποτελείται από επιμήκη κυτταρικά στοιχεία με κεντρική κοιλότητα (*lumen*), η οποία συμβάλλει στη χαμηλή πυκνότητα και στις καλές μονωτικές ιδιότητες του υλικού (Iqbal et al., 2025). Η παραγωγή της γιούτας περιλαμβάνει τη συγκομιδή των φυτών, την εμβάπτιση των στελεχών σε νερό (*retting*), τον διαχωρισμό των ινών από τον φλοιό, το πλύσιμο, την ξήρανση και τέλος την ταξινόμηση των ινών σύμφωνα με την ποιότητά τους (Vaishnavi & Krishnaveni, 2022). Η διαδικασία *retting* είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επηρεάζει σημαντικά τη μηχανική συμπεριφορά και την καθαρότητα των παραγόμενων ινών (Iqbal et al., 2025).

Οι ίνες γιούτας χρησιμοποιούνται ευρέως στην παραγωγή σάκων, σχοινιών, λινάτσας, χαλιών, γεωφασμάτων και διακοσμητικών υφασμάτων λόγω του χαμηλού κόστους, της ανθεκτικότητας και της εύκολης επεξεργασίας τους (Moulya, 2026). Τα τελευταία χρόνια η γιούτα αξιοποιείται όλο και περισσότερο ως υλικό ενίσχυσης σε σύνθετα πολυμερή και βιοσύνθετα υλικά, προσφέροντας χαμηλό

βάρος και ικανοποιητική μηχανική αντοχή. Οι εφαρμογές της περιλαμβάνουν δομικά πάνελ, μονωτικά υλικά, προϊόντα συσκευασίας και εξαρτήματα σύνθετων υλικών (Iqbal et al., 2025; Shahinur et al., 2022). Η απόδοση των σύνθετων υλικών γιούτας μπορεί να βελτιωθεί μέσω χημικών και φυσικών κατεργασιών, της ενσωμάτωσης νανοϋλικών και της ανάπτυξης υβριδικών σύνθετων συστημάτων με φυσικές ή συνθετικές ίνες (Rahman et al., 2025).

Στον κατασκευαστικό τομέα, οι ίνες γιούτας χρησιμοποιούνται σε γεωυφάσματα για τον έλεγχο της διάβρωσης και σε τσιμεντοειδή σύνθετα υλικά. Η ενσωμάτωσή τους μπορεί να μεταβάλει τη μηχανική συμπεριφορά του κονιάματος, ενώ η τελική επίδραση εξαρτάται από την περιεκτικότητα και την επεξεργασία των ινών. Από περιβαλλοντική άποψη, η αξιοποίησή τους σε σύνθετα υλικά μπορεί να συμβάλει στη μείωση της χρήσης συμβατικών ενισχυτικών υλικών και στην προώθηση ανανεώσιμων πρώτων υλών (Gil et al., 2024). Η φυσική προέλευση και η δυνατότητα βιοαποδόμησης των ινών γιούτας ενισχύουν επίσης το ενδιαφέρον για εφαρμογές που συνδέονται με τη βιώσιμη ανάπτυξη και την κυκλική οικονομία (Shahinur et al., 2022).

Πίνακας 7: Ιδιότητες ινών γιούτα (Ansys, 2022)

Κατηγορία	Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδα
Γενικές Ιδιότητες	Επιφάνεια διατομής ίνας	$3,1 \times 10^{-4} - 5,3 \times 10^{-4}$	mm ²
	Πυκνότητα	1440 – 1520	kg/m ³
	Ανάκτηση υγρασίας (Moisture regain)	13 – 14	%
	Τιμή υλικού	0,111 – 0,341	EUR/kg
Μηχανικές Ιδιότητες	Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus)	17 – 55	GPa
	Μέτρο διάτμησης (Shear modulus)	6,3 – 20	GPa
	Μέτρο όγκου (Bulk modulus)	22 – 42,4	GPa
	Λόγος Poisson	0,349 – 0,352	–
	Όριο διαρροής	145 – 530	MPa
	Αντοχή σε εφελκυσμό	400 – 770	MPa
	Επιμήκυνση θραύσης	1,7 – 2,0	%
	Αντοχή κόπωσης (10 ⁷ κύκλοι)	160 – 308	MPa
	Δυσθραυστότητα (Fracture toughness)	0,701 – 16,1	MPa·m ^{1/2}
	Συντελεστής μηχανικών απωλειών (tan δ)	0,00226 – 0,00325	–
Θερμικές Ιδιότητες	Μέγιστη θερμοκρασία λειτουργίας	400 – 420	°C
	Θερμική συμπεριφορά	Ανεπαρκής μονωτής	–

Κατηγορία	Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδα
	Θερμική αγωγιμότητα	0,25 – 0,35	W/m·°C
	Ειδική θερμότητα	1200 – 1220	J/kg·°C
	Συντελεστής θερμικής διαστολής	15 – 30	μstrain/°C
Ανθεκτικότητα / Ευφλεκτότητα	Δείκτης οξυγόνου (LOI)	17 – 19	%
Περιβαλλοντικοί Δείκτες	Ενσωματωμένη ενέργεια πρωτογενούς παραγωγής	94,5 – 104	MJ/kg
	Ανθρακικό αποτύπωμα πρωτογενούς παραγωγής	0,95 – 1,05	kg CO ₂ eq/kg
	Κατανάλωση νερού	2550 – 2800	L/kg
Ανακύκλωση	Ανακυκλώσιμο υλικό	Όχι	–
	Δυνατότητα υποβάθμισης ιδιοτήτων (Downcycling)	Ναι	–
Κρίσιμες Πρώτες Ύλες	Υψηλός κίνδυνος κρίσιμων υλικών	Όχι	–

Οι ίνες γιούτας παρουσιάζουν ικανοποιητική ειδική αντοχή και ακαμψία σε σχέση με το χαμηλό βάρος τους. Η δομή τους αποτελείται από επιμήκη κυτταρικά στοιχεία με κεντρική κοιλότητα (lumen), η οποία συμβάλλει στη χαμηλή πυκνότητα και στις καλές μονωτικές ιδιότητες του υλικού. (Ansys, 2022)

3.9.2 Ίνες Γιούτα: Ανακύκλωση & Περιβαλλοντικές Επιπτώσεις

Η γιούτα θεωρείται μία από τις πλέον φιλικές προς το περιβάλλον φυσικές ίνες. Είναι ανανεώσιμος πόρος, βιοαποικοδομήσιμη και ανακυκλώσιμη, ενώ κατά την ανάπτυξη των φυτών δεσμεύονται σημαντικές ποσότητες διοξειδίου του άνθρακα από την ατμόσφαιρα. Επιπλέον, η παραγωγή της απαιτεί μικρότερες ποσότητες ενέργειας σε σύγκριση με τις συνθετικές ίνες όπως το πολυπροπυλένιο και οι ίνες γυαλιού (Ashraf et al., 2019). Τα σύνθετα υλικά με βάση τις ίνες γιούτας αποτελούν μία από τις πιο υποσχόμενες κατηγορίες βιοσύνθετων υλικών, καθώς συνδυάζουν χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα, ανανεωσιμότητα και ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες. Η αυξανόμενη ανάγκη αντικατάστασης των συμβατικών συνθετικών σύνθετων υλικών, τα οποία συνδέονται με υψηλές εκπομπές άνθρακα, δυσκολίες ανακύκλωσης και προβλήματα διαχείρισης αποβλήτων, έχει οδηγήσει σε σημαντική ενίσχυση της έρευνας γύρω από τα σύνθετα γιούτας (Ashraf et al., 2019).

Οι ίνες γιούτας παρουσιάζουν καλή αναλογία αντοχής προς βάρος, χαμηλή πυκνότητα και ευρεία διαθεσιμότητα, ενώ μπορούν να ενσωματωθούν σε πολυμερικές μήτρες μέσω τεχνικών όπως η χειροστρωμάτωση, η χύτευση μεταφοράς ρητίνης, η εξώθηση και η παλτρουζιόν. Ωστόσο, η υδρόφιλη

φύση τους και η περιορισμένη πρόσφυση μεταξύ ίνας και μήτρας αποτελούν βασικούς περιορισμούς, οι οποίοι μπορούν να αντιμετωπιστούν με χημικές και φυσικοχημικές κατεργασίες, όπως η αλκαλική επεξεργασία και η ακτινοβόληση (Ashraf et al., 2019). Επιπλέον, η ανάπτυξη υβριδικών σύνθετων υλικών, όπου οι ίνες γιούτας συνδυάζονται με συνθετικές ή άλλες φυσικές ίνες, οδηγεί σε βελτιωμένες μηχανικές, θερμικές και φυσικές ιδιότητες. Χάρη στα χαρακτηριστικά αυτά, τα σύνθετα υλικά γιούτας βρίσκουν εφαρμογή σε πολλούς τομείς, όπως η κλωστοϋφαντουργία, οι κατασκευές, η αυτοκινητοβιομηχανία, η συσκευασία, η επιπλοποιία και οι ιατρικές εφαρμογές, ενώ αναμένεται να διαδραματίσουν ακόμη σημαντικότερο ρόλο στο πλαίσιο της βιώσιμης ανάπτυξης και της κυκλικής οικονομίας (Ashraf et al., 2019)

Οι ίνες γιούτας μπορούν να ανακυκλωθούν μηχανικά μέσω τεμαχισμού και επαναχρησιμοποίησης σε σύνθετα υλικά χαμηλότερων απαιτήσεων. Επιπλέον, λόγω της λιγνοκυτταρινικής τους φύσης είναι πλήρως βιοαποικοδομήσιμες και μπορούν να κομποστοποιηθούν στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Οι ίνες γιούτας παρουσιάζουν υψηλή βιοαποικοδομησιμότητα λόγω της λιγνοκυτταρινούχας φύσης τους. Υπό ευνοϊκές περιβαλλοντικές συνθήκες, οι ίνες χάνουν σημαντικό μέρος της μηχανικής τους αντοχής μέσα σε περίπου τέσσερις μήνες, ενώ η πλήρης βιοαποδόμησή τους στο έδαφος πραγματοποιείται συνήθως σε διάστημα 1–2 ετών. Το χαρακτηριστικό αυτό καθιστά τη γιούτα σημαντικό ανανεώσιμο και περιβαλλοντικά φιλικό υλικό για εφαρμογές που ακολουθούν τις αρχές της κυκλικής οικονομίας και της βιώσιμης ανάπτυξης (Shahinur et al., 2022). Η δυνατότητα αυτή συμβάλλει στη μείωση των αποβλήτων και στην προώθηση των αρχών της κυκλικής οικονομίας. Τα σύνθετα υλικά με βάση τις ίνες γιούτας αποτελούν μια πολλά υποσχόμενη και φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση έναντι των συμβατικών συνθετικών υλικών, καθώς συνδυάζουν χαρακτηριστικά όπως η βιοαποικοδομησιμότητα, η ανανεωσιμότητα, το χαμηλό βάρος και το σχετικά χαμηλό κόστος παραγωγής (Rahman et al., 2025).

Η αυξανόμενη χρήση της σε βιοσύνθετα και υβριδικά σύνθετα υλικά αποδεικνύει ότι μπορεί να αποτελέσει αξιόπιστη εναλλακτική λύση έναντι πολλών συνθετικών ενισχυτικών υλικών. Παρά τους περιορισμούς που σχετίζονται με την απορρόφηση υγρασίας και τη μεταβλητότητα των ιδιοτήτων της, η γιούτα παρουσιάζει σημαντικές προοπτικές στον τομέα των βιώσιμων υλικών και της πράσινης βιομηχανίας. Με την υιοθέτηση καινοτόμων τεχνολογιών παραγωγής και τη στήριξη της βιομηχανικής τους εμπορευματοποίησης, οι ίνες γιούτας μπορούν να εξελιχθούν από ένα παραδοσιακό φυσικό υλικό σε βασικό συστατικό των βιώσιμων τεχνολογιών του μέλλοντος (Rahman et al., 2025).

Τέλος σε μελέτη που έγινε φαίνεται ότι τα σύνθετα υλικά ενισχυμένα με ίνες γιούτας που βασίζονται είτε σε βιοαποικοδομήσιμες πολυμερικές μήτρες (PLA, PBS) είτε σε συμβατικά πολυμερή

(PP, PE), τα σύνθετα PLA–Jute και PBS–Jute παρουσίασαν υψηλότερη βιοαποικοδομησιμότητα, γεγονός που τα καθιστά κατάλληλα για εφαρμογές μικρής διάρκειας ζωής, όπως οι οικολογικές συσκευασίες. Αντίθετα, τα σύνθετα PP–Jute και PE–Jute, με τη χρήση μηλεϊνικού ανυδρίτη ως συμβιβαστικού παράγοντα, εμφάνισαν ανώτερες μηχανικές και θερμικές ιδιότητες, μεγαλύτερη ανθεκτικότητα στην υγρασία και αυξημένη σταθερότητα σε απαιτητικές συνθήκες λειτουργίας (Moulya, 2026).

3.10 Ίνες Κέναφ / Kenaf Fiber

3.10.1 Γενικά

Το κενάφ (*Hibiscus cannabinus* L.) είναι ένα ετήσιο ινώδες φυτό της οικογένειας Malvaceae, στην οποία ανήκουν επίσης το βαμβάκι και η γιούτα. Κατάγεται από την Αφρική, αλλά σήμερα καλλιεργείται ευρέως σε τροπικές και υποτροπικές περιοχές της Ασίας, της Αμερικής και της Ευρώπης για την παραγωγή φυσικών ινών και βιομάζας (Shahinur et al., 2022). Το φυτό αναπτύσσεται εξαιρετικά γρήγορα, φθάνοντας ύψος 3–5 m μέσα σε 4–6 μήνες, γεγονός που το καθιστά μία από τις πλέον παραγωγικές φυσικές καλλιέργειες για βιομηχανική χρήση (Raman Bharath et al., 2015).

Οι ίνες κενάφ εξάγονται κυρίως από τον φλοιό του στελέχους (bast fibers) και χαρακτηρίζονται από χαμηλή πυκνότητα, υψηλή περιεκτικότητα σε κυτταρίνη και ικανοποιητικές μηχανικές ιδιότητες (Austin et al., 2024). Η χημική τους σύσταση περιλαμβάνει κυτταρίνη, ημικυτταρίνη και λιγνίνη, στοιχεία που προσδίδουν καλή αντοχή σε εφελκυσμό και παράλληλα επιτρέπουν τη φυσική βιοαποικοδόμηση του υλικού στο περιβάλλον. Η υψηλή αναλογία κυτταρίνης συμβάλλει ιδιαίτερα στη βελτίωση της μηχανικής συμπεριφοράς των σύνθετων υλικών που ενισχύονται με ίνες κενάφ (Khalil et al., 2010).

Οι μηχανικές και φυσικές ιδιότητες των ινών κενάφ τις καθιστούν κατάλληλες για χρήση ως ενισχυτικά μέσα σε πολυμερικές μήτρες. Η ενσωμάτωσή τους σε σύνθετα υλικά ενισχυμένων με φυσικές ίνες, μπορεί να βελτιώσει σημαντικά την ακαμψία και την αντοχή, διατηρώντας παράλληλα χαμηλό το συνολικό βάρος της κατασκευής (Mohammed et al., 2015). Οι ίνες του διαθέτουν ευνοϊκή σχέση αντοχής προς βάρος, χαμηλό κόστος παραγωγής, ανανεώσιμη προέλευση και μικρό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Επιπλέον, η καλή συμβατότητά τους με βιοπολυμερή και θερμοπλαστικά υλικά ενισχύει τη χρήση τους σε εφαρμογές που απαιτούν υψηλή περιβαλλοντική απόδοση (Peças et al., 2018). Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται όλο και περισσότερο στην παραγωγή βιοσύνθετων υλικών για εφαρμογές στην αυτοκινητοβιομηχανία, για εσωτερικά πάνελ, επενδύσεις θυρών, υποστρώματα καθισμάτων και άλλα μη δομικά εξαρτήματα. Στις κατασκευές σε μονωτικά υλικά, δομικά πάνελ, στη ναυπηγική και στη βιομηχανία συσκευασίας καθώς και σε γεωφράγματα

(Mohammed et al., 2015). Επιπρόσθετα, το κενάφ χρησιμοποιείται στην παραγωγή χαρτιού, βιοενέργειας, απορροφητικών υλικών, ζωοτροφών και βιοπλαστικών. Η δυνατότητα αξιοποίησης σχεδόν ολόκληρου του φυτού ενισχύει την οικονομική και περιβαλλοντική βιωσιμότητά του, καθιστώντας το σημαντική πρώτη ύλη για εφαρμογές κυκλικής οικονομίας (Austin et al., 2024).

Πίνακας 8: Ιδιότητες ινών κενάφ (Ansys, 2022)

Κατηγορία	Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδα
Γενικές Ιδιότητες	Πυκνότητα	1,20 – 1,45	g/cm ³
	Διάμετρος ίνας	50 – 200	μm
	Περιεκτικότητα σε κυτταρίνη	45 – 72	% κ.β.
	Περιεκτικότητα σε ημικυτταρίνη	8 – 21	% κ.β.
	Περιεκτικότητα σε λιγνίνη	8 – 19	% κ.β.
	Απορρόφηση υγρασίας	8 – 13	%
	Κόστος ίνας κενάφ	0,3-3	€/kg
Μηχανικές Ιδιότητες	Μέτρο ελαστικότητας (Young's modulus)	14 – 60	GPa
	Αντοχή σε εφελκυσμό	295 – 930	MPa
	Επιμήκυνση θραύσης	1,5 – 3,0	%
	Ειδική αντοχή	Υψηλή	–
	Αντοχή σε κάμψη σύνθετων υλικών	50 – 150	MPa
Θερμικές Ιδιότητες	Θερμική αγωγιμότητα	0,04 – 0,10	W/m·K
	Ειδική θερμότητα	1200 – 1700	J/kg·K
	Θερμοκρασία έναρξης θερμικής αποδόμησης	220 – 260	°C
	Μέγιστη θερμοκρασία επεξεργασίας	200 – 220	°C
Ανθεκτικότητα / Ευφλεκτότητα	Δείκτης οξυγόνου (LOI)	18 – 21	%
	Συμπεριφορά σε καύση	Εύφλεκτο φυσικό υλικό	–
	Ανθεκτικότητα σε υγρασία	Μέτρια	–
Περιβαλλοντικοί Δείκτες	Ενσωματωμένη ενέργεια	5 – 15	MJ/kg
	Ανθρακικό αποτύπωμα	0,3 – 0,8	kg CO ₂ eq/kg
	Κατανάλωση νερού παραγωγής	300 – 1500	L/kg
	Δέσμευση CO ₂ κατά την ανάπτυξη	Υψηλή	–
Ανακύκλωση	Ανακυκλώσιμο υλικό	Ναι	–
	Βιοαποικοδομήσιμο	Ναι	–

Κατηγορία	Ιδιότητα	Τιμή	Μονάδα
	Χρόνος βιοαποικοδόμησης	6 μήνες – 2 έτη	–
	Δυνατότητα κομποστοποίησης	Ναι	–
Κρίσιμες Πρώτες Ύλες	Υψηλός κίνδυνος κρίσιμων υλικών	Όχι	–

3.10.2 Περιβαλλοντικές επιπτώσεις για ίνες κενάφ και ανακύκλωση

Οι ίνες κενάφ θεωρούνται ιδιαίτερα φιλικές προς το περιβάλλον, καθώς προέρχονται από ανανεώσιμη πρώτη ύλη με υψηλό ρυθμό ανάπτυξης και σημαντική ικανότητα δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα κατά τη διάρκεια της καλλιέργειας. Παράλληλα, η παραγωγή τους απαιτεί μικρότερη κατανάλωση ενέργειας σε σύγκριση με την παραγωγή συνθετικών ενισχυτικών ινών, συμβάλλοντας στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου (Peças et al., 2018).

Ένα ακόμη σημαντικό πλεονέκτημα είναι η βιοαποικοδομησιμότητα των ινών. Υπό φυσικές συνθήκες υγρασίας και μικροβιακής δραστηριότητας, το κενάφ αποδομείται χωρίς να αφήνει τοξικά κατάλοιπα στο περιβάλλον. Σε σύνθετα υλικά με θερμοπλαστικές μήτρες μπορεί να εφαρμοστεί μηχανική ανακύκλωση, ενώ σε συνδυασμό με βιοδιασπώμενα πολυμερή είναι δυνατή η κομποστοποίηση στο τέλος του κύκλου ζωής τους. Ως αποτέλεσμα, το κενάφ αποτελεί μια ιδιαίτερα ελκυστική επιλογή για την ανάπτυξη βιώσιμων βιοσύνθετων υλικών και την προώθηση των αρχών της κυκλικής οικονομίας (Mohammed et al., 2015).

Ένα σημαντικό πλεονέκτημα του κενάφ είναι η υψηλή ικανότητα δέσμευσης διοξειδίου του άνθρακα κατά την ανάπτυξή του. Παράλληλα, η καλλιέργειά του αποδίδει μεγάλες ποσότητες βιομάζας ανά μονάδα έκτασης και απαιτεί σχετικά μικρό χρόνο ανάπτυξης σε σύγκριση με άλλες βιομηχανικές καλλιέργειες. Ως αποτέλεσμα, το κενάφ θεωρείται στρατηγικό υλικό για την ανάπτυξη προϊόντων που εντάσσονται στις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης και της κυκλικής οικονομίας (Austin et al., 2024).

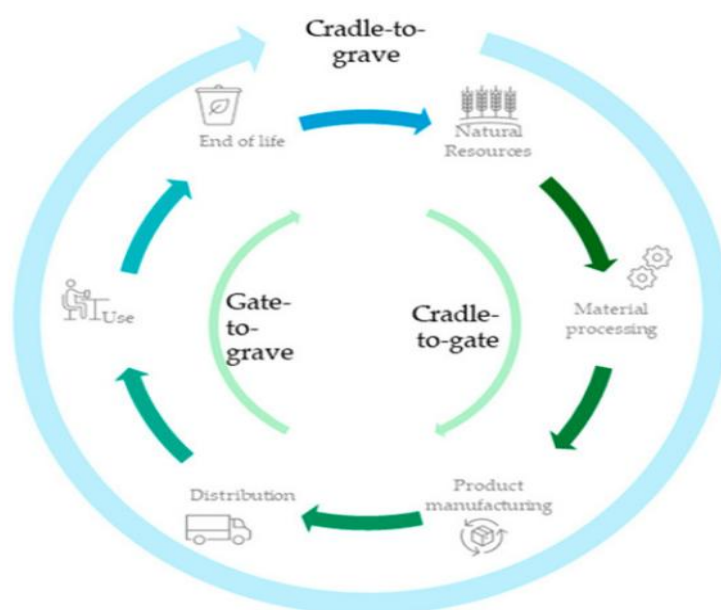
Παρά τα σημαντικά πλεονεκτήματά του, οι ίνες κενάφ παρουσιάζουν αυξημένη υδροφιλικότητα και απορρόφηση υγρασίας, όπως οι περισσότερες φυσικές ίνες. Για τον λόγο αυτό εφαρμόζονται συχνά χημικές ή επιφανειακές κατεργασίες ώστε να βελτιωθεί η πρόσφυση μεταξύ ίνας και πολυμερικής μήτρας και να αυξηθεί η ανθεκτικότητα των παραγόμενων σύνθετων υλικών (Khalil et al., 2010).

4 Κύκλος Ζωής Προϊόντων

Ο κύκλος ζωής ενός προϊόντος (Product Life Cycle - PLC) περιγράφει το σύνολο των σταδίων που διανύει ένα προϊόν από τη σύλληψη και τον σχεδιασμό του έως την απόσυρση ή την τελική διαχείρισή του ως απόβλητο. Η έννοια αυτή χρησιμοποιείται ευρέως τόσο στη διοίκηση επιχειρήσεων όσο και στην περιβαλλοντική αξιολόγηση προϊόντων, καθώς επιτρέπει την κατανόηση των οικονομικών, τεχνολογικών και περιβαλλοντικών επιπτώσεων που προκύπτουν σε κάθε στάδιο της ζωής ενός προϊόντος (Kreimeyer et al., 2025).

Η ανάπτυξη της Αξιολόγησης Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment – LCA) αποτελεί μια περιβαλλοντική προσέγγιση, οι απαρχές της οποίας εντοπίζονται ήδη από τη δεκαετία του 1960. Η σημασία της ενισχύθηκε με την πάροδο των ετών, καθώς η αυξανόμενη περιβαλλοντική επιβάρυνση που συνδέεται με βιομηχανικές και τεχνολογικές δραστηριότητες ανέδειξε την ανάγκη για συστηματική αξιολόγηση της κατανάλωσης πόρων και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων σε ολόκληρο τον κύκλο ζωής. Η διεθνής τυποποίηση της μεθοδολογίας αποτυπώνεται, μεταξύ άλλων, στο πρότυπο ISO 14040, το οποίο καθορίζει τις βασικές αρχές και το πλαίσιο της LCA (ISO, 2006; Kaynak et al., 2025).

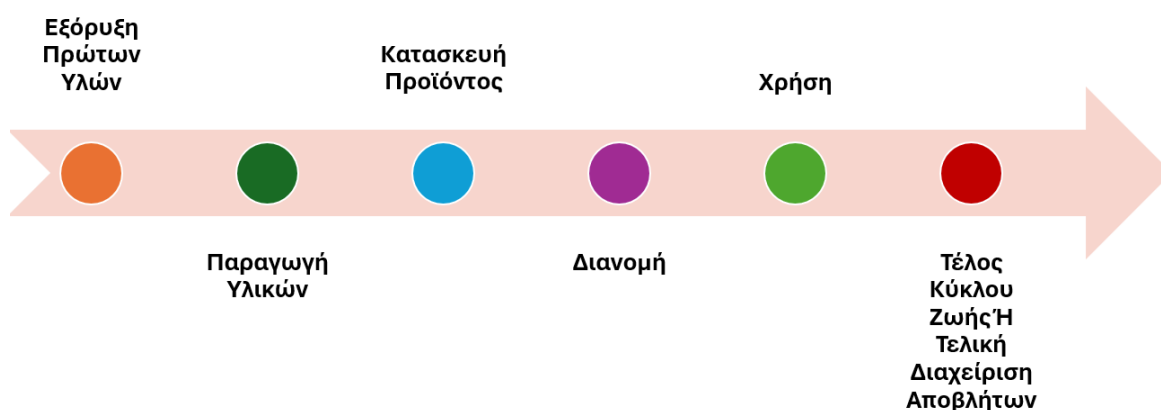
Σύμφωνα με το πρότυπο ISO 14040, ο κύκλος ζωής ενός προϊόντος περιλαμβάνει όλα τα στάδια από την εξόρυξη και επεξεργασία των πρώτων υλών, την παραγωγή και διανομή, τη χρήση από τον καταναλωτή και τέλος τη διαχείριση στο τέλος της ζωής του, όπως η ανακύκλωση, η επαναχρησιμοποίηση ή η τελική διάθεση. Η προσέγγιση αυτή είναι γνωστή ως “cradle to grave” («από την κούνια έως τον τάφο») και αποτελεί τη βάση για την Ανάλυση Κύκλου Ζωής (ISO, 2006).



Σχήμα 9: Κύκλος ζωής προϊόντων από το στάδιο της παραγωγής έως την τελική διάθεση (cradle to grave) (Kaynak et al., 2025).

Ο κύκλος ζωής ενός προϊόντος διακρίνεται συνήθως σε τέσσερα βασικά στάδια: εισαγωγή, ανάπτυξη, ωριμότητα και παρακμή. Κατά το στάδιο της εισαγωγής το προϊόν εμφανίζεται για πρώτη φορά στην αγορά, με σχετικά χαμηλές πωλήσεις και υψηλό κόστος ανάπτυξης και προώθησης. Στο στάδιο της ανάπτυξης οι πωλήσεις αυξάνονται σημαντικά λόγω της αποδοχής του προϊόντος από τους καταναλωτές. Ακολουθεί το στάδιο της ωριμότητας, όπου οι πωλήσεις σταθεροποιούνται και ο ανταγωνισμός αυξάνεται, ενώ τέλος το στάδιο της παρακμής χαρακτηρίζεται από μείωση της ζήτησης και σταδιακή απόσυρση του προϊόντος από την αγορά (Yadav, 2016).

Από περιβαλλοντική άποψη, ο κύκλος ζωής ενός προϊόντος μπορεί να εξεταστεί με έμφαση στις ροές υλικών και πόρων που απαιτούνται σε κάθε στάδιο. Στο πλαίσιο αυτό αξιολογούνται οι περιβαλλοντικές επιπτώσεις από την εξόρυξη και επεξεργασία των πρώτων υλών, την παραγωγή και τη μεταφορά έως τη χρήση, την επαναχρησιμοποίηση, την ανακύκλωση ή την τελική διάθεση. Η έννοια δεν περιορίζεται στο τελικό προϊόν, αλλά περιλαμβάνει τις πρώτες ύλες, τους φυσικούς πόρους, τις διεργασίες μετασχηματισμού και τις εκπομπές που συνδέονται με το σύστημα του προϊόντος. Η θεώρηση αυτή αποτελεί τη βάση για προσεγγίσεις όπως η Αξιολόγηση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Assessment – LCA), η Κοστολόγηση Κύκλου Ζωής (Life Cycle Costing – LCC) και, σε ευρύτερο πλαίσιο, η αξιολόγηση κοινωνικών επιπτώσεων (Kreimeyer et al., 2025).



Σχήμα 10: 6 Φάσεις του κύκλου ζωής ενός προϊόντος

Σήμερα που βιώνουμε την Τέταρτη Βιομηχανική Επανάσταση, η βιωσιμότητα αποτελεί βασικό παράγοντα στον σχεδιασμό και την αξιολόγηση των προϊόντων. Οι επιχειρήσεις δίνουν ακόμα μεγαλύτερη έμφαση στην ανάπτυξη προϊόντων με περιορισμένες περιβαλλοντικές επιπτώσεις, ώστε να ανταποκρίνονται στις αυξημένες απαιτήσεις των καταναλωτών και της αγοράς για βιώσιμες και

φιλικές προς το περιβάλλον λύσεις. Η ενσωμάτωση οικολογικών πρακτικών στη διαδικασία ανάπτυξης προϊόντων συμβάλλει στη βελτίωση της περιβαλλοντικής απόδοσης και στην προώθηση της βιώσιμης ανάπτυξης (Kreimeyer et al., 2025).

Έτσι η μελέτη του κύκλου ζωής επιτρέπει την αναγνώριση των σταδίων όπου παρατηρούνται οι μεγαλύτερες καταναλώσεις ενέργειας, φυσικών πόρων και πρώτων υλών, καθώς και οι σημαντικότερες περιβαλλοντικές επιβαρύνσεις. Μέσω της Ανάλυσης Κύκλου Ζωής μπορούν να υπολογιστούν οι εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου, η κατανάλωση νερού, η παραγωγή αποβλήτων και άλλες περιβαλλοντικές επιπτώσεις που σχετίζονται με ένα προϊόν. Η μέθοδος αυτή συμβάλλει στη λήψη αποφάσεων για τον οικολογικό σχεδιασμό προϊόντων και την εφαρμογή πρακτικών βιώσιμης ανάπτυξης (Kaynak et al., 2025).

Ιδιαίτερη σημασία αποκτά σήμερα η ένταξη των αρχών της κυκλικής οικονομίας στον κύκλο ζωής των προϊόντων. Η κυκλική οικονομία επιδιώκει την παράταση της διάρκειας ζωής των προϊόντων μέσω επαναχρησιμοποίησης, επισκευής, ανακατασκευής και ανακύκλωσης, μειώνοντας έτσι την ανάγκη εξόρυξης νέων πρώτων υλών και περιορίζοντας την παραγωγή αποβλήτων. Στο πλαίσιο αυτό, ο παραδοσιακός κύκλος ζωής μετατρέπεται σε έναν περισσότερο «κυκλικό» κύκλο διαχείρισης πόρων, ο οποίος συμβάλλει στη μείωση του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των προϊόντων (Kaynak et al., 2025).

Η κατανόηση του κύκλου ζωής των προϊόντων είναι ιδιαίτερα σημαντική για τη βιομηχανία, καθώς επιτρέπει την ανάπτυξη πιο αποδοτικών και περιβαλλοντικά φιλικών προϊόντων. Παράλληλα, παρέχει τη δυνατότητα στις επιχειρήσεις να βελτιώνουν τις διαδικασίες παραγωγής τους, να μειώνουν το κόστος διαχείρισης αποβλήτων και να ανταποκρίνονται στις αυξανόμενες απαιτήσεις για βιώσιμη ανάπτυξη και περιβαλλοντική υπευθυνότητα (Kreimeyer et al., 2025).

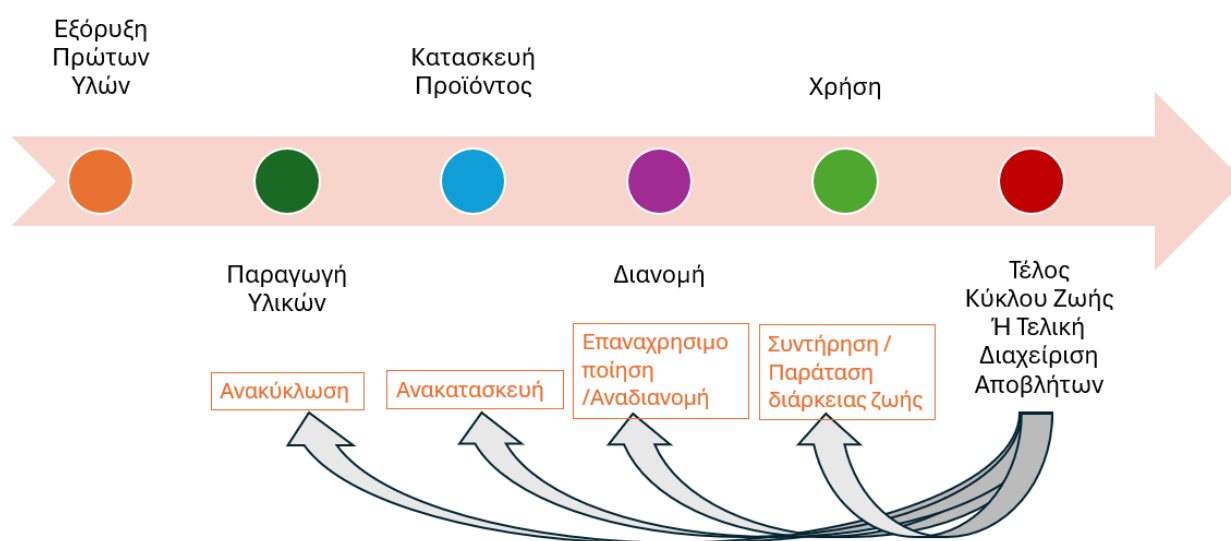
Κύκλος ζωής των προϊόντων και κυκλική οικονομία.

Μέχρι πρόσφατα, ο κύκλος ζωής ενός προϊόντος εξεταζόταν κυρίως ως μία ακολουθία σταδίων με σαφή αφετηρία, από την εξόρυξη των πρώτων υλών, και τελικό στάδιο τη διαχείριση του προϊόντος μετά το τέλος της χρήσης του. Η προσέγγιση αυτή, γνωστή ως «από την κούνια στον τάφο» (cradle to grave), συνδέεται με το παραδοσιακό γραμμικό μοντέλο παραγωγής και κατανάλωσης, σύμφωνα με το οποίο οι πόροι χρησιμοποιούνται για την παραγωγή προϊόντων, τα οποία μετά τη χρήση τους οδηγούνται σε ανακύκλωση, ανάκτηση ή τελική διάθεση (ISO, 2006).

Η μετάβαση προς την κυκλική οικονομία ενισχύει μία διαφορετική προσέγγιση, σύμφωνα με την οποία τα προϊόντα και τα υλικά τους επιδιώκεται να διατηρούνται στην οικονομία για όσο το δυνατόν

μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Σε αυτό το πλαίσιο, αναπτύχθηκε και η προσέγγιση «από την κούνια στην κούνια» (cradle to cradle), η οποία βασίζεται στην επανένταξη υλικών και εξαρτημάτων σε νέους κύκλους παραγωγής αντί της οριστικής απόρριψής τους. Έτσι, επιδιώκεται η διατήρηση της αξίας και της χρησιμότητας των πόρων μέσω επαναλαμβανόμενων κύκλων χρήσης και ανάκτησης (Braungart et al., 2007). Η προσέγγιση cradle to cradle εστιάζει ειδικά στη διατήρηση ή βελτίωση της ποιότητας των υλικών σε επόμενους κύκλους ζωής.

Η υιοθέτηση της κυκλικής οικονομίας επηρεάζει τόσο τις περιβαλλοντικές όσο και τις οικονομικές διαστάσεις του κύκλου ζωής των προϊόντων. Στρατηγικές όπως η επαναχρησιμοποίηση, η επισκευή, η ανακαίνιση, η ανακατασκευή και η ανακύκλωση επιδιώκουν την παράταση της διάρκειας ζωής των προϊόντων και τη διατήρηση της αξίας των υλικών για μεγαλύτερο χρονικό διάστημα. Για τον λόγο αυτό, οι σχετικές παράμετροι πρέπει να λαμβάνονται υπόψη ήδη κατά τον σχεδιασμό του προϊόντος και του επιχειρηματικού μοντέλου. Η βιβλιογραφία για τον κυκλικό σχεδιασμό διακρίνει χαρακτηριστικά στρατηγικές «επιβράδυνσης», «κλεισίματος» και «περιορισμού» των ροών πόρων (Bocken et al., 2016).



Σχήμα 11: 6 Φάσεις του κύκλου ζωής ενός προϊόντος αλλά με την διάσταση της χρήσης μετά το τέλος του κύκλου ζωής

Παράλληλα, η αξιολόγηση της κατανάλωσης πόρων και των περιβαλλοντικών επιπτώσεων διαφοροποιείται όταν εξετάζεται στο πλαίσιο της κυκλικής οικονομίας. Η δυνατότητα επιστροφής ενός προϊόντος στον παραγωγικό κύκλο εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τον σχεδιασμό του. Χαρακτηριστικά όπως η δυνατότητα αποσυναρμολόγησης, επισκευής και αντικατάστασης εξαρτημάτων, καθώς και η ανακυκλωσιμότητα των χρησιμοποιούμενων υλικών, μπορούν να διευκολύνουν την επαναχρησιμοποίηση, την ανακατασκευή και την ανάκτηση πόρων. Συνεπώς, οι

αρχές της κυκλικότητας είναι σκόπιμο να ενσωματώνονται ήδη από το στάδιο ανάπτυξης του προϊόντος (Bocken et al., 2016).

Για τη βέλτιστη αξιοποίηση ενός προϊόντος απαιτείται επομένως μία μακροπρόθεσμη προσέγγιση του κύκλου ζωής του. Μετά το τέλος της αρχικής φάσης χρήσης, ένα προϊόν μπορεί να οδηγηθεί σε επαναχρησιμοποίηση, επισκευή, ανακατασκευή, ανακύκλωση ή τελική διάθεση, ανάλογα με τα τεχνικά και οικονομικά χαρακτηριστικά του. Σε ορισμένες περιπτώσεις είναι επίσης δυνατή η αναβάθμιση του προϊόντος μέσω αλλαγών στο υλικό ή στο λογισμικό του, ώστε να βελτιώνονται οι υφιστάμενες λειτουργίες ή να προστίθενται νέες δυνατότητες. Με αυτόν τον τρόπο μπορεί να παραταθεί η ωφέλιμη ζωή του προϊόντος και να περιοριστεί η ανάγκη πρόωρης αντικατάστασής του (Kreimeyer et al., 2025).

Η επιλογή της αναβάθμισης ή της παράτασης της ζωής ενός προϊόντος δεν είναι πάντοτε τεχνικά εφικτή ή οικονομικά συμφέρουσα. Στο πλαίσιο αυτό, η συλλογή και η διαχείριση δεδομένων καθ' όλη τη διάρκεια ζωής του προϊόντος αποκτούν ιδιαίτερη σημασία. Οι πληροφορίες σχετικά με την κατάσταση, τη χρήση και την απόδοση ενός προϊόντος μπορούν να υποστηρίξουν την αξιολόγηση εναλλακτικών επιλογών διαχείρισης και τη λήψη αποφάσεων σχετικά με τη συντήρηση, την επισκευή, την αναβάθμιση ή την αντικατάστασή του προϊόντος (Kreimeyer et al., 2025).

Τα δεδομένα αυτά μπορούν επίσης να αξιοποιηθούν για τον εντοπισμό ευκαιριών βελτιστοποίησης των προϊόντων και των παραγωγικών διαδικασιών. Η συστηματική διαχείριση πληροφοριών κατά τον κύκλο ζωής υποστηρίζει τόσο τις τεχνικές αποφάσεις όσο και την αξιολόγηση οικονομικών και οργανωτικών παραμέτρων, ενισχύοντας τη δυνατότητα των επιχειρήσεων να σχεδιάζουν προϊόντα με μεγαλύτερη διάρκεια ζωής και καλύτερη αξιοποίηση των πόρων (Kreimeyer et al., 2025).

5 Μέθοδοι

5.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο περιγράφεται η μεθοδολογία που χρησιμοποιήθηκε για τη συγκριτική περιβαλλοντική αξιολόγηση των εξεταζόμενων προϊόντων. Η ανάλυση πραγματοποιήθηκε με το Ansys Granta EduPack Software for Materials Education και ειδικότερα με το εργαλείο Eco Audit, το οποίο επιτρέπει την εκτίμηση της ενεργειακής κατανάλωσης και των εκπομπών CO₂ σε βασικά στάδια του κύκλου ζωής, όπως τα υλικά, η κατασκευή, η μεταφορά και το τέλος ζωής.

5.2 Λογισμικό

Το Ansys Granta EduPack χρησιμοποιήθηκε ως εργαλείο screening για τη σύγκριση εναλλακτικών σεναρίων υλικών και σχεδιασμού για μάσκες FFP2, απλές χειρουργικές μάσκες και αντισταθμιστικά μαντηλάκια. Για κάθε σενάριο επιλέχθηκαν οι μάζες και τα υλικά των επιμέρους στοιχείων, οι παράμετροι μεταφοράς και οι διαθέσιμες επιλογές τέλους ζωής, και καταγράφηκαν οι δείκτες Energy και CO₂ που υπολογίζει το Eco Audit. Η προσέγγιση χρησιμοποιείται συγκριτικά και δεν πρέπει να ερμηνεύεται ως πλήρης, πιστοποιημένη μελέτη LCA για εμπορικό προϊόν, καθώς τα αποτελέσματα εξαρτώνται από τις βάσεις δεδομένων και τις παραδοχές του λογισμικού και δεν αξιολογούνται όλες οι κατηγορίες περιβαλλοντικών επιπτώσεων (Ansys, 2022).

5.3 Δεδομένα

5.3.1 Γενικές Πληροφορίες για Μάσκα Τύπου FFP2

Οι μάσκες τύπου FFP2 (Filtering Face Piece 2) ανήκουν στην κατηγορία των αναπνευστικών μέσων ατομικής προστασίας και έχουν σχεδιαστεί με κύριο σκοπό την προστασία του χρήστη από την εισπνοή αιωρούμενων σωματιδίων και αερολυμάτων. Σε αντίθεση με τις απλές χειρουργικές μάσκες, η προστατευτική τους λειτουργία εξαρτάται όχι μόνο από την απόδοση του φίλτρου αλλά και από την καλή εφαρμογή της μάσκας στο πρόσωπο, ώστε να περιορίζεται η είσοδος αέρα από κενά μεταξύ του προσώπου και της περιμέτρου της μάσκας (Jones & Rempel, 2021).

Στην Ευρωπαϊκή Ένωση, οι μάσκες FFP2 υπάγονται στον Κανονισμό (ΕΕ) 2016/425 για τα Μέσα Ατομικής Προστασίας και οι απαιτήσεις απόδοσής τους καθορίζονται από το πρότυπο EN 149:2001+A1:2009 Respiratory protective devices Filtering half masks to protect against particles Requirements, testing, marking. Ο Κανονισμός προβλέπει διαδικασίες αξιολόγησης συμμόρφωσης και σήμανση CE για τα αντίστοιχα Μέσα Ατομικής Προστασίας (European Parliament & Council of the European Union, 2016).

Σύμφωνα με το EN 149, οι αναπνευστικές μάσκες διακρίνονται σε FFP1, FFP2 και FFP3. Για τις FFP2 απαιτείται απόδοση διήθησης τουλάχιστον 94% έναντι των χρησιμοποιούμενων δοκιμαστικών αερολυμάτων. Το πρότυπο εξετάζει τη διείσδυση σωματιδίων στο φίλτρο με αερολύματα χλωριούχου νατρίου (NaCl) και παραφινέλαιου, καθώς και τη συνολική εσωτερική διαρροή της μάσκας. Για την κατηγορία FFP2 η μέση συνολική εσωτερική διαρροή δεν πρέπει να υπερβαίνει το 8% για τουλάχιστον οκτώ από τους δέκα εξεταζόμενους χρήστες. Η εφαρμογή της μάσκας στο πρόσωπο επομένως αποτελεί καθοριστικό παράγοντα της πραγματικής προστασίας που παρέχεται (European Committee for Standardization, 2009).

5.3.1.1 Κατασκευή και υλικά της FFP2

Οι FFP2 αποτελούνται συνήθως από περισσότερες από μία στρώσεις μη υφασμένων πολυμερών. Το πολυπροπυλένιο (polypropylene – PP) χρησιμοποιείται ευρέως λόγω του μικρού βάρους, της υδροφοβικότητας, της χημικής σταθερότητας και της δυνατότητας παραγωγής πολύ λεπτών ινών. Ιδιαίτερη σημασία έχει η ενδιάμεση στρώση melt-blown polypropylene, η οποία λειτουργεί ως κύριο φίλτρο (Wang et al., 2021).

Οι ίνες της στρώσης melt-blown μπορούν να φέρουν ηλεκτροστατικό φορτίο, σχηματίζοντας ένα λεγόμενο ηλεκτρετικό φίλτρο. Με αυτόν τον τρόπο επιτυγχάνεται αποτελεσματικότερη δέσμευση μικρών σωματιδίων χωρίς να απαιτείται υπερβολικά πυκνή δομή, η οποία θα αύξανε σημαντικά την αντίσταση στην αναπνοή (Xu et al., 2020).

Η κατακράτηση των σωματιδίων δεν πραγματοποιείται μέσω ενός μόνο μηχανισμού. Ανάλογα με το μέγεθος και την κινητική συμπεριφορά των σωματιδίων συμμετέχουν μηχανισμοί όπως:

- αδρανειακή πρόσκρουση
- παρεμπόδιση ή αναχαίτιση
- διάχυση Brown
- βαρυτική καθίζηση και
- ηλεκτροστατική έλξη.

Ο συνδυασμός της ινώδους δομής με την ηλεκτροστατική φόρτιση επιτρέπει την επίτευξη υψηλής απόδοσης διήθησης χωρίς αντίστοιχα μεγάλη αύξηση της πτώσης πίεσης και επομένως της δυσκολίας στην αναπνοή (Xu et al., 2020).

5.3.1.2 Σημασία της εφαρμογής της FFP2

Η ονομαστική απόδοση του υλικού του φίλτρου δεν ταυτίζεται απαραίτητα με την πραγματική προστασία του χρήστη. Εάν υπάρχουν κενά στην περιοχή της μύτης, των παρειών ή του πηγουνιού, μέρος του εισπνεόμενου αέρα μπορεί να παρακάμψει το φίλτρο. Για τον λόγο αυτό, η σωστή εφαρμογή και η στεγανοποίηση της μάσκας στο πρόσωπο αποτελούν βασικά χαρακτηριστικά της αποτελεσματικότητας της FFP2. Μελέτες σχετικά με την εφαρμογή των αναπνευστήρων έχουν δείξει ότι το σχήμα και η κατασκευή της μάσκας επηρεάζουν σημαντικά την επιτυχία των δοκιμών εφαρμογής (Jones & Rempel, 2021).

5.3.2 Γενικές Πληροφορίες για Απλή Χειρουργική Μάσκα

Η χειρουργική ή ιατρική μάσκα αποτελεί προϊόν διαφορετικής κατηγορίας και λειτουργίας από την FFP2. Στην Ευρώπη οι απαιτήσεις για τις ιατρικές μάσκες περιγράφονται στο πρότυπο EN 14683:2019+AC:2019 – Medical face masks – Requirements and test methods (European Committee for Standardization, 2019).

Βασικός σκοπός μιας χειρουργικής μάσκας είναι η δημιουργία φραγμού που περιορίζει κυρίως τη μετάδοση μολυσματικού υλικού μέσω σταγονιδίων από τον χρήστη προς το περιβάλλον, ενώ ανάλογα με τον τύπο της μπορεί να παρέχει και προστασία από εκτινάξεις υγρών. Σε αντίθεση με τις FFP2, το EN 14683 δεν καθορίζει απαίτηση συνολικής εσωτερικής διαρροής, επειδή οι χειρουργικές μάσκες δεν έχουν σχεδιαστεί για να δημιουργούν την ίδια στεγανή εφαρμογή γύρω από το πρόσωπο (Jones & Rempel, 2021).

5.3.2.1 Κατασκευή της χειρουργικής μάσκας

Οι περισσότερες χειρουργικές μάσκες αποτελούνται από τρεις στρώσεις μη υφασμένου υλικού. Μία τυπική κατασκευή περιλαμβάνει:

1. Εξωτερική στρώση spunbond, συνήθως από πολυπροπυλένιο, η οποία παρουσιάζει σχετικά υδρόφοβα χαρακτηριστικά και βοηθά στην προστασία από σταγονίδια.
2. Ενδιάμεση στρώση melt-blown, η οποία αποτελεί το βασικό υλικό διήθησης.
3. Εσωτερική στρώση spunbond, η οποία βρίσκεται σε επαφή με το πρόσωπο και συμβάλλει στην άνεση του χρήστη και στη διαχείριση της υγρασίας.

Το πολυπροπυλένιο είναι ένα από τα κυριότερα υλικά κατασκευής τόσο των spunbond όσο και των melt-blown στρώσεων. Η ενδιάμεση melt-blown στρώση αποτελείται από πολύ λεπτές, τυχαία προσανατολισμένες ίνες και αποτελεί το κύριο φίλτρο της μάσκας (Rahman et al., 2022).

5.3.3 Γενικές Πληροφορίες για Αντισηπτικά Μαντηλάκια

Τα αντισηπτικά μαντηλάκια είναι προκατασκευασμένα υλικά μίας χρήσης τα οποία είναι εμποτισμένα με αντισηπτικό διάλυμα και χρησιμοποιούνται για τη μείωση του μικροβιακού φορτίου. Ο όρος αντισηπτικό αφορά κανονικά ουσίες που εφαρμόζονται σε ζωντανούς ιστούς, όπως το δέρμα (Boyce, 2019). Αντίθετα, όταν ένα αντίστοιχο μαντηλάκι προορίζεται για πάγκους, εξοπλισμό ή άλλες άψυχες επιφάνειες, επιστημονικά ακριβέστερος είναι ο όρος απολυμαντικό μαντηλάκι (disinfectant wipe) (Song et al., 2019).

5.3.3.1 Σύσταση των αντισηπτικών μαντηλίων

Τα αντισηπτικά μαντηλάκια αποτελούνται από δύο βασικά στοιχεία:

α) Το υπόστρωμα του μαντηλιού

Πρόκειται συνήθως για μη υφασμένο υλικό, το οποίο πρέπει να έχει κατάλληλη απορροφητικότητα και μηχανική αντοχή, ώστε να συγκρατεί και ταυτόχρονα να απελευθερώνει επαρκή ποσότητα αντισηπτικού διαλύματος κατά τη χρήση (Song et al., 2019).

β) Το αντισηπτικό διάλυμα

Ανάλογα με το προϊόν μπορεί να περιλαμβάνει δραστικές ουσίες όπως:

- αιθανόλη,
- ισοπροπυλική αλκοόλη,
- χλωρεξιδίνη,
- συνδυασμό χλωρεξιδίνης και αλκοόλης,
- ιωδιούχες ενώσεις ή άλλους εγκεκριμένους αντιμικροβιακούς παράγοντες.

Οι αλκοόλες παρουσιάζουν ταχεία αντιμικροβιακή δράση και αποτελούν ιδιαίτερα συχνή βάση παρασκευασμάτων για αντισηψία του δέρματος. Η χλωρεξιδίνη παρουσιάζει επίσης ευρεία χρήση και χαρακτηρίζεται από υπολειμματική αντιμικροβιακή δράση λόγω της σύνδεσής της με τις πρωτεΐνες του δέρματος. Ο συνδυασμός χλωρεξιδίνης και αλκοόλης χρησιμοποιείται ευρέως σε εφαρμογές αντισηψίας του δέρματος (Maiwald & Chan, 2012).

5.3.3.2 Υλικά κατασκευής μαντηλιού και συσκευασίας

Το υπόστρωμα των υγρών αντισηπτικών ή απολυμαντικών μαντηλίων αποτελείται συνήθως από μη υφασμένο υλικό (nonwoven fabric). Ανάλογα με το προϊόν, οι ίνες μπορεί να είναι συνθετικές, όπως πολυεστέρας/πολυαιθυλενοτερεφθαλικό (PET) και πολυπροπυλένιο (PP), ή να συνδυάζονται με κυτταρινικές ίνες, όπως βισκόζη. Η επιλογή του υλικού επηρεάζει την απορροφητικότητα, τη

μηχανική αντοχή και την ικανότητα συγκράτησης και απελευθέρωσης του αντισηπτικού διαλύματος (Ó Briain et al., 2020).

Η συσκευασία των υγρών μαντηλιών πρέπει να περιορίζει την απώλεια υγρασίας και την εξάτμιση των δραστικών συστατικών. Για τον λόγο αυτό χρησιμοποιούνται συνήθως εύκαμπτα πλαστικά φιλμ, συχνά πολυστρωματικής κατασκευής, όπως συνδυασμοί PET/PE ή OPP/PE. Σε συσκευασίες που διαθέτουν επανακλειόμενο πλαστικό καπάκι, το καπάκι κατασκευάζεται συχνά από πολυπροπυλένιο (PP).

5.3.3.3 Παράγοντες που επηρεάζουν την αποτελεσματικότητα

Η αποτελεσματικότητα ενός μαντηλιού δεν εξαρτάται μόνο από το είδος και τη συγκέντρωση της δραστικής ουσίας. Σημαντική επίδραση μπορούν να έχουν:

- η ποσότητα του υγρού που περιέχεται στο μαντηλάκι,
- η σύσταση και η απορροφητικότητα του υποστρώματος,
- η ποσότητα δραστικής ουσίας που απελευθερώνεται κατά το σκούπισμα,
- ο απαιτούμενος χρόνος επαφής,
- η επιφάνεια που καλύπτεται από ένα μαντηλάκι,
- η μηχανική δράση του σκουπίσματος και
- η πιθανότητα μεταφοράς μικροοργανισμών από μία περιοχή σε μία άλλη (Song et al., 2019).

Μελέτες σε εμποτισμένα απολυμαντικά μαντηλάκια έχουν δείξει ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ του υλικού του μαντηλιού και της χημικής δραστικής ουσίας μπορεί να επηρεάσει ουσιαστικά την τελική απόδοση. Επομένως, η συγκέντρωση του απολυμαντικού διαλύματος από μόνη της δεν αρκεί για την πλήρη αξιολόγηση του προϊόντος (Song et al., 2019).

Η δράση του σκουπίσματος είναι επίσης συνδυασμός μηχανικής απομάκρυνσης και χημικής αδρανοποίησης των μικροοργανισμών. Πειραματικές μελέτες έχουν δείξει ότι διαφορετικά συστήματα μαντηλιών μπορούν να παρουσιάζουν διαφορές τόσο στη μείωση του μικροβιακού φορτίου όσο και στην πιθανότητα μεταφοράς βιώσιμων μικροοργανισμών σε επόμενες επιφάνειες (Song et al., 2019).

6 Πειραματική Διαδικασία

6.1 Εισαγωγή

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των σεναρίων που αναπτύχθηκαν στο Ansys Granta EduPack για μάσκες τύπου FFP2, απλές χειρουργικές μάσκες και αντισηπτικά μαντηλάκια. Η μεταφορά μοντελοποιήθηκε με φορτηγό 55 τόνων και οκτώ αξόνων για αποστάσεις 150 km, 330 km και 2.395 km. Τα προϊόντα αντιμετωπίζονται ως προϊόντα μίας χρήσης και οι συγκρίσεις βασίζονται στις ίδιες παραδοχές ανά Test, ώστε οι διαφορές να αποδίδονται κυρίως στις μεταβαλλόμενες παραμέτρους κάθε σεναρίου.

6.2 FFP2

Στο παρόν κεφάλαιο παρουσιάζονται και αξιολογούνται τα αποτελέσματα των πέντε ομάδων δοκιμών που πραγματοποιήθηκαν για τη διερεύνηση της περιβαλλοντικής επίδοσης διαφορετικών συνθέσεων μάσκας FFP2. Η αξιολόγηση βασίζεται κυρίως σε δύο περιβαλλοντικούς δείκτες: τη συνολική κατανάλωση ενέργειας, εκφρασμένη σε MJ, και τις συνολικές εκπομπές διοξειδίου του άνθρακα, εκφρασμένες σε kg CO₂.

Η πειραματική προσέγγιση διαμορφώθηκε έτσι ώστε να εξεταστούν διαδοχικά τρεις βασικές παράμετροι του σχεδιασμού του προϊόντος: η επιλογή και η αναλογία των πρώτων υλών, η επίδραση της συσκευασίας και η στρατηγική διαχείρισης του προϊόντος στο τέλος του κύκλου ζωής του. Με αυτόν τον τρόπο, τα Tests 1–4 επικεντρώνονται κυρίως στη διαφοροποίηση της υλικής σύνθεσης, ενώ το Test 5 εξετάζει ειδικότερα την επίδραση εναλλακτικών End-of-Life σεναρίων σε προϊόν κατασκευασμένο από PET.

Για τη συγκριτική διερεύνηση της μάσκας FFP2 μοντελοποιήθηκαν υποθετικές εναλλακτικές συνθέσεις με φυσικές φυτικές ίνες, και συγκεκριμένα Banana, Flax, Kenaf και Jute, ενώ σε επόμενα Tests εξετάστηκε και Sugarcane. Οι συνθέσεις αυτές χρησιμοποιούνται αποκλειστικά ως σενάρια περιβαλλοντικής σύγκρισης στο Eco Audit. Η παρούσα εργασία δεν αξιολογεί αν οι συγκεκριμένες φυσικές ίνες, χωρίς πρόσθετη επεξεργασία ή εξειδικευμένη δομή φίλτρου, μπορούν να επιτύχουν τις απαιτήσεις διήθησης, αναπνευστικής αντίστασης και εφαρμογής του προτύπου EN 149. Επομένως, τα αποτελέσματα αφορούν την περιβαλλοντική επίδοση των μοντελοποιημένων υλικών και όχι πιστοποίηση τεχνικής καταλληλότητας ως FFP2.

Για τη διευκόλυνση της παρουσίασης και της συγκριτικής αξιολόγησης των διαφορετικών σεναρίων της μάσκας FFP2, υιοθετείται ενιαίο σύστημα συντομογραφιών. Τα επιμέρους υλικά

συμβολίζονται ως εξής: B = Banana fiber, F = Flax fiber, K = Kenaf fiber, SC = Sugarcane fiber, J = Jute fiber και PET = Polyethylene terephthalate. Η ένδειξη BagSC χρησιμοποιείται όταν υπάρχει συσκευασία από Sugarcane, ενώ B μετά το PET δηλώνει την παρουσία PET bag. Για τα σενάρια τέλους ζωής χρησιμοποιούνται οι συντομογραφίες R = Recycling, RU = Reuse, LF = Landfill και RM = Re-manufacture. Οι αποστάσεις μεταφοράς δηλώνονται αντίστοιχα ως T150, T330 και T2395.

Οι αποστάσεις μεταφοράς μπορούν αντίστοιχα να δηλώνονται ως T150, T330 και T2395, ανάλογα με την εξεταζόμενη απόσταση.

6.2.1 Test 1 - Επίδραση της σύνθεσης των φυσικών ινών

6.2.1.1 Σχεδιασμός του Test 1

Στόχος του πρώτου Test 1 ήταν η διερεύνηση της επίδρασης της σύνθεσης των κύριων στρώσεων της μάσκας στην κατανάλωση ενέργειας και στις εκπομπές CO₂. Για τον περιορισμό της επίδρασης της συνολικής μάζας, το βάρος της μάσκας διατηρήθηκε σταθερό σε όλες τις εξεταζόμενες περιπτώσεις και ίσο με 5,60 g.

Οι πέντε κύριες στρώσεις αντιστοιχούν συνολικά σε 4,90 g, δηλαδή περίπου 0,98 g ανά στρώση. Επιπλέον, σε όλες τις περιπτώσεις χρησιμοποιούνται:

- Jute laminate: 0,50 g
- Jute straps: 0,20 g

Κατά συνέπεια, το Jute παραμένει σταθερό σε ποσότητα 0,70 g, ενώ οι μεταβολές μεταξύ των σεναρίων αφορούν αποκλειστικά τις πέντε κύριες στρώσεις.

6.2.1.2 FFP2-BFK: Banana, Flax, Kenaf και Jute

Η πρώτη σύνθεση περιλαμβάνει δύο στρώσεις Banana, δύο στρώσεις Flax και μία στρώση Kenaf.

Πίνακας 9: FFP2-BFK: Banana, Flax, Kenaf και Jute - Υλικό, Ποσότητα

Υλικό	Ποσότητα
Banana	1,96 g
Flax	1,96 g
Kenaf	0,98 g
Jute laminate	0,50 g
Jute straps	0,20 g
Συνολική μάζα	5,60 g

Παρακάτω τα συνολικά περιβαλλοντικά αποτελέσματα:

Πίνακας 10: FFP2-BFK: Banana, Flax, Kenaf και Jute - Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	0,2652	0,00319
Manufacture	0	0
Transport	0,000596	0,0000429
Disposal	0,00280	0,000196
Total first life	0,268	0,00339
End-of-Life potential	-0,00056	-0,0000392

Η σύνθεση αυτή παρουσίασε τη μεγαλύτερη περιβαλλοντική επιβάρυνση μεταξύ των τριών περιπτώσεων του Test 1.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η επίδραση του Kenaf. Παρότι η μάζα του είναι μόλις 0,98 g, αντιπροσωπεύοντας περίπου το 17,5% της συνολικής μάζας, η συμμετοχή του στην περιβαλλοντική επιβάρυνση ήταν δυσανάλογα υψηλή.

Συγκεκριμένα, στο στάδιο παραγωγής των υλικών, το Kenaf αντιστοιχούσε περίπου στο:

- 64,3% της ενεργειακής επιβάρυνσης
- 41,9% των εκπομπών CO₂

Το αποτέλεσμα αυτό υποδεικνύει ότι η περιβαλλοντική συνεισφορά ενός υλικού δεν είναι απαραίτητα ανάλογη της μάζας του. Η ένταση ενέργειας και εκπομπών που σχετίζεται με την παραγωγή και επεξεργασία του μπορεί να μεταβάλει σημαντικά το συνολικό περιβαλλοντικό προφίλ του προϊόντος.

6.2.1.3 FFP2-BF: Banana, Flax και Jute

Στη δεύτερη σύνθεση το Kenaf αφαιρείται πλήρως και αντικαθίσταται από ίση ποσότητα Banana. Με τον τρόπο αυτό, η συνολική μάζα διατηρείται αμετάβλητη.

Πίνακας 11: FFP2-BF: Banana, Flax και Jute - Υλικό, Ποσότητα

Υλικό	Ποσότητα
Banana	2,94 g
Flax	1,96 g
Jute laminate	0,50 g
Jute straps	0,20 g
Συνολική μάζα	5,60 g

Παρακάτω τα συνολικά περιβαλλοντικά αποτελέσματα:

Πίνακας 12: FFP2-BF: Banana, Flax και Jute – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	≈0,0967	≈0,00201
Manufacture	0	0
Transport	0,000596	0,0000429
Disposal	0,00280	0,000196
Total first life	0,0995	0,00221
End-of-Life potential	-0,00056	-0,0000392

Η αντικατάσταση της στρώσης Kenaf από Banana προκάλεσε ιδιαίτερα σημαντική μείωση της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης.

Η κατανάλωση ενέργειας μειώθηκε από 0,268 MJ σε 0,0995 MJ, δηλαδή κατά περίπου 62,9%.

Αντίστοιχα, οι εκπομπές CO₂ μειώθηκαν από 3,39 g σε 2,21 g, δηλαδή κατά περίπου 34,8%.

Το γεγονός ότι η μεταβολή αυτή επιτυγχάνεται χωρίς οποιαδήποτε αλλαγή στη συνολική μάζα καταδεικνύει ότι, στο συγκεκριμένο μοντέλο, η σύσταση των υλικών αποτελεί σαφώς σημαντικότερο παράγοντα από το συνολικό βάρος του προϊόντος.

6.2.1.4 FFP2-B: Banana και Jute

Στην τρίτη σύνθεση αφαιρείται και το Flax, με αποτέλεσμα όλες οι κύριες στρώσεις να αποτελούνται από Banana.

Πίνακας 13: FFP2-B: Banana και Jute - Υλικό, Ποσότητα

Υλικό	Ποσότητα
Banana	4,90 g
Jute laminate	0,50 g
Jute straps	0,20 g
Συνολική μάζα	5,60 g

Παρακάτω τα συνολικά περιβαλλοντικά αποτελέσματα:

Πίνακας 14: FFP2-B: Banana και Jute – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	≈0,0779	≈0,00138
Manufacture	0	0
Transport	0,000596	0,0000429
Disposal	0,00280	0,000196

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Total first life	0,0813	0,00162
End-of-Life potential	-0,00056	-0,0000392

Σε σχέση με τη σύνθεση BF, η αφαίρεση του Flax μειώνει περαιτέρω την κατανάλωση ενέργειας κατά περίπου 18,3% και τις εκπομπές CO₂ κατά περίπου 26,7%.

Σε σύγκριση με την αρχική σύνθεση BFK, η συνολική ενεργειακή απαίτηση μειώνεται κατά περίπου 69,7%, ενώ οι εκπομπές CO₂ μειώνονται κατά περίπου 52,2%.

6.2.1.5 Σύγκριση των επιμέρους life-cycle stages - Test 1

Τα υπόλοιπα life-cycle stages εμφανίζουν σχεδόν σταθερές τιμές μεταξύ των τριών συνθέσεων, καθώς η συνολική μάζα της μάσκας παραμένει σταθερή στα 5,60 g.

Energy

- Transport: περίπου **0,000596 MJ**
- Disposal: περίπου **0,00280 MJ**
- End-of-Life credit: περίπου **-0,00056 MJ**

CO₂

- Transport: περίπου **0,0000429 kg**
- Disposal: περίπου **0,000196 kg**
- End-of-Life credit: περίπου **-0,0000392 kg**

Δεδομένου ότι τα στάδια μεταφοράς, απόρριψης και End-of-Life παραμένουν πρακτικά ίδια στις τρεις συνθέσεις, οι διαφορές στη συνολική περιβαλλοντική επίδοση οφείλονται κυρίως στη διαφορετική σύνθεση των υλικών των κύριων στρώσεων.

6.2.1.6 Συζήτηση των αποτελεσμάτων του Test 1

Πίνακας 15: Συζήτηση των αποτελεσμάτων του Test 1 - Σύνθεση, Banana, Flax

Σύνθεση	Banana	Flax	Kenaf	Jute	Energy	CO ₂
BFK	1,96 g	1,96 g	0,98 g	0,70 g	0,268 MJ	3,39 g
BF	2,94 g	1,96 g	—	0,70 g	0,0995 MJ	2,21 g
B	4,90 g	—	—	0,70 g	0,0813 MJ	1,62 g

Η κατάταξη των τριών συνθέσεων είναι κοινή και για τους δύο περιβαλλοντικούς δείκτες:

$$B < BF < BFK$$

Το material stage αντιπροσωπεύει περίπου 96–99% της συνολικής κατανάλωσης ενέργειας και περίπου 86–92% των συνολικών εκπομπών CO₂, γεγονός που επιβεβαιώνει την κυρίαρχη σημασία της παραγωγής των πρώτων υλών.

Το βασικό εύρημα του Test 1 είναι επομένως ότι η περιβαλλοντική βελτιστοποίηση της μάσκας εξαρτάται πρωτίστως από την επιλογή των υλικών των κύριων στρώσεων. Η αντικατάσταση του Kenaf και, σε δεύτερο επίπεδο, του Flax από Banana οδηγεί σε σημαντική μείωση και των δύο εξεταζόμενων περιβαλλοντικών δεικτών.

6.2.1.7 Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 1

Πέρα από τη σύγκριση των διαφορετικών υλικών και των εναλλακτικών σεναρίων End-of-Life, εξετάστηκε η ευαισθησία των περιβαλλοντικών αποτελεσμάτων ως προς την απόσταση μεταφοράς. Για τον σκοπό αυτό χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά σενάρια μεταφοράς: το βασικό σενάριο των 150 km, ένα ενδιάμεσο σενάριο 330 km και ένα σενάριο μεγάλης απόστασης 2.395 km. Η μεταφορά πραγματοποιείται με φορτηγό 55 τόνων, 8 αξόνων. Η διερεύνηση της μεταφοράς είναι ιδιαίτερα σημαντική, καθώς επιτρέπει να διαπιστωθεί κατά πόσο τα πλεονεκτήματα που προκύπτουν από την επιλογή ενός υλικού διατηρούνται όταν αυξάνεται σημαντικά η απόσταση μεταξύ τόπου παραγωγής και τόπου χρήσης.

Παρακάτω εμφανίζεται το πινακάκι με τα αποτελέσματα για το B-BF- BFK – 150 / 330 / 2.395 km

Πίνακας 16: Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 1

Σύνθεση	Παράμετρος	150 km	330 km	2.395 km
BFK	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,268	0,269	0,277
BFK	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,00339	0,00345	0,00404
BFK	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,134	0,134	0,139
BFK	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,00170	0,00172	0,00202
BFK	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000596	0,00131	0,00952
BFK	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000429	0,0000945	0,000686
BF	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,0995	≈0,100	≈0,108
BF	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,00221	≈0,00226	≈0,00285
BF	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,0498	≈0,0500	≈0,0540
BF	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,00111	≈0,00113	≈0,00143
BF	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000596	0,00131	0,00952
BF	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000429	0,0000945	0,000686
B	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,0813	≈0,0820	≈0,0902

Σύνθεση	Παράμετρος	150 km	330 km	2.395 km
B	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,00162	≈0,00167	≈0,00226
B	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,0407	≈0,0410	≈0,0451
B	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,000810	≈0,000835	≈0,00113
B	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000596	0,00131	0,00952
B	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000429	0,0000945	0,000686

Ο πίνακας δείχνει ότι η αύξηση της απόστασης από 150 km σε 330 km και στη συνέχεια σε 2.395 km αυξάνει σταδιακά το συνολικό ενεργειακό και ανθρακικό αποτύπωμα και των τριών συνθέσεων. Ωστόσο, η σειρά μεταξύ των υλικών παραμένει σταθερή σε όλες τις αποστάσεις:

$$B < BF < BFK$$

Η σύνθεση B παρουσιάζει τη χαμηλότερη συνολική Energy και τις χαμηλότερες εκπομπές CO₂ ακόμη και στα 2.395 km, ενώ η BFK τις υψηλότερες. Επειδή οι τρεις μάσκες έχουν την ίδια μάζα, η Energy και το CO₂ της μεταφοράς είναι ίδια για BFK, BF και B στην ίδια απόσταση. Επομένως, οι διαφορές μεταξύ των τριών συνθέσεων προέρχονται κυρίως από τα χρησιμοποιούμενα υλικά και όχι από τη μεταφορά.

Συνοπτική σύγκριση BFK – BF – B

Πίνακας 17: Τελική Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 1

Σύνθεση	150 km Energy	330 km Energy	2.395 km Energy	150 km CO ₂	330 km CO ₂	2.395 km CO ₂
BFK	0,268	0,269	0,277	0,00339	0,00345	0,00404
BF	0,0995	≈0,100	≈0,108	0,00221	≈0,00226	≈0,00285
B	0,0813	≈0,0820	≈0,0902	0,00162	≈0,00167	≈0,00226

Άρα, η σύνθεση των υλικών επηρεάζει περισσότερο το συνολικό αποτύπωμα από την απόσταση μεταφοράς. Η μεταφορά γίνεται πιο σημαντική όσο μειώνεται το αρχικό material footprint, γι' αυτό στο B η αύξηση στα 2.395 km είναι αναλογικά πιο αισθητή.

Η αύξηση της απόστασης προκαλεί σταδιακή αύξηση τόσο της Energy όσο και του CO₂. Η επίδραση είναι μικρή από τα 150 στα 330 km, αλλά γίνεται περισσότερο εμφανής στα 2.395 km. Παρ' όλα αυτά, ακόμη και στη μεγαλύτερη απόσταση, η μεταφορά παραμένει μικρότερος contributor από το material stage. Συνεπώς, το σενάριο των 150 km παρουσιάζει το χαμηλότερο περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

6.2.2 Test 2 - Επίδραση της Sugarcane συσκευασίας

6.2.2.1 Σχεδιασμός του Test 2

Το δεύτερο Test εξετάζει την επίδραση της προσθήκης συσκευασίας από Sugarcane στις τρεις συνθέσεις του Test 1.

Η μάζα της συσκευασίας είναι **0,10 g**, με αποτέλεσμα η συνολική μάζα του συστήματος να αυξάνεται από **5,60 g** σε **5,70 g**.

Η συσκευασία αντιστοιχεί σε περίπου **1,75% της συνολικής μάζας**, γεγονός που επιτρέπει την αξιολόγηση της επίδρασης ενός πρόσθετου υλικού πολύ μικρής μάζας σε σχέση με το κυρίως προϊόν.

6.2.2.2 FFP2-BFK-SC

Πίνακας 18: Σύνθεση και αποτελέσματα - Υλικό, Ποσότητα

Υλικό	Ποσότητα
Banana	1,96 g
Flax	1,96 g
Kenaf	0,98 g
Jute laminate	0,50 g
Jute straps	0,20 g
Sugarcane bag	0,10 g
Σύνολο	5,70 g

Παρακάτω τα συνολικά περιβαλλοντικά αποτελέσματα:

Πίνακας 19: FFP2-BFK-SC – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	≈0,2655	≈0,00322
Manufacture	0	0
Transport	0,000607	0,0000437
Disposal	0,00285	0,000200
Total first life	0,269	0,00346
End-of-Life potential	-0,00057	-0,0000399

Σε σχέση με την αντίστοιχη σύνθεση χωρίς packaging, η Energy αυξάνεται περίπου κατά 0,4% και το CO₂ κατά περίπου 2,1%.

6.2.2.3 FFP2-BF-SC

Πίνακας 20: Σύνθεση και αποτελέσματα - Υλικό, Ποσότητα

Υλικό	Ποσότητα
Banana	2,94 g
Flax	1,96 g
Jute laminate	0,50 g

Υλικό	Ποσότητα
Jute straps	0,20 g
Sugarcane bag	0,10 g
Σύνολο	5,70 g

Παρακάτω τα συνολικά περιβαλλοντικά αποτελέσματα:

Πίνακας 21: FFP2-BF-SC – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	≈0,0965	≈0,00204
Manufacture	0	0
Transport	0,000607	0,0000437
Disposal	0,00285	0,000200
Total first life	0,100	0,00228
End-of-Life potential	-0,00057	-0,0000399

Σε σχέση με την αντίστοιχη σύνθεση χωρίς συσκευασία, η αύξηση είναι περίπου 0,5% στην Energy και 3,2% στο CO₂.

6.2.2.4 FFP2-B-SC

Πίνακας 22: Σύνθεση και αποτελέσματα - Υλικό, Ποσότητα

Υλικό	Ποσότητα
Banana	4,90 g
Jute laminate	0,50 g
Jute straps	0,20 g
Sugarcane bag	0,10 g
Σύνολο	5,70 g

Παρακάτω τα συνολικά περιβαλλοντικά αποτελέσματα:

Πίνακας 23: FFP2-B-SC – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	≈0,0785	≈0,00145
Manufacture	0	0
Transport	0,000607	0,0000437
Disposal	0,00285	0,000200
Total first life	0,0820	0,00169
End-of-Life potential	-0,00057	-0,0000399

Η αύξηση σε σχέση με το αντίστοιχο προϊόν χωρίς σακούλα είναι περίπου 0,9% στην Energy και 4,3% στο CO₂.

6.2.2.5 Σύγκριση των επιμέρους life-cycle stages - Test 2

Λόγω της προσθήκης της συσκευασίας Sugarcane, η συνολική μάζα αυξάνεται στα 5,70 g. Ωστόσο, τα υπόλοιπα life-cycle stages παραμένουν σχεδόν σταθερά μεταξύ των τριών συνθέσεων.

Energy

- Transport: περίπου **0,000607 MJ**
- Disposal: περίπου **0,00285 MJ**
- End-of-Life credit: περίπου **-0,00057 MJ**

CO₂

- Transport: περίπου **0,0000437 kg**
- Disposal: περίπου **0,000200 kg**
- End-of-Life credit: περίπου **-0,0000399 kg**

Επομένως, οι σημαντικές διαφορές μεταξύ B-SC, BF-SC και BFK-SC προκύπτουν κυρίως από το material stage και όχι από τη μεταφορά, την απόρριψη ή το End-of-Life.

6.2.2.6 Συζήτηση των αποτελεσμάτων του Test 2

Πίνακας 24: Συζήτηση των αποτελεσμάτων του Test 2 - Σύνθεση, Μάσκα, Sugarcane bag

Σύνθεση	Μάσκα	Sugarcane bag	Συνολική μάζα	Energy	CO ₂
BFK-SC	5,60 g	0,10 g	5,70 g	0,269 MJ	3,46 g
BF-SC	5,60 g	0,10 g	5,70 g	0,100 MJ	2,28 g
B-SC	5,60 g	0,10 g	5,70 g	0,0820 MJ	1,69 g

Η κατάταξη παραμένει:

B-SC < BF-SC < BFK-SC

Η διατήρηση της ίδιας σειράς επιβεβαιώνει ότι η συσκευασία δεν αποτελεί τον καθοριστικό παράγοντα της συνολικής περιβαλλοντικής επίδοσης.

Η σύγκριση με το Test 1 είναι ιδιαίτερα διαφωτιστική. Η προσθήκη 0,10 g Sugarcane επιφέρει μεταβολές της τάξης του 1–4%, ενώ η αντικατάσταση μίας μόνο κύριας στρώσης των 0,98 g μπορεί να οδηγήσει σε μείωση της ενεργειακής επιβάρυνσης άνω του 60%.

Επομένως, η βελτιστοποίηση του packaging μπορεί να λειτουργήσει συμπληρωματικά, αλλά δεν υποκαθιστά τη σημασία της κατάλληλης επιλογής των υλικών του κυρίως προϊόντος.

6.2.2.7 Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 2

Με αντίστοιχες παραμέτρους και για το Test 2 παρακάτω εμφανίζονται συνολικά τα αποτελέσματα BFK-SC / BF-SC / B-SC – 150 / 330 / 2.395 km:

Πίνακας 25: Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 2

Σύνθεση	Παράμετρος	150 km	330 km	2.395 km
BFK-SC	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,269	0,270	0,278
BFK-SC	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,00346	0,00352	0,00412
BFK-SC	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,1345	0,135	0,139
BFK-SC	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,00173	0,00176	0,00206
BFK-SC	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000607	0,00134	0,00969
BFK-SC	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000437	0,0000962	0,000698
BF-SC	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,100	0,101	0,109
BF-SC	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,00228	0,00233	0,00293
BF-SC	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,0500	0,0505	0,0545
BF-SC	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,00114	0,001165	0,001465
BF-SC	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000607	0,00134	0,00969
BF-SC	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000437	0,0000962	0,000698
B-SC	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,0820	0,0827	0,0911
B-SC	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,00169	0,00174	0,00235
B-SC	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,0410	0,04135	0,04555
B-SC	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,000845	0,000870	0,001175
B-SC	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000607	0,00134	0,00969
B-SC	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000437	0,0000962	0,000698

Πιο συνοπτικά σχετικά με τα αποτελέσματα

Πίνακας 26: Τελική Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 2

Σύνθεση	Energy 150 km (MJ)	Energy 330 km (MJ)	Energy 2.395 km (MJ)	CO ₂ 150 km (kg)	CO ₂ 330 km (kg)	CO ₂ 2.395 km (kg)
BFK-SC	0,269	0,270	0,278	0,00346	0,00352	0,00412
BF-SC	0,100	0,101	0,109	0,00228	0,00233	0,00293
B-SC	0,0820	0,0827	0,0911	0,00169	0,00174	0,00235

Η αύξηση της απόστασης προκαλεί σταδιακή αύξηση της Energy και του CO₂ σε όλες τις συνθέσεις, χωρίς όμως να αλλάζει την κατάταξη. Σε όλες τις αποστάσεις ισχύει:

$$\mathbf{B-SC < BF-SC < BFK-SC}$$

Άρα η σύνθεση Banana + Jute + Sugarcane bag παραμένει η χαμηλότερη από τις τρεις ακόμη και στα 2.395 km. Η επίδραση της σύνθεσης είναι σαφώς μεγαλύτερη από την επίδραση της αύξησης της απόστασης.

6.2.3 Test 3 - Ενσωμάτωση Sugarcane στις κύριες στρώσεις

6.2.3.1 Σχεδιασμός του Test 3

Το Test 3 επεκτείνει την ανάλυση του Sugarcane εξετάζοντας τη χρήση του όχι μόνο ως υλικό συσκευασίας, αλλά και ως βασικό συστατικό των κύριων στρώσεων.

Η συνολική μάζα διατηρείται σε 5,70 g, ώστε να είναι δυνατή η σύγκριση μεταξύ διαφορετικών υλικών συνθέσεων.

6.2.3.2 BFSC-BagSC

Η πρώτη σύνθεση περιλαμβάνει:

- δύο Banana layers
- ένα Flax layer
- δύο Sugarcane layers

Πίνακας 27: BFSC-BagSC - Υλικό, Ποσότητα

Υλικό	Ποσότητα
Banana	1,96 g
Flax	0,98 g
Sugarcane layers	1,96 g
Jute laminate	0,50 g
Jute straps	0,20 g
Sugarcane bag	0,10 g
Σύνολο	5,70 g

Παρακάτω τα συνολικά περιβαλλοντικά αποτελέσματα

Πίνακας 28: BFSC-BagSC – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	≈0,0965	≈0,00274
Manufacture	0	0
Transport	0,000607	0,0000437
Disposal	0,00285	0,000200
Total first life	0,100	0,00298
End-of-Life potential	-0,00057	-0,0000399

Η σύνθεση παρουσιάζει το χαμηλότερο CO₂ μεταξύ των τριών σεναρίων του Test 3.

6.2.3.3 BSC-BagSC

Στο δεύτερο σενάριο το Flax αντικαθίσταται από Sugarcane.

Πίνακας 29: BSC-BagSC - Υλικό, Ποσότητα

Υλικό	Ποσότητα
Banana	1,96 g
Sugarcane layers	2,94 g
Jute laminate	0,50 g
Jute straps	0,20 g
Sugarcane bag	0,10 g
Σύνολο	5,70 g

Παρακάτω τα συνολικά περιβαλλοντικά αποτελέσματα

Πίνακας 30: BSC-BagSC – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	≈0,0924	≈0,00295
Manufacture	0	0
Transport	0,000607	0,0000437
Disposal	0,00285	0,000200
Total first life	0,0959	0,00319
End-of-Life potential	-0,00057	-0,0000399

Η Energy είναι περίπου 4,1% χαμηλότερη από την BFSC, ενώ το CO₂ είναι περίπου 7% υψηλότερο.

Αυτό αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα διαφοροποίησης μεταξύ των περιβαλλοντικών δεικτών: η αλλαγή της σύνθεσης μπορεί να βελτιώνει έναν δείκτη και ταυτόχρονα να επιβαρύνει έναν άλλο.

6.2.3.4 SC-BagSC

Στην τρίτη περίπτωση όλες οι κύριες στρώσεις αποτελούνται από Sugarcane.

Πίνακας 31: SC-BagSC - Υλικό, Ποσότητα

Υλικό	Ποσότητα
Sugarcane layers	4,90 g
Jute laminate	0,50 g
Jute straps	0,20 g
Sugarcane bag	0,10 g

Υλικό	Ποσότητα
Σύνολο	5,70 g

Παρακάτω τα συνολικά περιβαλλοντικά αποτελέσματα

Πίνακας 32: SC-BagSC – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	≈0,1015	≈0,00394
Manufacture	0	0
Transport	0,000607	0,0000437
Disposal	0,00285	0,000200
Total first life	0,105	0,00418
End-of-Life potential	-0,00057	-0,0000399

Η σύνθεση SC παρουσιάζει τις υψηλότερες τιμές και στους δύο δείκτες.

Σε σχέση με το BSC, η Energy είναι περίπου 9,5% υψηλότερη, ενώ οι εκπομπές CO₂ είναι περίπου 31% υψηλότερες.

6.2.3.5 Σύγκριση των επιμέρους life-cycle stages - Test 3

Και στο Test 3 η συνολική μάζα διατηρείται στα 5,70 g, με αποτέλεσμα τα στάδια Transport, Disposal και End-of-Life να έχουν ουσιαστικά κοινή συνεισφορά στα εξεταζόμενα σενάρια.

Energy

- Transport: περίπου **0,000607 MJ**
- Disposal: περίπου **0,00285 MJ**
- End-of-Life credit: περίπου **-0,00057 MJ**

CO₂

- Transport: περίπου **0,0000437 kg**
- Disposal: περίπου **0,000200 kg**
- End-of-Life credit: περίπου **-0,0000399 kg**

Κατά συνέπεια, οι διαφορές μεταξύ BFSC, BSC και SC μπορούν να αποδοθούν κυρίως στην αλλαγή της σύνθεσης των κύριων στρώσεων και ειδικότερα στην ποσότητα Banana, Flax και Sugarcane που χρησιμοποιείται. Η κοινή μεταφορική επιβάρυνση στο βασικό σενάριο των 150 km είναι 0,000607 MJ και 0,0000437 kg CO₂.

6.2.3.6 Συζήτηση των αποτελεσμάτων του Test 3

Πίνακας 33: Συζήτηση των αποτελεσμάτων του Test 3 - Σύνθεση, Κύρια υλικά, Energy

Σύνθεση	Κύρια υλικά	Energy	CO ₂
BFSC	1,96 g B + 0,98 g F + 1,96 g SC	0,100 MJ	2,98 g
BSC	1,96 g B + 2,94 g SC	0,0959 MJ	3,19 g
SC	4,90 g SC	0,105 MJ	4,18 g

Ως προς την Energy:

BSC < BFSC < SC

Ως προς το CO₂:

BFSC < BSC < SC

Το εύρημα αυτό είναι κρίσιμο για την περιβαλλοντική αξιολόγηση του προϊόντος. Η αύξηση της ποσότητας ενός βιοβασισμένου υλικού δεν οδηγεί αυτομάτως σε χαμηλότερη συνολική περιβαλλοντική επίπτωση.

Η περιβαλλοντική επίδοση εξαρτάται από το σύνολο των παραγωγικών διεργασιών που σχετίζονται με το υλικό, το ενεργειακό μίγμα, την επεξεργασία και τα δεδομένα του Life Cycle Inventory.

Κατά συνέπεια, ο χαρακτηρισμός ενός υλικού ως ανανεώσιμου ή βιοβασισμένου δεν αποτελεί επαρκές κριτήριο για την επιλογή του χωρίς προηγούμενη ποσοτική αξιολόγηση κύκλου ζωής.

6.2.3.7 Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 3

Στα ίδια με τα παραπάνω πλαίσια των Test 1 & 2 BFSC / BSC / SC – 150 / 330 / 2.395 km:

Πίνακας 34: Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 3

Σύνθεση	Παράμετρος	150 km	330 km	2.395 km
BFSC	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,100	0,101	0,109
BFSC	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,00298	0,00303	0,00364
BFSC	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,0500	0,0505	0,0545
BFSC	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,00149	0,001515	0,00182
BFSC	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000607	0,00134	0,00969
BFSC	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000437	0,0000962	0,000698
BSC	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,0959	0,0967	0,105
BSC	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,00319	0,00324	0,00384
BSC	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,04795	0,04835	0,0525

Σύνθεση	Παράμετρος	150 km	330 km	2.395 km
BSC	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,001595	0,00162	0,00192
BSC	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000607	0,00134	0,00969
BSC	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000437	0,0000962	0,000698
SC	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,105	0,106	0,114
SC	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,00418	0,00424	0,00484
SC	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,0525	0,0530	0,0570
SC	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,00209	0,00212	0,00242
SC	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000607	0,00134	0,00969
SC	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000437	0,0000962	0,000698

Πίνακας 35: Τελική Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 3

Σύνθεση	Energy 150 km (MJ)	Energy 330 km (MJ)	Energy 2.395 km (MJ)	CO ₂ 150 km (kg)	CO ₂ 330 km (kg)	CO ₂ 2.395 km (kg)
BFSC	0,100	0,101	0,109	0,00298	0,00303	0,00364
BSC	0,0959	0,0967	0,105	0,00319	0,00324	0,00384
SC	0,105	0,106	0,114	0,00418	0,00424	0,00484

Εδώ διατηρείται η διαφορετική κατάταξη μεταξύ των δύο περιβαλλοντικών δεικτών ανεξάρτητα από τα χιλιόμετρα.

Για την Energy:

BSC < BFSC < SC

Για το CO₂:

BFSC < BSC < SC

Επομένως, η αύξηση της απόστασης δεν αλλάζει το βασικό συμπέρασμα του Test 3. Το BSC έχει τη χαμηλότερη Energy, ενώ το BFSC έχει το χαμηλότερο CO₂. Το SC παραμένει υψηλότερο και στους δύο δείκτες.

6.2.4 Test 4 - Απομόνωση της επίδρασης του υλικού

6.2.4.1 Σχεδιασμός του Test 4

Το Test 4 σχεδιάστηκε ώστε να απομονωθεί η επίδραση του ίδιου του υλικού από τις υπόλοιπες μεταβλητές.

Και στα τρία σενάρια το προϊόν αποτελείται από:

- 5 layers: **4,90 g**
- 1 laminate: **0,50 g**
- 2 straps: **0,20 g**
- 1 bag: **0,10 g**

Η συνολική μάζα είναι **5,70 g** και ο συνολικός αριθμός των επιμέρους στοιχείων είναι εννέα.

Η μοναδική μεταβλητή είναι το υλικό από το οποίο κατασκευάζονται όλα τα στοιχεία του προϊόντος.

6.2.4.2 Banana

Πίνακας 36: Banana - Στοιχείο, Ποσότητα

Στοιχείο	Ποσότητα
Layers	4,90 g
Laminate	0,50 g
Straps	0,20 g
Bag	0,10 g
Σύνολο Banana	5,70 g

Παρακάτω τα συνολικά περιβαλλοντικά αποτελέσματα

Πίνακας 37: Banana – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	0,0099	0,00080
Manufacture	0	0
Transport	0,000607	0,0000437
Disposal	0,00285	0,000200
Total first life	0,0133	0,00104
End-of-Life potential	-0,00057	-0,0000399

Τα αποτελέσματα από την μάσκα που περιέχει μόνο υλικό την Banana παρουσιάζει τα καλύτερα αποτελέσματα και ως προς την Energy και το CO₂.

6.2.4.3 Flax

Πίνακας 38: Flax - Στοιχείο, Ποσότητα

Στοιχείο	Ποσότητα
Layers	4,90 g
Laminate	0,50 g
Straps	0,20 g
Bag	0,10 g
Σύνολο Flax	5,70 g

Παρακάτω τα συνολικά περιβαλλοντικά αποτελέσματα

Πίνακας 39: Flax – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	0,0630	0,00250
Manufacture	0	0
Transport	0,000607	0,0000437
Disposal	0,00285	0,000200
Total first life	0,0664	0,00274
End-of-Life potential	-0,00057	-0,0000399

Η συνολική ενεργειακή απαίτηση είναι περίπου πέντε φορές μεγαλύτερη από εκείνη του Banana, ενώ οι εκπομπές CO₂ είναι περίπου 2,6 φορές υψηλότερες.

6.2.4.4 Sugarcane

Πίνακας 40: Sugarcane - Στοιχείο, Ποσότητα

Στοιχείο	Ποσότητα
Layers	4,90 g
Laminate	0,50 g
Straps	0,20 g
Bag	0,10 g
Σύνολο Sugarcane	5,70 g

Παρακάτω τα συνολικά περιβαλλοντικά αποτελέσματα

Πίνακας 41: Sugarcane – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	0,0370	0,00370
Manufacture	0	0
Transport	0,000607	0,0000437
Disposal	0,00285	0,000200
Total first life	0,0404	0,00394
End-of-Life potential	-0,00057	-0,0000399

Σε σύγκριση με το Banana, η συνολική Energy είναι περίπου τριπλάσια, ενώ οι εκπομπές CO₂ είναι περίπου 3,8 φορές υψηλότερες.

6.2.4.5 Σύγκριση των επιμέρους life-cycle stages - Test 4

Τα υπόλοιπα life-cycle stages εμφανίζουν σχεδόν σταθερές τιμές μεταξύ των τριών σεναρίων:

Energy

- Transport: περίπου **0,000607 MJ**
- Disposal: περίπου **0,00285 MJ**
- End-of-Life credit: περίπου **-0,00057 MJ**

CO₂

- Transport: περίπου **0,0000437 kg**
- Disposal: περίπου **0,000200 kg**
- End-of-Life credit: περίπου **-0,0000399 kg**

Δεδομένου ότι τα συγκεκριμένα στάδια παραμένουν πρακτικά σταθερά, οι διαφορές των συνολικών αποτελεσμάτων μπορούν να αποδοθούν κυρίως στη φάση παραγωγής του υλικού.

6.2.4.6 Συζήτηση των αποτελεσμάτων του Test 4

Πίνακας 42: Συζήτηση των αποτελεσμάτων του Test 4 - Υλικό, Μάζα, Energy

Υλικό	Μάζα	Energy	CO ₂
Banana	5,70 g	0,0133 MJ	1,04 g
Flax	5,70 g	0,0664 MJ	2,74 g
Sugarcane	5,70 g	0,0404 MJ	3,94 g

Η κατάταξη ως προς την Energy είναι:

Banana < Sugarcane < Flax

Ενώ ως προς το CO₂:

Banana < Flax < Sugarcane

Το Banana εμφανίζει το χαμηλότερο αποτέλεσμα και στους δύο δείκτες.

Αντίθετα, η σύγκριση Flax και Sugarcane καταδεικνύει εκ νέου ότι δεν υφίσταται πάντοτε κοινή κατάταξη μεταξύ διαφορετικών δεικτών. Το Sugarcane παρουσιάζει χαμηλότερη ενεργειακή απαίτηση από το Flax, αλλά υψηλότερες εκπομπές CO₂.

Το συγκεκριμένο αποτέλεσμα ενισχύει την ανάγκη πολυκριτηριακής περιβαλλοντικής αξιολόγησης, καθώς η χρήση ενός μόνο δείκτη μπορεί να οδηγήσει σε ελλιπή ή παραπλανητική ερμηνεία της περιβαλλοντικής επίδοσης.

6.2.4.7 Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 4

Πίνακας 43: Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 4

Υλικό	Energy 150 km (MJ)	Energy 330 km (MJ)	Energy 2.395 km (MJ)	CO ₂ 150 km (kg)	CO ₂ 330 km (kg)	CO ₂ 2.395 km (kg)
Banana All	0,0133	0,0141	0,0224	0,00104	0,00109	0,00169
Flax All	0,0664	0,0671	0,0754	0,00275	0,00280	0,00340
Sugarcane All	0,0404	0,0411	0,0495	0,00394	0,00399	0,00459

Το Test 4 παρουσιάζει τη μεγαλύτερη σχετική επίδραση της απόστασης στο Banana, επειδή το αρχικό material footprint του είναι πολύ χαμηλό. Παρόλα αυτά, ακόμη και στα **2.395 km**, το Banana έχει χαμηλότερη Energy και CO₂ από τα άλλα δύο υλικά.

Η κατάταξη της Energy παραμένει:

Banana < Sugarcane < Flax

ενώ για το CO₂:

Banana < Flax < Sugarcane

Άρα, ακόμη και η μεγάλη μεταφορική απόσταση δεν αντιστρέφει την κατάταξη που προκύπτει από την επιλογή του υλικού.

6.2.5 Test 5 - Επίδραση διαφορετικών End-of-Life σεναρίων για PET

6.2.5.1 Σχεδιασμός του Test 5

Σε αντίθεση με τα προηγούμενα Tests, το Test 5 επικεντρώνεται σε προϊόν κατασκευασμένο από virgin PET και εξετάζει την επίδραση διαφορετικών τρόπων διαχείρισης μετά το τέλος της πρώτης χρήσης.

Εξετάστηκαν τα ακόλουθα σενάρια:

- Recycling
- Reuse

- Landfill
- Re-manufacture

Η συγκεκριμένη προσέγγιση επιτρέπει τον διαχωρισμό της επίδρασης της αρχικής παραγωγής από την περιβαλλοντική επίδραση της διαχείρισης στο τέλος του κύκλου ζωής.

6.2.5.2 PET-R - Recycling χωρίς bag

Πίνακας 44: PET-R - Recycling χωρίς bag - Στοιχείο, Ποσότητα PET

Στοιχείο	Ποσότητα PET
Layers	4,90 g
Laminate	0,50 g
Straps	0,20 g
Σύνολο	5,60 g

First-life αποτελέσματα:

- **Energy: 0,521 MJ**
- **CO₂: 23,6 g**

End-of-Life credits:

- **Energy: -0,250 MJ**
- **CO₂: -9,39 g**

Καθαρό αποτέλεσμα:

- **Net Energy: 0,271 MJ**
- **Net CO₂: 14,21 g**

Τα συνολικά αποτελέσματα είναι:

Πίνακας 45: PET-R - Recycling χωρίς bag – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	≈0,5176	≈0,02336
Manufacture	0	0
Transport	0,000596	0,0000429
Disposal	≈0,00280	≈0,000196
Total first life	0,521	0,0236
End-of-Life potential	-0,250	-0,00939

Η ανακύκλωση επιφέρει σημαντική μείωση του καθαρού αποτυπώματος, καθώς μέρος της περιβαλλοντικής επιβάρυνσης αντισταθμίζεται μέσω ανάκτησης υλικού.

6.2.5.3 PET-B-R - Recycling με bag

Πίνακας 46: PET-B-R - Recycling με bag - Στοιχείο, Ποσότητα PET

Στοιχείο	Ποσότητα PET
Layers	4,90 g
Laminate	0,50 g
Straps	0,20 g
Bag	0,10 g
Σύνολο	5,70 g

First-life:

- **Energy: 0,531 MJ**
- **CO₂: 24,0 g**

End-of-Life:

- **Energy credit: -0,254 MJ**
- **CO₂ credit: -9,56 g**

Net:

- **Energy: 0,277 MJ**
- **CO₂: 14,44 g**

Τα συνολικά αποτελέσματα είναι:

Πίνακας 47: PET-B-R - Recycling με bag – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	≈0,5275	≈0,02376
Manufacture	0	0
Transport	0,000607	0,0000437
Disposal	0,00285	0,000200
Total first life	0,531	0,0240
End-of-Life potential	-0,254	-0,00956

Η προσθήκη 0,10 g PET packaging προκαλεί περιορισμένη αύξηση του συνολικού αποτελέσματος, επιβεβαιώνοντας ότι η συσκευασία έχει μικρότερη επίδραση από τη βασική σύνθεση του προϊόντος.

6.2.5.4 PET-B-RU - Reuse

Η συνολική υλική σύνθεση παραμένει 5,70 g PET.

First-life:

- **Energy: 0,528 MJ**
- **CO₂: 23,8 g**

Reuse credits:

- **Energy: -0,414 MJ**
- **CO₂: -15,3 g**

Καθαρό αποτέλεσμα:

- **Net Energy: 0,114 MJ**
- **Net CO₂: 8,50 g**

Τα συνολικά αποτελέσματα είναι:

Πίνακας 48: PET-B-RU - Reuse – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	≈0,5245	≈0,02356
Manufacture	0	0
Transport	0,000607	0,0000437
Disposal	0,00285	0,000200
Total first life	0,528	0,0238
End-of-Life potential	-0,414	-0,0153

Σε σχέση με το Landfill, η καθαρή Energy μειώνεται περίπου κατά 78%, ενώ το καθαρό CO₂ μειώνεται περίπου κατά 64%.

Η μεγάλη αυτή διαφορά οφείλεται αποκλειστικά στην απόδοση περιβαλλοντικής πίστωσης μέσω επαναχρησιμοποίησης.

6.2.5.5 PET-B-LF - Landfill

Η σύνθεση παραμένει ίδια, στα 5,70 g PET.

First-life:

- **Energy: 0,528 MJ**
- **CO₂: 23,8 g**

End-of-Life credit:

- **Energy: 0**
- **CO₂: 0**

Καθαρό αποτέλεσμα:

- **Net Energy: 0,528 MJ**
- **Net CO₂: 23,8 g**

Τα συνολικά αποτελέσματα είναι:

Πίνακας 49: PET-B-LF - Landfill – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	≈0,5245	≈0,02356
Manufacture	0	0
Transport	0,000607	0,0000437
Disposal	0,00285	0,000200
Total first life	0,528	0,0238
End-of-Life potential	0	0

Η απουσία ανάκτησης υλικού ή επαναχρησιμοποίησης έχει ως αποτέλεσμα τη διατήρηση ολόκληρης της αρχικής περιβαλλοντικής επιβάρυνσης στο τελικό ισοζύγιο.

6.2.5.6 PET-B-RM - Re-manufacture

First-life:

- **Energy: 0,528 MJ**
- **CO₂: 23,8 g**

End-of-Life credits:

- **Energy: −0,397 MJ**
- **CO₂: −14,1 g**

Καθαρό αποτέλεσμα:

- **Net Energy: 0,131 MJ**
- **Net CO₂: 9,70 g**

Τα συνολικά αποτελέσματα είναι:

Πίνακας 50: PET-B-RM - Re-manufacture – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	≈0,5245	≈0,02356
Manufacture	0	0
Transport	0,000607	0,0000437
Disposal	0,00285	0,000200
Total first life	0,528	0,0238
End-of-Life potential	-0,397	-0,0141

Σε σχέση με το Landfill, το Re-manufacture μειώνει την καθαρή Energy περίπου κατά 75% και το CO₂ περίπου κατά 59%.

6.2.5.7 Σύγκριση των επιμέρους life-cycle stages - Test 5

Στο Test 5 η περίπτωση είναι διαφορετική, επειδή η στρατηγική End-of-Life αποτελεί την κύρια μεταβλητή του πειράματος. Η μεταφορά και η απόρριψη παραμένουν πρακτικά σταθερές για προϊόντα ίδιας μάζας, ενώ τα End-of-Life credits αλλάζουν σημαντικά ανάλογα με το σενάριο.

Για τα σενάρια PET με bag συνολικής μάζας 5,70 g:

Energy

- Transport: περίπου **0,000607 MJ**
- Disposal: περίπου **0,00285 MJ**
- Recycling credit: **-0,254 MJ**
- Reuse credit: **-0,414 MJ**
- Landfill credit: **0 MJ**
- Re-manufacture credit: **-0,397 MJ**

CO₂

- Transport: περίπου **0,0000437 kg**
- Disposal: περίπου **0,000200 kg**

- Recycling credit: **−0,00956 kg**
- Reuse credit: **−0,0153 kg**
- Landfill credit: **0 kg**
- Re-manufacture credit: **−0,0141 kg**

Στην περίπτωση Recycling χωρίς bag, λόγω της ελαφρώς μικρότερης μάζας των 5,60 g, η μεταφορά είναι περίπου 0,000596 MJ και 0,0000429 kg CO₂, ενώ το Recycling credit είναι −0,250 MJ και −0,00939 kg CO₂.

Σε αντίθεση επομένως με τα Tests 1–4, στο Test 5 οι διαφορές στο τελικό αποτέλεσμα προκύπτουν κυρίως από τη στρατηγική End-of-Life, με το Reuse και το Re-manufacture να παρέχουν τις μεγαλύτερες περιβαλλοντικές πιστώσεις και το Landfill να μην παρέχει καμία.

6.2.5.8 Συζήτηση των αποτελεσμάτων του Test 5

Πίνακας 51: Συζήτηση των αποτελεσμάτων του Test 5 - Σενάριο, First-life Energy, First-life CO₂

Σενάριο	First-life Energy	First-life CO ₂	EoL Energy	EoL CO ₂	Net Energy	Net CO ₂
PET-R	0,521 MJ	23,6 g	−0,250 MJ	−9,39 g	0,271 MJ	14,21 g
PET-B-R	0,531 MJ	24,0 g	−0,254 MJ	−9,56 g	0,277 MJ	14,44 g
PET-B-RU	0,528 MJ	23,8 g	−0,414 MJ	−15,3 g	0,114 MJ	8,50 g
PET-B-LF	0,528 MJ	23,8 g	0	0	0,528 MJ	23,8 g
PET-B-RM	0,528 MJ	23,8 g	−0,397 MJ	−14,1 g	0,131 MJ	9,70 g

Η κατάταξη του καθαρού περιβαλλοντικού αποτελέσματος είναι:

Reuse → Re-manufacture → Recycling → Landfill

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει το γεγονός ότι τα first-life αποτελέσματα των σεναρίων με bag είναι σχεδόν ταυτόσημα, κυμαινόμενα περίπου μεταξύ 0,528–0,531 MJ και 23,8–24,0 g CO₂.

Οι μεγάλες αποκλίσεις εμφανίζονται μόνο μετά τον συνυπολογισμό του End-of-Life.

Κατά συνέπεια, το Test 5 καταδεικνύει ότι η στρατηγική τέλους ζωής μπορεί να αποτελέσει καθοριστική παράμετρο της συνολικής περιβαλλοντικής επίδοσης, ακόμη και όταν η αρχική σύνθεση του προϊόντος παραμένει αμετάβλητη.

6.2.5.9 Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 5

Πίνακας 52: Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 5 - Σενάριο, Παράμετρος, 150 km

Σενάριο	Παράμετρος	150 km	330 km	2.395 km
5.1 Recycling χωρίς bag	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,521	0,522	0,530
5.1 Recycling χωρίς bag	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,0236	0,0236	0,0242
5.1 Recycling χωρίς bag	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,2605	0,261	0,265
5.1 Recycling χωρίς bag	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,0118	0,0118	0,0121
5.1 Recycling χωρίς bag	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000596	0,00131	0,00952
5.1 Recycling χωρίς bag	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000429	0,0000945	0,000686
5.2 Recycling + bag	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,531	0,531	0,540
5.2 Recycling + bag	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,0240	0,0240	0,0246
5.2 Recycling + bag	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,2655	0,2655	0,270
5.2 Recycling + bag	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,0120	0,0120	0,0123
5.2 Recycling + bag	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000607	0,00134	0,00969
5.2 Recycling + bag	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000437	0,0000962	0,000698
5.3 Reuse	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,528	0,528	0,537
5.3 Reuse	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,0238	0,0238	0,0244
5.3 Reuse	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,264	0,264	0,2685
5.3 Reuse	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,0119	0,0119	0,0122
5.3 Reuse	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000607	0,00134	0,00969
5.3 Reuse	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000437	0,0000962	0,000698
5.4 Landfill	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,528	0,528	0,537
5.4 Landfill	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,0238	0,0238	0,0244
5.4 Landfill	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,264	0,2644	0,2685
5.4 Landfill	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,0119	0,01193	0,0122
5.4 Landfill	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000607	0,00134	0,00969
5.4 Landfill	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000437	0,0000962	0,000698
5.5 Re-manufacture	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,528	0,529	0,537
5.5 Re-manufacture	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,0238	0,0238	0,0244
5.5 Re-manufacture	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,264	0,264	0,2685
5.5 Re-manufacture	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,0119	0,0119	0,0122
5.5 Re-manufacture	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000607	0,00134	0,00969
5.5 Re-manufacture	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000437	0,0000962	0,000698

Πιο συγκεκριμένα η απόσταση μεταφοράς επηρεάζει σχετικά λίγο το first-life footprint του PET. Αντίθετα, το End-of-Life αλλάζει πολύ περισσότερο το τελικό αποτέλεσμα. Η συνολική σειρά παραμένει:

Reuse → Re-manufacture → Recycling → Landfill

και δεν ανατρέπεται όταν η απόσταση αυξάνεται στα 2.395 km.

First-life αποτελέσματα ανά απόσταση

Πίνακας 53: Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 5 - Σενάριο, Energy 150 km, Energy 330 km

Σενάριο	Energy 150 km	Energy 330 km	Energy 2.395 km	CO ₂ 150 km	CO ₂ 330 km	CO ₂ 2.395 km
5.1 Recycling χωρίς bag	0,521	0,522	0,530	0,0236	0,0236	0,0242
5.2 Recycling + bag	0,531	0,531	0,540	0,0240	0,0240	0,0246
5.3 Reuse	0,528	0,528	0,537	0,0238	0,0238	0,0244
5.4 Landfill	0,528	0,528	0,537	0,0238	0,0238	0,0244
5.5 Re-manufacture	0,528	0,529	0,537	0,0238	0,02385	0,0244

Για παράδειγμα, στο 5.1 η Energy μεταβάλλεται από 0,521 σε 0,522 και 0,530 MJ καθώς η απόσταση αυξάνεται, ενώ το CO₂ από 0,0236 σε 0,0242 kg. Αντίστοιχα, στο 5.3 το first-life αποτέλεσμα αυξάνεται από 0,528/0,0238 στα 150 km σε 0,537/0,0244 στα 2.395 km.

Όμως στο Test 5 είναι σημαντικότερο να εξεταστεί και το Net αποτέλεσμα μετά το End-of-Life credit.

Net αποτελέσματα μετά το End-of-Life

Πίνακας 54: Ανάλυση Επίδρασης Απόστασης Μεταφοράς Test 5 - Σενάριο, Net Energy 150 km, Net Energy 330 km

Σενάριο	Net Energy 150 km	Net Energy 330 km	Net Energy 2.395 km	Net CO ₂ 150 km	Net CO ₂ 330 km	Net CO ₂ 2.395 km
5.1 Recycling χωρίς bag	0,271	0,272	0,280	0,01421	0,01421	0,01481
5.2 Recycling + bag	0,277	0,277	0,286	0,01444	0,01444	0,01504
5.3 Reuse	0,114	0,114	0,123	0,00850	0,00850	0,00910
5.4 Landfill	0,528	0,528	0,537	0,02380	0,02380	0,02440
5.5 Re-manufacture	0,131	0,132	0,140	0,00970	0,00970	0,01030

Τα End-of-Life credits των βασικών scenarios είναι −0,250 MJ για Recycling χωρίς bag, −0,254 MJ για Recycling με bag, −0,414 MJ για Reuse, 0 για Landfill και −0,397 MJ για Re-manufacture.

Η απόσταση μεταφοράς επηρεάζει σχετικά λίγο το first-life footprint του PET. Αντίθετα, το End-of-Life αλλάζει πολύ περισσότερο το τελικό αποτέλεσμα. Η συνολική σειρά παραμένει:

Reuse → Re-manufacture → Recycling → Landfill

και δεν ανατρέπεται όταν η απόσταση αυξάνεται στα 2.395 km.

6.3 Surgical Face Mask

Αντίστοιχη επιλογή των υλικών έγινε με αυτές των масκών FFP2. Η χειρουργική μάσκα περιλαμβάνει τρεις κύριες στρώσεις, laminate και δύο straps, επομένως διαφέρει δομικά από την FFP2 που εξετάσαμε προηγουμένως.

Για τη διευκόλυνση της παρουσίασης και της συγκριτικής αξιολόγησης των διαφορετικών σεναρίων της χειρουργικής μάσκας, υιοθετείται ενιαίο σύστημα συντομογραφιών, αντίστοιχο με εκείνο που χρησιμοποιήθηκε στην ανάλυση των масκών FFP2.

Η συντομογραφία SFM αντιστοιχεί στον όρο *Surgical Face Mask*, ενώ τα επιμέρους υλικά συμβολίζονται ως εξής: B = Banana fiber, F = Flax fiber, K = Kenaf fiber, SC = Sugarcane fiber, J = Jute fiber και PET = Polyethylene terephthalate. Η ένδειξη BagSC χρησιμοποιείται όταν υπάρχει συσκευασία από Sugarcane, ενώ B μετά το PET δηλώνει την παρουσία PET bag. Για τα σενάρια τέλους ζωής χρησιμοποιούνται οι συντομογραφίες R = Recycling, RU = Reuse, LF = Landfill και RM = Re-manufacture.

Οι αποστάσεις μεταφοράς μπορούν αντίστοιχα να δηλώνονται ως T150, T330 και T2395, ανάλογα με την εξεταζόμενη απόσταση.

6.3.1 Test 1 - Επίδραση της σύνθεσης των φυσικών ινών

Στο Test 1 εξετάζεται η επίδραση διαφορετικών συνδυασμών φυσικών ινών στη χειρουργική μάσκα, χωρίς πρόσθετη συσκευασία. Οι τρεις βασικές συνθέσεις ορίζονται ως:

- **SFM-BFK:** Banana + Flax + Kenaf
- **SFM-BF:** Banana + Flax
- **SFM-B:** Banana

Στα σενάρια αυτά, το laminate και τα straps παραμένουν από Jute και, ως εκ τούτου, δεν συμπεριλαμβάνονται στον βασικό κωδικό της σύνθεσης.

6.3.1.1 SFM-BFK

Η σύνθεση SFM-BFK αποτελείται από μία κύρια στρώση Banana, μία Flax και μία Kenaf, ενώ το laminate και τα δύο straps είναι από Jute.

Πίνακας 55: SFM-BFK - Στοιχείο, Υλικό, Ποσότητα

Στοιχείο	Υλικό	Ποσότητα
Layer 1	Banana fiber	0,93 g
Layer 2	Flax fiber	0,93 g
Layer 3	Kenaf fiber	0,93 g
Laminate	Jute fiber	0,50 g
Straps ×2	Jute fiber	0,20 g
Σύνολο		≈3,50 g

Η συνολική Material Energy ανέρχεται σε περίπου 0,243 MJ, με το Kenaf να αντιπροσωπεύει περίπου το 66,5% της ενεργειακής επιβάρυνσης των υλικών, παρά τη σχετικά μικρή του μάζα. Το Jute laminate αντιστοιχεί περίπου στο 20,4%, τα straps στο 8,2%, το Flax στο 4,2% και το Banana μόλις στο 0,7%.

Τα συνολικά αποτελέσματα είναι:

Πίνακας 56: SFM-BFK - Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	0,243	0,00249
Manufacture	0	0
Transport	0,000372	0,0000268
Disposal	0,00175	0,000122
Total first life	0,245	0,00264
End-of-Life potential	-0,000349	-0,0000244

Το συνολικό first-life αποτέλεσμα της SFM-BFK είναι 0,245 MJ και 0,00264 kg CO₂. Το material stage ευθύνεται για περίπου 99,1% της Energy και 94,4% του CO₂, γεγονός που καταδεικνύει ότι η περιβαλλοντική επίδοση του συγκεκριμένου σεναρίου καθορίζεται κυρίως από την επιλογή των πρώτων υλών.

6.3.1.2 SFM-BF

Στην SFM-BF αφαιρείται το Kenaf και αντικαθίσταται από μία επιπλέον στρώση Banana. Η συνολική μάζα παραμένει περίπου 3,50 g.

Πίνακας 57: SFM-BF - Στοιχείο, Υλικό, Ποσότητα

Στοιχείο	Υλικό	Ποσότητα
Banana layers ×2	Banana fiber	≈1,86 g
Flax layer	Flax fiber	0,93 g
Laminate	Jute fiber	0,50 g
Straps ×2	Jute fiber	0,20 g
Σύνολο		≈3,50 g

Το Banana έχει πολύ χαμηλότερη ενεργειακή συνεισφορά, ενώ πλέον το Jute laminate αποτελεί τον μεγαλύτερο contributor του material stage, περίπου 59,8% της Material Energy.

Τα συνολικά αποτελέσματα είναι:

Πίνακας 58: SFM-BF – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	0,0829	0,00137
Manufacture	0	0
Transport	0,000372	0,0000268
Disposal	0,00175	0,000122
Total first life	0,0850	0,00152
End-of-Life potential	-0,000349	-0,0000244

Το material stage είναι 0,0829 MJ και 0,00137 kg CO₂ και εξακολουθεί να κυριαρχεί με 97,5% της Energy και 90,2% του CO₂.

Σε σχέση με το παραπάνω η αφαίρεση του Kenaf οδηγεί περίπου σε:

-65,3% Energy και -42,4% CO₂.

Η πολύ μεγάλη μείωση παρά το ίδιο συνολικό βάρος υποδεικνύει τη μεγάλη επίδραση της επιλογής του υλικού.

6.3.1.3 SFM-B

Η σύνθεση SFM-B περιλαμβάνει τρεις κύριες στρώσεις Banana, διατηρώντας το Jute για laminate και straps.

Πίνακας 59: SFM-B - Στοιχείο, Υλικό, Ποσότητα

Στοιχείο	Υλικό	Ποσότητα
Banana layers ×3	Banana fiber	≈2,80 g
Laminate	Jute fiber	0,50 g
Straps ×2	Jute fiber	0,20 g
Σύνολο		≈3,50 g

Τα συνολικά αποτελέσματα είναι:

Πίνακας 60: SFM-B – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	0,0742	0,00109
Manufacture	0	0
Transport	0,000372	0,0000268
Disposal	0,00175	0,000122
Total first life	0,0763	0,00124
End-of-Life potential	-0,000349	-0,0000244

Η μετάβαση από SFM-BF σε SFM-B μειώνει περαιτέρω την Energy κατά 10.2% και το CO₂ κατά 18,4%. Σε σχέση με την αρχική SFM-BFK, η συνολική μείωση προσεγγίζει το 69% για την Energy και το 53% για το CO₂.

6.3.1.4 Σύγκριση των επιμέρους life-cycle stages - Test 1

Τα υπόλοιπα life-cycle stages εμφανίζουν σχεδόν σταθερές τιμές μεταξύ των τριών συνθέσεων, καθώς η συνολική μάζα της μάσκας παραμένει σταθερή στα 5,60 g.

Energy

- Transport: περίπου **0,000596 MJ**
- Disposal: περίπου **0,00280 MJ**
- End-of-Life credit: περίπου **-0,00056 MJ**

CO₂

- Transport: περίπου **0,0000429 kg**
- Disposal: περίπου **0,000196 kg**
- End-of-Life credit: περίπου **-0,0000392 kg**

Δεδομένου ότι τα στάδια μεταφοράς, απόρριψης και End-of-Life παραμένουν πρακτικά ίδια στις τρεις συνθέσεις, οι διαφορές στη συνολική περιβαλλοντική επίδοση οφείλονται κυρίως στη διαφορετική σύνθεση των υλικών των κύριων στρώσεων.

6.3.1.5 Συζήτηση των αποτελεσμάτων του Test 1

Πίνακας 61: Συζήτηση των αποτελεσμάτων του Test 1 - Κωδικός, Energy (MJ), CO₂ (kg)

Κωδικός	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
SFM-BFK	0,245	0,00264
SFM-BF	0,0850	0,00152
SFM-B	0,0763	0,00124

Στο συγκεκριμένο Test η κατάταξη είναι:

SFM-B < SFM-BF < SFM-BFK

Το αποτέλεσμα δείχνει ότι η σύνθεση των πρώτων υλών ασκεί σημαντικά μεγαλύτερη επίδραση από τη συνολική μάζα της μάσκας, η οποία παραμένει ουσιαστικά σταθερή. Όπως είχαμε παρατηρήσει και παραπάνω τα αποτελέσματα φαίνονται να ταυτίζονται με αυτά του FFP2

6.3.1.6 Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 1

Αναλυτικά για το Test 1 στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των διαφορετικών επιλογών με την αλλαγή των χιλιομέτρων:

Πίνακας 62: Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 1 - Σύνθεση, Παράμετρος, 150 km

Σύνθεση	Παράμετρος	150 km	330 km	2.395 km
SFM-BFK	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,245	0,245	0,251
SFM-BFK	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,00264	0,00267	0,00304
SFM-BFK	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,1225	0,1225	0,1255
SFM-BFK	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,001320	0,001335	0,001520
SFM-BFK	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000372	0,000818	0,00593
SFM-BFK	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000268	0,0000589	0,000427
SFM-BF	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,0850	0,0854	0,106
SFM-BF	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,00152	0,00155	0,00273
SFM-BF	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,04250	0,04270	0,0530
SFM-BF	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,000760	0,000775	0,001365
SFM-BF	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000372	0,000818	≈0,00901
SFM-BF	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000268	0,0000589	≈0,000649
SFM-B	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,0763	0,0813	0,0819
SFM-B	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,00124	0,00162	0,00164
SFM-B	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,03815	0,04065	0,04095
SFM-B	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,000620	0,000810	0,000820

Σύνθεση	Παράμετρος	150 km	330 km	2.395 km
SFM-B	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000372	0,00124	0,00593
SFM-B	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000268	0,0000894	0,000427

Συγκεντρωτικά φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 63: Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 1 - Σύνθεση, 150 km, 330 km

Σύνθεση	150 km	330 km	2.395 km
SFM-BFK – Energy (MJ)	0,245	0,245	0,251
SFM-BFK – CO ₂ (kg)	0,00264	0,00267	0,00304
SFM-BF – Energy (MJ)	0,0850	0,0854	0,106
SFM-BF – CO ₂ (kg)	0,00152	0,00155	0,00273
SFM-B – Energy (MJ)	0,0763	0,0813	0,0819
SFM-B – CO ₂ (kg)	0,00124	0,00162	0,00164

Συνολικά, η επίδραση της απόστασης μεταφοράς δεν είναι ίδια για όλες τις συνθέσεις. Η SFM-BFK παρουσιάζει τη μεγαλύτερη σταθερότητα, ιδιαίτερα ως προς την Energy, ενώ η SFM-BF εμφανίζει τη μεγαλύτερη ευαισθησία στη μεταφορά στα 2.395 km, τόσο στην Energy όσο και κυρίως στις εκπομπές CO₂. Η SFM-B παρουσιάζει ενδιάμεση συμπεριφορά, με σημαντικό μέρος της αύξησης να εμφανίζεται ήδη στη μετάβαση από 150 σε 330 km.

Ένα σημαντικό εύρημα είναι ότι η αύξηση της απόστασης φαίνεται να επηρεάζει αναλογικά περισσότερο τις εκπομπές CO₂ σε σχέση με την ενεργειακή κατανάλωση. Ιδιαίτερα στην περίπτωση της SFM-BF, η μεταφορά στα 2.395 km μεταβάλλει αισθητά το συνολικό περιβαλλοντικό αποτέλεσμα, γεγονός που υπογραμμίζει τη σημασία της γεωγραφικής προέλευσης και της μεταφοράς των πρώτων υλών στην αξιολόγηση του συνολικού κύκλου ζωής της μάσκας.

6.3.2 Test 2 - Προσθήκη Sugarcane Bag

Στο Test 2 βασίζεται στις συνθέσεις του Test 1 και εξετάζεται η επίδραση της προσθήκης Sugarcane bag μάζας 0,10 g.

Στα δύο πρώτα δείγματα η συνολική μάζα αυξάνεται από περίπου 3,50 g σε 3,60 g.

Οι συνθέσεις συμβολίζονται ως:

- SFM-BFK-BagSC
- SFM-BF-BagSC
- SFM-B-BagSC

Η ένδειξη BagSC χρησιμοποιείται ώστε να διακρίνεται η Sugarcane συσκευασία από τις περιπτώσεις του Test 3, όπου το Sugarcane αποτελεί μέρος των κύριων layers.

6.3.2.1 SFM-BFK-BagSC

Η SFM-BFK-BagSC αποτελείται από Banana, Flax και Kenaf στις κύριες στρώσεις, Jute laminate/straps και Sugarcane bag.

Πίνακας 64: SFM-BFK-BagSC - Υλικό, Ποσότητα

Υλικό	Ποσότητα
Banana	0,93 g
Flax	0,93 g
Kenaf	0,93 g
Jute laminate	0,50 g
Jute straps	0,20 g
Sugarcane bag	0,10 g
Σύνολο	≈3,60 g

Το συνολικό αποτέλεσμα είναι:

Πίνακας 65: SFM-BFK-BagSC – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	0,244	0,00256
Manufacture	0	0
Transport	0,000382	0,0000275
Disposal	0,00180	0,000126
Total first life	0,246	0,00271
End-of-Life potential	-0,000359	-0,0000251

Η προσθήκη της BagSC προκαλεί μόνο μικρή αύξηση σε σχέση με το αντίστοιχο στο Test 1, καθώς η συσκευασία αντιπροσωπεύει μικρό ποσοστό της συνολικής μάζας.

6.3.2.2 SFM-BF-BagSC

Στην SFM-BF-BagSC χρησιμοποιούνται δύο Banana layers, μία Flax layer, Jute laminate/straps και Sugarcane bag.

Πίνακας 66: SFM-BF-BagSC - Υλικό/στοιχείο, Ποσότητα

Υλικό/στοιχείο	Ποσότητα
Banana ×2	≈1,86 g
Flax	0,93 g
Jute laminate	0,50 g

Υλικό/στοιχείο	Ποσότητα
Jute straps	0,20 g
Sugarcane bag	0,10 g
Σύνολο	≈3,60 g

Το συνολικό αποτέλεσμα είναι:

Πίνακας 67: SFM-BF-BagSC – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	0,0835	0,00143
Manufacture	0	0
Transport	0,000382	0,0000275
Disposal	0,00180	0,000126
Total first life	0,0857	0,00159
End-of-Life potential	-0,000359	-0,0000251

Σε σχέση με την SFM-BFK-BagSC, η Energy μειώνεται περίπου κατά 65,2% και το CO₂ περίπου 41,3%, γεγονός που επιβεβαιώνει τη μεγάλη επίδραση της αφαίρεσης του Kenaf.

6.3.2.3 SFM-B-BagSC

Η SFM-B-BagSC αντιστοιχεί στην περίπτωση όπου οι κύριες στρώσεις είναι Banana και υπάρχει Sugarcane bag.

Πίνακας 68: SFM-B-BagSC - Υλικό/στοιχείο, Ποσότητα

Υλικό/στοιχείο	Ποσότητα
Banana ×3	2,79 g
Jute laminate	0,50 g
Jute straps	0,20 g
Sugarcane bag	0,10 g
Σύνολο	3,60 g

Το συνολικό αποτέλεσμα είναι:

Πίνακας 69: SFM-B-BagSC – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	0,0751	0,00115
Manufacture	0	0
Transport	0,000382	0,0000275
Disposal	0,00180	0,000126
Total first life	≈0,0773	≈0,00131
End-of-Life potential	-0,000359	-0,0000251

6.3.2.4 Σύγκριση των επιμέρους life-cycle stages - Test 2

Με την προσθήκη της Sugarcane bag, η συνολική μάζα αυξάνεται περίπου στα 3,60 g. Τα υπόλοιπα στάδια παραμένουν σχεδόν ίδια μεταξύ των τριών συνθέσεων.

Energy

- Transport: περίπου **0,000382 MJ**
- Disposal: περίπου **0,00180 MJ**
- End-of-Life credit: περίπου **-0,000359 MJ**

CO₂

- Transport: περίπου **0,0000275 kg**
- Disposal: περίπου **0,000126 kg**
- End-of-Life credit: περίπου **-0,0000251 kg**

Επομένως, οι διαφορές μεταξύ SFM-BFK-BagSC, SFM-BF-BagSC και SFM-B-BagSC προκύπτουν κυρίως από το material stage και όχι από τη μεταφορά ή την τελική διάθεση. Η μεταφορά στο βασικό σενάριο των 150 km είναι ίδια για τις τρεις συνθέσεις.

6.3.2.5 Συνολικό συμπέρασμα Test 2

Πίνακας 70: Συνολικό συμπέρασμα Test 2 - Κωδικός, Energy (MJ), CO₂ (kg)

Κωδικός	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
SFM-BFK-BagSC	0,246	0,00271
SFM-BF-BagSC	0,0857	0,00159
SFM-B-BagSC	0,0773	0,00131

Στο Test 2 η κατάταξη είναι:

SFM-B-BagSC < SFM-BF-BagSC < SFM-BFK-BagSC

Η προσθήκη της Sugarcane bag έχει σαφώς μικρότερη επίδραση από την αλλαγή των κύριων υλικών. Η βασική περιβαλλοντική διαφοροποίηση εξακολουθεί να προκύπτει από τη μετάβαση από την SFM-BFK-BagSC προς συνθέσεις με υψηλότερη συμμετοχή Banana.

6.3.2.6 Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 2

Αναλυτικά για το Test 2 στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των διαφορετικών επιλογών με την αλλαγή των χιλιομέτρων:

Πίνακας 71: Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 2 - Σύνθεση, Παράμετρος, 150 km

Σύνθεση	Παράμετρος	150 km	330 km	2.395 km
SFM-BFK-BagSC	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,246	0,246	0,251
SFM-BFK-BagSC	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,00271	0,00274	0,00312
SFM-BFK-BagSC	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,1230	0,1230	0,1255
SFM-BFK-BagSC	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,001355	0,001370	0,001560
SFM-BFK-BagSC	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000382	0,000841	0,00610
SFM-BFK-BagSC	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000275	0,0000606	0,000440
SFM-BF-BagSC	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,0857	0,0862	0,0914
SFM-BF-BagSC	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,00159	0,00162	0,00200
SFM-BF-BagSC	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,04285	0,04310	0,04570
SFM-BF-BagSC	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,000795	0,000810	0,001000
SFM-BF-BagSC	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000382	0,000841	0,00610
SFM-BF-BagSC	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000275	0,0000606	0,000440
SFM-B-BagSC	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,0773	0,0775	0,0828
SFM-B-BagSC	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,00131	0,00134	0,00172
SFM-B-BagSC	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,03865	0,03875	0,04140
SFM-B-BagSC	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,000650	0,000670	0,000860
SFM-B-BagSC	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000575	0,000841	0,00610
SFM-B-BagSC	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000414	0,0000606	0,000440

Συγκεντρωτικά φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 72: Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 2 - Σύνθεση, 150 km, 330 km

Σύνθεση	150 km	330 km	2.395 km
SFM-BFK-BagSC – Energy	0,246	0,246	0,251
SFM-BFK-BagSC – CO ₂	0,00271	0,00274	0,00312
SFM-BF-BagSC – Energy	0,0857	0,0862	0,0914
SFM-BF-BagSC – CO ₂	0,00159	0,00162	0,00200
SFM-B-BagSC – Energy	0,0773	0,0775	0,0828
SFM-B-BagSC – CO ₂	0,00131	0,00134	0,00172

Συνολικά, η μετάβαση από 150 σε 330 km δεν προκαλεί σημαντική επιβάρυνση, ενώ η μεταφορά σε απόσταση 2.395 km οδηγεί σε σαφέστερη αύξηση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων. Η αύξηση είναι πιο εμφανής στις εκπομπές CO₂ σε σχέση με την κατανάλωση ενέργειας. Ιδιαίτερα η SFM-BF-BagSC παρουσιάζει αύξηση περίπου 26% στο CO₂, ενώ η SFM-BFK-BagSC περίπου 15%. Αυτό υποδηλώνει ότι όσο μειώνεται η αρχική περιβαλλοντική επιβάρυνση της σύνθεσης, η μεταφορά μπορεί να αποκτά αναλογικά μεγαλύτερη σημασία στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

6.3.3 Test 3 - Sugarcane στις κύριες στρώσεις

Στο Test 3 το Sugarcane εισάγεται πλέον ως κύριο υλικό των layers, ενώ διατηρείται και ως υλικό της συσκευασίας.

Οι τρεις συνθέσεις συμβολίζονται ως:

- **SFM-BFSC-BagSC**
- **SFM-BSC-BagSC**
- **SFM-SC-BagSC**

6.3.3.1 SFM-BFSC-BagSC

Η σύνθεση περιλαμβάνει μία στρώση Banana, μία Flax, μία Sugarcane, Jute laminate/straps και Sugarcane bag.

Πίνακας 73: SFM-BFSC-BagSC - Υλικό, Ποσότητα

Υλικό	Ποσότητα
Banana	0,93 g
Flax	0,93 g
Sugarcane	0,93 g
Jute laminate	0,50 g
Jute straps	0,20 g
Sugarcane bag	0,10 g
Σύνολο	3,60 g

Το συνολικό αποτέλεσμα είναι:

Πίνακας 74: SFM-BFSC-BagSC – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	0,0879	0,00191
Manufacture	0	0
Transport	0,000382	0,0000275
Disposal	0,00180	0,000126
Total first life	0,0901	0,00206
End-of-Life potential	-0,000359	-0,0000251

Το material stage εξακολουθεί να αντιπροσωπεύει πάνω από το 97% της Energy.

6.3.3.2 SFM-BSC-BagSC

Η SFM-BSC-BagSC αποτελείται από μία Banana layer και δύο Sugarcane layers.

Πίνακας 75: SFM-BSC-BagSC - Υλικό, Ποσότητα

Υλικό	Ποσότητα
Banana	0,93 g
Sugarcane ×2	≈1,86 g
Jute laminate	0,50 g
Jute straps	0,20 g
Sugarcane bag	0,10 g
Σύνολο	3,60 g

Το συνολικό αποτέλεσμα είναι:

Πίνακας 76: SFM-BSC-BagSC – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	0,0837	0,00210
Manufacture	0	0
Transport	0,000382	0,0000275
Disposal	0,00180	0,000126
Total first life	0,0859	0,00225
End-of-Life potential	-0,000359	-0,0000251

Σε σχέση με το προηγούμενο σενάριο, η αντικατάσταση του Flax από Sugarcane μειώνει την Energy περίπου κατά 4,7%, αλλά αυξάνει το CO₂ περίπου κατά 9,2%.

Αυτό είναι σημαντικό διότι αποδεικνύει ότι οι δύο περιβαλλοντικοί δείκτες δεν οδηγούν υποχρεωτικά στην ίδια επιλογή.

6.3.3.3 SFM-SC-BagSC

Στην SFM-SC-BagSC όλες οι κύριες στρώσεις είναι Sugarcane.

Πίνακας 77: SFM-SC-BagSC - Υλικό/στοιχείο, Ποσότητα

Υλικό/στοιχείο	Ποσότητα
Sugarcane ×3	≈2,79 g
Jute laminate	0,50 g
Jute straps	0,20 g
Sugarcane bag	0,10 g
Σύνολο	3,60 g

Το συνολικό αποτέλεσμα είναι:

Πίνακας 78: SFM-SC-BagSC – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	0,0881	0,00257
Manufacture	0	0
Transport	0,000382	0,0000275
Disposal	0,00180	0,000126
Total first life	0,0903	0,00273
End-of-Life potential	-0,000359	-0,0000251

Με την προσθήκη της Sugarcane σε όλα τα layers παρατηρούμε ότι τα αποτελέσματα είναι 5,12% μεγαλύτερη η ενεργειακή κατανάλωση και 21,33% υψηλότερες οι εκπομπές CO₂ σε σχέση με το παραπάνω μοντέλο.

6.3.3.4 Σύγκριση των επιμέρους life-cycle stages - Test 3

Και στο Test 3 η συνολική μάζα παραμένει περίπου 3,60 g, συνεπώς τα δευτερεύοντα στάδια του κύκλου ζωής έχουν παρόμοια συνεισφορά.

Energy

- Transport: περίπου **0,000382 MJ**
- Disposal: περίπου **0,00180 MJ**
- End-of-Life credit: περίπου **-0,000359 MJ**

CO₂

- Transport: περίπου **0,0000275 kg**
- Disposal: περίπου **0,000126 kg**
- End-of-Life credit: περίπου **-0,0000251 kg**

Κατά συνέπεια, οι διαφορές μεταξύ SFM-BFSC-BagSC, SFM-BSC-BagSC και SFM-SC-BagSC αποδίδονται κυρίως στη διαφορετική αναλογία Banana, Flax και Sugarcane στις κύριες στρώσεις.

6.3.3.5 Συνολική εικόνα Test 3

Πίνακας 79: Συνολική εικόνα Test 3 - Κωδικός, Energy (MJ), CO₂ (kg)

Κωδικός	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
SFM-BFSC-BagSC	0,0901	0,00206
SFM-BSC-BagSC	0,0859	0,00225
SFM-SC-BagSC	0,0903	0,00273

Ως προς την Energy:

SFM-BSC-BagSC < SFM-BFSC-BagSC < SFM-SC-BagSC

Ως προς το CO₂:

SFM-BFSC-BagSC < SFM-BSC-BagSC < SFM-SC-BagSC

Επομένως, η σύνθεση με τη χαμηλότερη Energy δεν ταυτίζεται απαραίτητα με εκείνη που εμφανίζει το χαμηλότερο ανθρακικό αποτύπωμα.

6.3.3.6 Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 3

Αναλυτικά για το Test 3 στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των διαφορετικών επιλογών με την αλλαγή των χιλιομέτρων:

Πίνακας 80: Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 3 - Σύνθεση, Παράμετρος, 150 km

Σύνθεση	Παράμετρος	150 km	330 km	2.395 km
SFM-BFSC-BagSC	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,0901	0,0906	0,0958
SFM-BFSC-BagSC	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,00206	0,00209	0,00247
SFM-BFSC-BagSC	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,04505	0,04530	0,04790
SFM-BFSC-BagSC	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,001030	0,001045	0,001235
SFM-BFSC-BagSC	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000382	0,000841	0,00610
SFM-BFSC-BagSC	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000275	0,0000606	0,000440
SFM-BSC-BagSC	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,0859	0,0863	0,0916
SFM-BSC-BagSC	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,00225	0,00229	0,00266
SFM-BSC-BagSC	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,04295	0,04315	0,04580
SFM-BSC-BagSC	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,001125	0,001145	0,001330
SFM-BSC-BagSC	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000382	0,000841	0,00610
SFM-BSC-BagSC	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000275	0,0000606	0,000440
SFM-SC-BagSC	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,0903	0,0908	0,0960
SFM-SC-BagSC	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,00273	0,00276	0,00314
SFM-SC-BagSC	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,04515	0,04540	0,04800
SFM-SC-BagSC	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,001365	0,001380	0,001570
SFM-SC-BagSC	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000382	0,000841	0,00610
SFM-SC-BagSC	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000275	0,0000606	0,000440

Συγκεντρωτικά φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 81: Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 3 - Σύνθεση, Energy 150, Energy 330

Σύνθεση	Energy 150	Energy 330	Energy 2395	CO ₂ 150	CO ₂ 330	CO ₂ 2395
SFM-BFSC-BagSC	0,0901	0,0906	0,0958	0,00206	0,00209	0,00247

Σύνθεση	Energy 150	Energy 330	Energy 2395	CO ₂ 150	CO ₂ 330	CO ₂ 2395
SFM-BSC-BagSC	0,0859	0,0863	0,0916	0,00225	0,00229	0,00266
SFM-SC-BagSC	0,0903	0,0908	0,0960	0,00273	0,00276	0,00314

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η μετάβαση από 150 σε 330 km έχει πολύ περιορισμένη επίδραση, καθώς η Energy αυξάνεται κατά περίπου 0,5% και το CO₂ κατά περίπου 1–2%. Αντίθετα, στα 2.395 km η επίδραση της μεταφοράς γίνεται ουσιαστικότερη: η Energy αυξάνεται περίπου κατά 6–7%, ενώ το CO₂ αυξάνεται περίπου κατά 15–20% σε σχέση με τα 150 km.

Συνεπώς, η απόσταση μεταφοράς επηρεάζει κυρίως το ανθρακικό αποτύπωμα, ενώ η επιλογή της σύνθεσης εξακολουθεί να αποτελεί καθοριστικό παράγοντα. Η SFM-BSC-BagSC υπερέχει ως προς την ενεργειακή απαίτηση, ενώ η SFM-BFSC-BagSC παρουσιάζει χαμηλότερες εκπομπές CO₂, γεγονός που αναδεικνύει ότι η αξιολόγηση μιας σύνθεσης πρέπει να λαμβάνει υπόψη περισσότερους από έναν περιβαλλοντικούς δείκτες.

6.3.4 Test 4 - Όλα τα στοιχεία από ένα υλικό

Στο Test 4 απομονώνεται η επίδραση του υλικού κατασκευάζοντας όλα τα στοιχεία της μάσκας από το ίδιο υλικό.

Οι κωδικοί είναι:

- SFM-B-ALL
- SFM-F-ALL
- SFM-SC-ALL

Η ένδειξη **ALL** σημαίνει ότι layers, laminate, straps και bag κατασκευάζονται από το ίδιο υλικό.

6.3.4.1 SFM-B-ALL

Η SFM-B-ALL αποτελείται αποκλειστικά από Banana fiber.

Πίνακας 82: SFM-B-ALL - Στοιχείο, Ποσότητα

Στοιχείο	Ποσότητα
3 layers	2,80 g
Laminate	0,50 g
Straps	0,20 g
Bag	0,10 g

Στοιχείο	Ποσότητα
Σύνολο	3,60 g

Το συνολικό αποτέλεσμα είναι:

Πίνακας 83: SFM-B-ALL – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	0,00622	0,000501
Manufacture	0	0
Transport	0,000382	0,0000275
Disposal	0,00180	0,000126
Total first life	0,00840	0,000654
End-of-Life potential	-0,000359	-0,0000251

6.3.4.2 SFM-F-ALL

Στην SFM-F-ALL όλα τα components είναι από Flax.

Η συνολική μάζα είναι επίσης 3,60 g όπως φαίνεται στον πίνακα παραπάνω.

Το συνολικό αποτέλεσμα είναι:

Πίνακας 84: SFM-F-ALL – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	0,0396	0,00158
Manufacture	0	0
Transport	0,000382	0,0000275
Disposal	0,00180	0,000126
Total first life	0,0418	0,00173
End-of-Life potential	-0,000359	-0,0000251

6.3.4.3 SFM-SC-ALL

Στην SFM-SC-ALL όλα τα components είναι από Sugarcane.

Η συνολική μάζα είναι 3,60 g.

Το συνολικό αποτέλεσμα είναι:

Πίνακας 85: SFM-SC-ALL – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	0,0233	0,00233
Manufacture	0	0
Transport	0,000382	0,0000275
Disposal	0,00180	0,000126
Total first life	0,0254	0,00248

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
End-of-Life potential	-0,000359	-0,0000251

6.3.4.4 Σύγκριση των επιμέρους life-cycle stages - Test 4

Στο Test 4 όλα τα στοιχεία της μάσκας κατασκευάζονται από το ίδιο υλικό, ενώ η συνολική μάζα παραμένει 3,60 g. Επομένως, η μεταφορά και η τελική διάθεση παραμένουν πρακτικά σταθερές.

Energy

- Transport: περίπου **0,000382 MJ**
- Disposal: περίπου **0,00180 MJ**
- End-of-Life credit: περίπου **-0,000359 MJ**

CO₂

- Transport: περίπου **0,0000275 kg**
- Disposal: περίπου **0,000126 kg**
- End-of-Life credit: περίπου **-0,0000251 kg**

Οι διαφορές των συνολικών αποτελεσμάτων μπορούν επομένως να αποδοθούν κυρίως στην παραγωγή του υλικού. Αυτό φαίνεται ιδιαίτερα καθαρά, καθώς για ίδια μάζα 3,60 g το Banana παρουσιάζει πολύ χαμηλότερη Material Energy και Material CO₂ σε σχέση με Flax και Sugarcane.

6.3.4.5 Συνολική εικόνα Test 4

Πίνακας 86: Συνολική εικόνα Test 4 - Κωδικός, Energy (MJ), CO₂ (kg)

Κωδικός	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
SFM-B-ALL	0,00840	0,000654
SFM-F-ALL	0,0418	0,00173
SFM-SC-ALL	0,0254	0,00248

Ως προς την Energy:

SFM-B-ALL < SFM-SC-ALL < SFM-F-ALL

Ως προς το CO₂:

SFM-B-ALL < SFM-F-ALL < SFM-SC-ALL

Στο συγκεκριμένο μοντέλο, η SFM-B-ALL εμφανίζει το χαμηλότερο αποτέλεσμα και στους δύο εξεταζόμενους δείκτες.

6.3.4.6 Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 4

Αναλυτικά για το Test 4 στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των διαφορετικών επιλογών με την αλλαγή των χιλιομέτρων:

Πίνακας 87: Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 4 - Σύνθεση, Παράμετρος, 150 km

Σύνθεση	Παράμετρος	150 km	330 km	2.395 km
SFM-B-ALL	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,00840	0,00885	0,0141
SFM-B-ALL	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,000654	0,000688	0,00107
SFM-B-ALL	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,00420	0,004425	0,00705
SFM-B-ALL	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,000327	0,000344	0,000535
SFM-B-ALL	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000382	0,000841	0,00610
SFM-B-ALL	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000275	0,0000606	0,000440
SFM-F-ALL	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,0418	0,0423	0,0475
SFM-F-ALL	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,00173	0,00176	0,00214
SFM-F-ALL	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,02090	0,02115	0,02375
SFM-F-ALL	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,000865	0,000880	0,001070
SFM-F-ALL	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000382	0,000841	0,00610
SFM-F-ALL	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000275	0,0000606	0,000440
SFM-SC-ALL	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,0254	0,0259	0,0312
SFM-SC-ALL	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,00248	0,00251	0,00289
SFM-SC-ALL	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,01270	0,01295	0,01560
SFM-SC-ALL	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,001240	0,001255	0,001445
SFM-SC-ALL	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000382	0,000841	0,00610
SFM-SC-ALL	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000275	0,0000606	0,000440

Συγκεντρωτικά φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 88: Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 4 - Σύνθεση, Energy 150, Energy 330

Σύνθεση	Energy 150	Energy 330	Energy 2395	CO ₂ 150	CO ₂ 330	CO ₂ 2395
SFM-B-ALL	0,00840	0,00885	0,0141	0,000654	0,000688	0,00107
SFM-F-ALL	0,0418	0,0423	0,0475	0,00173	0,00176	0,00214
SFM-SC-ALL	0,0254	0,0259	0,0312	0,00248	0,00251	0,00289

Τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η αύξηση της απόστασης από 150 σε 330 km προκαλεί σχετικά περιορισμένες μεταβολές, ενώ στα 2.395 km η επίδραση της μεταφοράς γίνεται πολύ πιο εμφανής,

ιδιαίτερα για τη SFM-B-ALL. Παρά τη σημαντική ποσοστιαία αύξηση της τελευταίας, εξακολουθεί να διατηρεί το χαμηλότερο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα.

Συνεπώς, η SFM-B-ALL παραμένει η σύνθεση με τις χαμηλότερες απόλυτες απαιτήσεις Energy και εκπομπές CO₂, ενώ η SFM-F-ALL επιβαρύνεται περισσότερο ενεργειακά και η SFM-SC-ALL παρουσιάζει τις υψηλότερες εκπομπές CO₂. Τα αποτελέσματα αναδεικνύουν επίσης ότι στις συνθέσεις με πολύ χαμηλό αρχικό αποτύπωμα, η απόσταση μεταφοράς μπορεί να αποτελέσει ιδιαίτερα σημαντικό ποσοστό του συνολικού περιβαλλοντικού αποτελέσματος.

6.3.5 Test 5 - 3 Layer PET Surgical Face Mask

Στο Test 5 εξετάζεται τριών στρώσεων χειρουργική μάσκα από virgin PET και διαφορετικές στρατηγικές End-of-Life.

Οι κωδικοί ορίζονται ως:

- SFM-PET-R
- SFM-PET-B-R
- SFM-PET-B-RU
- SFM-PET-B-LF
- SFM-PET-B-RM

6.3.5.1 SFM-PET-R - Recycling χωρίς bag

Η SFM-PET-R αποτελείται από τρεις PET layers, PET laminate και PET straps, χωρίς ξεχωριστό bag.

Πίνακας 89: SFM-PET-R – Recycling χωρίς bag - Component, PET

Component	PET
3 layers	2,80 g
Laminate	0,50 g
Straps	0,20 g
Σύνολο	3,50 g

Το συνολικό αποτέλεσμα είναι:

Πίνακας 90: SFM-PET-R - Recycling χωρίς bag – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	≈0,3229	≈0,01455
Manufacture	0	0
Transport	0,000372	0,0000268

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Disposal	≈0,00175	≈0,000122
Total first life	0,325	0,0147
End-of-Life potential	-0,156	-0,00585

6.3.5.2 SFM-PET-B-R - Recycling με PET bag

Η SFM-PET-B-R περιλαμβάνει επιπλέον PET bag μάζας 0,10 g και συνολική μάζα περίπου 3,60 g.

Πίνακας 91: SFM-PET-B-R – Recycling με PET bag - Component, PET

Component	PET
3 layers	2,80 g
Laminate	0,50 g
Straps	0,20 g
Bag	0,10 g
Σύνολο	3,60 g

Το συνολικό αποτέλεσμα είναι:

Πίνακας 92: SFM-PET-B-R - Recycling με PET bag – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	≈0,3318	≈0,01495
Manufacture	0	0
Transport	0,000382	0,0000275
Disposal	≈0,00180	≈0,000126
Total first life	0,334	0,0151
End-of-Life potential	-0,160	-0,00602

6.3.5.3 SFM-PET-B-RU - Reuse

Η σύνθεση παραμένει σταθερή στα περίπου 3,60 g PET, αλλά η στρατηγική End-of-Life αλλάζει σε Reuse.

Το συνολικό αποτέλεσμα είναι:

Πίνακας 93: SFM-PET-B-RU - Reuse – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	≈0,3298	≈0,01485
Manufacture	0	0
Transport	0,000382	0,0000275
Disposal	≈0,00180	≈0,000126
Total first life	0,332	0,0150

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
End-of-Life potential	-0,261	-0,00961

Το first-life αποτέλεσμα είναι 0,332 MJ και 0,0150 kg CO₂, ενώ το Reuse credit ανέρχεται σε -0,261 MJ και -0,00961 kg CO₂. Το NET καθαρό αποτέλεσμα είναι επομένως περίπου: ≈0,071 MJ και ≈0,00539 kg CO₂.

6.3.5.4 SFM-PET-B-LF - Landfill

Στην SFM-PET-B-LF τα PET components οδηγούνται σε Landfill.

Το συνολικό αποτέλεσμα είναι:

Πίνακας 94: SFM-PET-B-LF - Landfill – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	≈0,3298	≈0,01485
Manufacture	0	0
Transport	0,000382	0,0000275
Disposal	≈0,00180	≈0,000126
Total first life	0,332	0,0150
End-of-Life potential	0	0

Εδώ το μόνο που αλλάζει σε σχέση με τα παραπάνω είναι το End-of-Life potential που είναι μηδενικό. Άρα το Net αποτέλεσμα παραμένει 0,332 MJ και 0,0150 kg CO₂.

6.3.5.5 SFM-PET-B-RM - Re-manufacture

Στην SFM-PET-B-RM εφαρμόζεται Re-manufacture στα PET components.

Το συνολικό αποτέλεσμα είναι:

Πίνακας 95: SFM-PET-B-RM - Re-manufacture – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	≈0,3298	≈0,01485
Manufacture	0	0
Transport	0,000382	0,0000275
Disposal	≈0,00180	≈0,000126
Total first life	0,332	0,0150
End-of-Life potential	-0,250	-0,00885

Το Re-manufacture credit είναι -0,250 MJ και -0,00885 kg CO₂. Το first-life αποτέλεσμα είναι περίπου ≈0,082 MJ και ≈0,00615 kg CO₂.

6.3.5.6 Σύγκριση των επιμέρους life-cycle stages - Test 5

Στο Test 5 η περίπτωση διαφοροποιείται, καθώς η χειρουργική μάσκα κατασκευάζεται από PET και μεταβάλλεται σκόπιμα η στρατηγική End-of-Life. Επομένως, η βασική διαφοροποίηση δεν βρίσκεται πλέον μόνο στο material stage αλλά κυρίως στις περιβαλλοντικές πιστώσεις που προκύπτουν μετά τη χρήση.

Για την περίπτωση **χωρίς bag**, μάζας 3,50 g:

Energy

- Transport: περίπου **0,000372 MJ**
- Recycling credit: **-0,156 MJ**

CO₂

- Transport: περίπου **0,0000268 kg**
- Recycling credit: **-0,00585 kg**

Για τα σενάρια **με PET bag**, συνολικής μάζας περίπου 3,60 g:

Energy

- Transport: περίπου **0,000382 MJ**
- Recycling credit: **-0,160 MJ**
- Reuse credit: **-0,261 MJ**
- Landfill credit: **0 MJ**
- Re-manufacture credit: **-0,250 MJ**

CO₂

- Transport: περίπου **0,0000275 kg**
- Recycling credit: **-0,00602 kg**
- Reuse credit: **-0,00961 kg**
- Landfill credit: **0 kg**
- Re-manufacture credit: **-0,00885 kg**

Στο συγκεκριμένο Test, το End-of-Life έχει πολύ μεγαλύτερη επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα από τη μικρή μεταβολή της μάζας λόγω της συσκευασίας. Το Reuse παρουσιάζει τη μεγαλύτερη

περιβαλλοντική επίπτωση, ακολουθεί το Re-manufacture και το Recycling, λόγω του End-of-Life potential ενώ στο Landfill δεν προκύπτει κανένα End-of-Life credit.

6.3.5.7 Συνολική εικόνα Test 5

Πίνακας 96: Συνολική εικόνα Test 5 - Κωδικός, First-life Energy, First-life CO₂

Κωδικός	First-life Energy	First-life CO ₂	Net Energy	Net CO ₂
SFM-PET-R	0,325	0,0147	0,169	0,00885
SFM-PET-B-R	0,334	0,0151	0,174	0,00908
SFM-PET-B-RU	0,332	0,0150	0,071	0,00539
SFM-PET-B-LF	0,332	0,0150	0,332	0,0150
SFM-PET-B-RM	0,332	0,0150	0,082	0,00615

Στο συγκεκριμένο μοντέλο, η σειρά του καθαρού αποτελέσματος είναι:

SFM-PET-B-RU < SFM-PET-B-RM < SFM-PET-R / SFM-PET-B-R < SFM-PET-B-LF

Η επιλογή του End-of-Life scenario επηρεάζει το τελικό περιβαλλοντικό αποτέλεσμα πολύ περισσότερο από τις μικρές διαφοροποιήσεις μάζας που προκαλεί η προσθήκη του PET bag.

6.3.5.8 Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 5

Αναλυτικά για το Test 5 στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των διαφορετικών επιλογών με την αλλαγή των χιλιομέτρων:

Πίνακας 97: Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 5 - Σύνθεση, Παράμετρος, 150 km

Σύνθεση	Παράμετρος	150 km	330 km	2.395 km
SFM-PET-R	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,325	0,325	0,330
SFM-PET-R	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,0147	0,0147	0,0151
SFM-PET-R	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,1625	0,1625	0,1650
SFM-PET-R	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,00735	0,00735	0,00755
SFM-PET-R	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000372	0,000818	0,00593
SFM-PET-R	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000268	0,0000589	0,000427
SFM-PET-B-R	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,334	0,335	0,340
SFM-PET-B-R	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,0151	0,0151	0,0155
SFM-PET-B-R	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,1670	0,1675	0,1700
SFM-PET-B-R	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,00755	0,00755	0,00775
SFM-PET-B-R	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000382	0,000841	0,00610
SFM-PET-B-R	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000275	0,0000606	0,000440
SFM-PET-B-RU	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,332	0,333	0,338

Σύνθεση	Παράμετρος	150 km	330 km	2.395 km
SFM-PET-B-RU	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,0150	0,0150	0,0154
SFM-PET-B-RU	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,1660	0,1665	0,1690
SFM-PET-B-RU	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,00750	0,00750	0,00770
SFM-PET-B-RU	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000382	0,000841	0,00610
SFM-PET-B-RU	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000275	0,0000606	0,000440
SFM-PET-B-LF	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,332	0,333	0,338
SFM-PET-B-LF	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,0150	0,0150	0,0154
SFM-PET-B-LF	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,1660	0,1665	0,1690
SFM-PET-B-LF	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,00750	0,00750	0,00770
SFM-PET-B-LF	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000382	0,000841	0,00610
SFM-PET-B-LF	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000275	0,0000606	0,000440
SFM-PET-B-RM	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,332	0,333	0,338
SFM-PET-B-RM	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,0150	0,0150	0,0154
SFM-PET-B-RM	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,1660	0,1665	0,1690
SFM-PET-B-RM	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,00750	0,00750	0,00770
SFM-PET-B-RM	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,000382	0,000841	0,00610
SFM-PET-B-RM	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,0000275	0,0000606	0,000440

Συγκεντρωτικά φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 98: Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Test 5 - Κωδικός, Energy 150, Energy 330

Κωδικός	Energy 150	Energy 330	Energy 2395	CO ₂ 150	CO ₂ 330	CO ₂ 2395
SFM-PET-R	0,325	0,325	0,330	0,0147	0,0147	0,0151
SFM-PET-B-R	0,334	0,335	0,340	0,0151	0,0151	0,0155
SFM-PET-B-RU	0,332	0,333	0,338	0,0150	0,0150	0,0154
SFM-PET-B-LF	0,332	0,333	0,338	0,0150	0,0150	0,0154
SFM-PET-B-RM	0,332	0,333	0,338	0,0150	0,0150	0,0154

Συνολικά, η μεταβολή της απόστασης από 150 σε 330 km έχει σχεδόν αμελητέα επίδραση στα PET σενάρια. Ακόμη και όταν η απόσταση αυξάνεται στα 2.395 km, η συνολική Energy αυξάνεται μόνο κατά περίπου 1,5–1,8%, ενώ οι εκπομπές CO₂ αυξάνονται περίπου κατά 2,6–2,7%.

Το αποτέλεσμα αυτό υποδηλώνει ότι, στις PET χειρουργικές μάσκες, η παραγωγή του υλικού και τα υπόλοιπα στάδια του κύκλου ζωής έχουν πολύ μεγαλύτερη συμμετοχή στο συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα από ό,τι η μεταφορά. Επομένως, η αλλαγή της απόστασης μεταφοράς

επηρεάζει μεν το αποτέλεσμα, αλλά σε πολύ μικρότερο βαθμό συγκριτικά με τις διαφορές που μπορεί να προκύψουν από το υλικό ή από το σενάριο διαχείρισης στο τέλος ζωής.

Άρα, όπως και στην FFP2, στα Tests 1–4 της Surgical Mask οι μεταβολές προέρχονται κυρίως από το material stage, ενώ στο Test 5 ο καθοριστικός παράγοντας γίνεται η στρατηγική End-of-Life. Στο συγκεκριμένο Test, το End-of-Life έχει πολύ μεγαλύτερη επίδραση στο τελικό αποτέλεσμα από τη μικρή μεταβολή της μάζας λόγω της συσκευασίας. Το Reuse παρουσιάζει τη μεγαλύτερη περιβαλλοντική πίστωση, ακολουθεί το Re-manufacture και το Recycling, ενώ στο Landfill δεν προκύπτει κανένα End-of-Life credit.

6.4 Alcohol Wipes

Στα παρακάτω σενάρια εξετάζεται συσκευασία 60 wipes, με μάζα κάθε wipe 4,3 g, άρα συνολική μάζα wipes περίπου 0,26 kg. Τα υλικά εξετάζονται ως virgin, δηλαδή με 0% recycled content. Οι τιμές του Disposal είναι προσεγγιστικές, επειδή προκύπτουν από τη διαφορά Total – Material – Transport, με βάση την παραδοχή του δικού του Eco Audit ότι Manufacture και Use είναι μηδενικά. Οι τιμές Transport προέρχονται απευθείας από τα αποτελέσματα για τα 150 km.

6.4.1 Test 1 – Banana fiber σε wipes, package και cap

Η σύνθεση του Test 1 αποτελείται αποκλειστικά από Banana fiber:

- Wipes: $4,3 \text{ g} \times 60 \approx 0,26 \text{ kg}$
- Package: 8 g
- Cap: 8 g
- Συνολική μάζα: περίπου 0,27 kg

Τα επιμέρους στάδια του κύκλου ζωής παρουσιάζουν την ακόλουθη συνεισφορά:

Πίνακας 99: Test 1 – Banana fiber σε wipes, package και cap – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	0,462	0,0372
Manufacture	0	0
Transport	0,0284	0,00204
Disposal	≈0,133	≈0,00936
Total first life	0,623	0,0486
End-of-Life potential	Δεν καταγράφεται ξεχωριστά	Δεν καταγράφεται ξεχωριστά

Η ενεργειακή απαίτηση των υλικών είναι περίπου 0,46 MJ, με τα wipes να ευθύνονται για το μεγαλύτερο μέρος της, περίπου 0,45 MJ. Το Material αντιπροσωπεύει 74,1% της συνολικής Energy

και 76,6% του CO₂. Η μεταφορά αντιστοιχεί σε 4,6% της Energy και 4,2% του CO₂, ενώ το Disposal έχει σχετικά σημαντική συμμετοχή, 21,4% στην Energy και 19,2% στο CO₂.

Το Banana fiber εμφανίζει πολύ χαμηλό περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σχέση με τις υπόλοιπες εξεταζόμενες ίνες. Το γεγονός ότι το Material Energy είναι μόλις 0,462 MJ περιορίζει σημαντικά και το συνολικό αποτέλεσμα.

Παράλληλα, επειδή η επιβάρυνση από το ίδιο το υλικό είναι χαμηλή, το Disposal αποκτά αναλογικά μεγαλύτερη σημασία. Δηλαδή, στο Test 1 η περιβαλλοντική επίδοση δεν καθορίζεται αποκλειστικά από το υλικό αλλά επηρεάζεται αισθητά και από το τέλος ζωής.

6.4.2 Test 2 - Flax fiber σε wipes, package και cap

Στο Test 2 όλα τα βασικά μέρη αποτελούνται από Flax fiber:

- Wipes: 4,3 g × 60 ≈ 0,26 kg
- Package: 8 g
- Cap: 8 g
- Συνολική μάζα: περίπου 0,27 kg

Τα επιμέρους στάδια του κύκλου ζωής παρουσιάζουν την ακόλουθη συνεισφορά:

Πίνακας 100: Test 2 - Flax fiber σε wipes, package και cap – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	3,02	0,120
Manufacture	0	0
Transport	0,0292	0,00210
Disposal	≈0,141	≈0,00990
Total first life	3,19	0,132
End-of-Life potential	Δεν καταγράφεται ξεχωριστά	Δεν καταγράφεται ξεχωριστά

Η ενεργειακή απαίτηση των υλικών είναι περίπου 3,0 MJ, από τα οποία περίπου 2,8 MJ αντιστοιχούν στα wipes. Το Material αποτελεί 94,8% της συνολικής Energy και 91,2% του CO₂. Η συνεισφορά της μεταφοράς στα 150 km είναι μόλις 0,9% της Energy και 1,6% του CO₂.

Το Flax fiber παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ενεργειακή απαίτηση από όλα τα βασικά σενάρια. Η Total Energy των 3,19 MJ είναι περισσότερο από πενταπλάσια εκείνης του Test 1.

Χαρακτηριστικό είναι ότι σχεδόν ολόκληρη η περιβαλλοντική επιβάρυνση οφείλεται στο ίδιο το υλικό. Επομένως, σε αυτή την περίπτωση η επιλογή της πρώτης ύλης είναι πολύ σημαντικότερη από τη μεταφορά ή το Disposal.

Παρόλα αυτά, το Flax δεν παρουσιάζει το μεγαλύτερο CO₂ μεταξύ όλων των tests. Αυτό είναι σημαντικό, γιατί δείχνει ότι Energy και CO₂ δεν ακολουθούν υποχρεωτικά την ίδια κατάταξη.

6.4.3 Test 3 - Sugarcane fiber σε wipes, package και cap

Στο Test 3 όλα τα μέρη αποτελούνται από Sugarcane fiber:

- Wipes: $4,3 \text{ g} \times 60 \approx 0,26 \text{ kg}$
- Package: 8 g
- Cap: 8 g
- Συνολική μάζα: περίπου 0,27 kg

Τα επιμέρους στάδια του κύκλου ζωής παρουσιάζουν την ακόλουθη συνεισφορά:

Πίνακας 101: Test 3 - Sugarcane fiber σε wipes, package και cap – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	1,78	0,178
Manufacture	0	0
Transport	0,0292	0,00210
Disposal	≈0,131	≈0,00890
Total first life	1,94	0,189
End-of-Life potential	Δεν καταγράφεται ξεχωριστά	Δεν καταγράφεται ξεχωριστά

Η συνολική ενεργειακή απαίτηση των υλικών είναι περίπου 1,8 MJ, με τα wipes να συνεισφέρουν περίπου 1,7 MJ, δηλαδή το μεγαλύτερο μέρος του αποτελέσματος. Πιο συγκεκριμένα το Material αντιπροσωπεύει 91,4% της συνολικής Energy και 93,8% του συνολικού CO₂.

Το Sugarcane fiber παρουσιάζει μικρότερη ενεργειακή απαίτηση από το Flax, αλλά σημαντικά μεγαλύτερη από το Banana fiber.

Ιδιαίτερα ενδιαφέρον είναι το CO₂. Παρότι η Total Energy του Test 3 (1,94 MJ) είναι σημαντικά μικρότερη από τα 3,19 MJ του Flax, το Total CO₂ είναι 0,189 kg, έναντι μόλις 0,132 kg του Flax.

Επομένως, το Sugarcane εμφανίζει καλύτερη συμπεριφορά ως προς την Energy αλλά δυσμενέστερη ως προς το CO₂ σε σχέση με το Flax. Άρα, οι συνολικές επιπτώσεις καθορίζονται κυρίως από την παραγωγή του Sugarcane fiber και λιγότερο από τα υπόλοιπα στάδια του κύκλου ζωής.

6.4.4 Test 4 - Banana wipes + Sugarcane package/cap

Το Test 4 αποτελεί υβριδική σύνθεση:

- Wipes: Banana fiber, περίπου $4,3 \text{ g} \times 60 = 0,26 \text{ kg}$
- Package: Sugarcane fiber, 8 g
- Cap: Sugarcane fiber, 8 g
- Συνολική μάζα: περίπου 0,27 kg

Τα επιμέρους στάδια του κύκλου ζωής παρουσιάζουν την ακόλουθη συνεισφορά:

Πίνακας 102: Test 4 - Banana wipes + Sugarcane package/cap – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	0,551	0,0464
Manufacture	0	0
Transport	0,0292	0,00210
Disposal	≈0,137	≈0,00960
Total first life	0,717	0,0581
End-of-Life potential	Δεν καταγράφεται ξεχωριστά	Δεν καταγράφεται ξεχωριστά

Η ενεργειακή συνεισφορά των wipes είναι περίπου 0,45 MJ, ενώ package και cap συνεισφέρουν περίπου 0,052 MJ το καθένα. Η συνολική Material Energy είναι περίπου 0,55 MJ. Άρα το Material αντιπροσωπεύει 76,8% της Energy και 79,9% του CO₂, ενώ το Disposal έχει συμμετοχή 19,1% και 16,5% αντίστοιχα.

Το Test 4 παρουσιάζει πολύ καλή συνολική επίδοση. Η χρήση Banana fiber στο κύριο τμήμα του προϊόντος, δηλαδή στα 60 wipes, διατηρεί χαμηλή την ενεργειακή κατανάλωση, παρότι package και cap αντικαθίστανται από Sugarcane fiber.

Σε σχέση με το Test 1:

- Energy: 0,717 έναντι 0,623 MJ
- CO₂: 0,0581 έναντι 0,0486 kg

Η αλλαγή μόνο της συσκευασίας και του cap προς Sugarcane αυξάνει επομένως το αποτύπωμα, χωρίς όμως να αναιρεί το βασικό πλεονέκτημα που προσφέρει το Banana fiber στα wipes.

Αυτό επιβεβαιώνει ότι το υλικό των wipes έχει πολύ μεγαλύτερη σημασία από το υλικό package/cap, λόγω της πολύ μεγαλύτερης μάζας του.

6.4.5 Test 5 - Sugarcane wipes + Banana package/cap

Στο Test 5 γίνεται το αντίστροφο του Test 4:

- Wipes: Sugarcane fiber, περίπου $4,3 \text{ g} \times 60 = 0,26 \text{ kg}$
- Package: Banana fiber, 8 g
- Cap: Banana fiber, 8 g
- Συνολική μάζα: περίπου 0,27 kg

Τα επιμέρους στάδια του κύκλου ζωής παρουσιάζουν την ακόλουθη συνεισφορά:

Πίνακας 103: Test 5 - Sugarcane wipes + Banana package/cap – Αποτελέσματα Energy και CO₂

Στάδιο	Energy (MJ)	CO ₂ (kg)
Materials	1,70	0,169
Manufacture	0	0
Transport	0,0292	0,00210
Disposal	≈0,141	≈0,00990
Total first life	1,87	0,181
End-of-Life potential	Δεν καταγράφεται ξεχωριστά	Δεν καταγράφεται ξεχωριστά

Η ενεργειακή συνεισφορά των wipes είναι περίπου 1,7 MJ, ενώ package και cap συνεισφέρουν μόλις περίπου 0,014 MJ το καθένα. Το Material αντιπροσωπεύει περίπου το 91,1% της Energy και το 93,5% του CO₂. Συνεπώς, όπως και στο Test 3, η κύρια περιβαλλοντική επιβάρυνση προέρχεται από το υλικό των wipes, ενώ package, cap, μεταφορά και Disposal έχουν σαφώς μικρότερη επίδραση.

Το Test 5 παρουσιάζει πολύ παρόμοια αποτελέσματα με το Test 3, επειδή και στα δύο σενάρια τα 60 wipes αποτελούνται από Sugarcane fiber.

Ωστόσο, η αντικατάσταση του Sugarcane package/cap με Banana μειώνει ελαφρά:

- την Energy από 1,94 σε 1,87 MJ
- το CO₂ από 0,189 σε 0,181 kg

Η διαφορά είναι σχετικά μικρή, επιβεβαιώνοντας ξανά ότι η κύρια πρώτη ύλη των wipes καθορίζει το μεγαλύτερο μέρος του συνολικού αποτελέσματος, ενώ οι αλλαγές στη συσκευασία έχουν μικρότερη επίδραση.

6.4.6 Συνολική εικόνα βασικών αποτελεσμάτων

Πίνακας 104: Συγκριτικός πίνακας βασικών αποτελεσμάτων - Test, Wipes / Package / Cap, Material Energy (MJ)

Test	Wipes / Package / Cap	Material Energy (MJ)	Material CO ₂ (kg)	Total Energy (MJ)	Total CO ₂ (kg)
1	Banana / Banana / Banana	0,462	0,0372	0,623	0,0486
2	Flax / Flax / Flax	3,02	0,120	3,19	0,132
3	Sugarcane / Sugarcane / Sugarcane	1,78	0,178	1,94	0,189
4	Banana / Sugarcane / Sugarcane	0,551	0,0464	0,717	0,0581
5	Sugarcane / Banana / Banana	1,70	0,169	1,87	0,181

• Σύγκριση Energy

Με βάση τη Total Energy, η σειρά από τη χαμηλότερη προς την υψηλότερη τιμή είναι:

Test 1 Banana → Test 4 Banana/Sugarcane → Test 5 Sugarcane/Banana → Test 3 Sugarcane → Test 2 Flax

Η διαφορά είναι ιδιαίτερα μεγάλη. Το Test 1 χρειάζεται μόλις 0,623 MJ, ενώ το Test 2 φτάνει τα 3,19 MJ, δηλαδή η συνολική ενεργειακή απαίτηση του Flax scenario είναι περίπου 5,1 φορές μεγαλύτερη.

• Σύγκριση CO₂

Ως προς το Total CO₂, η σειρά διαφοροποιείται:

Test 1 → Test 4 → Test 2 → Test 5 → Test 3

Άρα:

- το Banana fiber παρουσιάζει τις χαμηλότερες τιμές τόσο σε Energy όσο και σε CO₂,
- το Flax fiber εμφανίζει τη μεγαλύτερη Energy αλλά όχι το μεγαλύτερο CO₂,
- το Sugarcane fiber εμφανίζει χαμηλότερη Energy από το Flax αλλά υψηλότερο CO₂.

Αυτό δείχνει ότι δεν είναι σωστό να αξιολογείται ένα υλικό με βάση έναν μόνο δείκτη.

6.4.7 Επίδραση του υλικού των wipes

Η πιο καθαρή σύγκριση προκύπτει από τα Tests 4 και 5.

Στο Test 4, όπου τα wipes είναι Banana και μόνο η συσκευασία Sugarcane:

Total Energy = 0,717 MJ

Total CO₂ = 0,0581 kg

Στο Test 5, όπου τα wipes είναι Sugarcane και μόνο η συσκευασία Banana:

Total Energy = 1,87 MJ

Total CO₂ = 0,181 kg

Επομένως, η αντικατάσταση του υλικού των wipes έχει πολύ μεγαλύτερη επίδραση από την αντικατάσταση του υλικού package/cap. Αυτό είναι αναμενόμενο από τη μάζα: τα wipes αποτελούν περίπου 0,26 kg του συνολικού προϊόντος των ~0,27 kg.

6.4.8 Επίδραση των σταδίων του κύκλου ζωής

Στα Tests 2, 3 και 5, το Material κυριαρχεί ξεκάθαρα, αντιπροσωπεύοντας πάνω από 90% της Energy ή/και του CO₂.

Στα Tests 1 και 4, επειδή τα Banana-based υλικά έχουν πολύ χαμηλότερη αρχική επιβάρυνση, το Disposal αποκτά μεγαλύτερη σχετική συμμετοχή, φτάνοντας περίπου στο 19–21% του αποτελέσματος.

Στα αρχεία, το Manufacture και το Use έχουν μηδενική συνεισφορά στα συγκεκριμένα μοντέλα Eco Audit. Αυτό σημαίνει ότι οι διαφορές που παρατηρούνται καθορίζονται ουσιαστικά από Material, Transport και Disposal και δεν πρέπει να ερμηνευθούν σαν γενική παραδοχή ότι η παραγωγή πραγματικών alcohol wipes δεν έχει περιβαλλοντική επίπτωση.

6.4.9 Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Alcohol Wipes

Αναλυτικά για τα Test 1-5 στον παρακάτω πίνακα φαίνεται η σύγκριση των αποτελεσμάτων των διαφορετικών επιλογών με την αλλαγή των χιλιομέτρων

Πίνακας 105: Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Alcohol Wipes - Σύνθεση, Παράμετρος, 150 km

Σύνθεση	Παράμετρος	150 km	330 km	2.395 km
TEST 1 – B-B-B	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,623	0,676	1,08
TEST 1 – B-B-B	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,0486	0,0525	0,0814
TEST 1 – B-B-B	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,312	0,338	0,539
TEST 1 – B-B-B	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,0243	0,0262	0,0407
TEST 1 – B-B-B	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,0284	0,0642	0,466
TEST 1 – B-B-B	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,00204	0,00462	0,0335
TEST 2 – F-F-F	Συνολική Ενέργεια (MJ)	3,19	3,23	3,63
TEST 2 – F-F-F	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,132	0,135	0,164
TEST 2 – F-F-F	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	1,60	1,61	1,81
TEST 2 – F-F-F	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,0661	0,0673	0,0818
TEST 2 – F-F-F	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,0292	0,0642	0,466
TEST 2 – F-F-F	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,00210	0,00462	0,0335

Σύνθεση	Παράμετρος	150 km	330 km	2.395 km
TEST 3 – SC-SC-SC	Συνολική Ενέργεια (MJ)	1,94	1,98	2,38
TEST 3 – SC-SC-SC	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,189	0,192	0,221
TEST 3 – SC-SC-SC	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,971	0,988	1,19
TEST 3 – SC-SC-SC	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,0946	0,0959	0,110
TEST 3 – SC-SC-SC	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,0292	0,0642	0,466
TEST 3 – SC-SC-SC	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,00210	0,00462	0,0335
TEST 4 – B-SC-SC	Συνολική Ενέργεια (MJ)	0,717	0,752	1,15
TEST 4 – B-SC-SC	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,0581	0,0606	0,0895
TEST 4 – B-SC-SC	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,358	0,376	0,577
TEST 4 – B-SC-SC	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,0290	0,0303	0,0448
TEST 4 – B-SC-SC	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,0292	0,0642	0,466
TEST 4 – B-SC-SC	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,00210	0,00462	0,0335
TEST 5 – SC-B-B	Συνολική Ενέργεια (MJ)	1,87	1,90	2,30
TEST 5 – SC-B-B	Συνολικό CO ₂ (kg)	0,181	0,184	0,213
TEST 5 – SC-B-B	Ετήσια Ενέργεια (MJ/έτος)	0,933	0,950	1,15
TEST 5 – SC-B-B	Ετήσιο CO ₂ (kg/έτος)	0,0906	0,0918	0,106
TEST 5 – SC-B-B	Ενέργεια Μεταφοράς (MJ)	0,0292	0,0642	0,466
TEST 5 – SC-B-B	CO ₂ Μεταφοράς (kg)	0,00210	0,00462	0,0335

Συγκεντρωτικά φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

Πίνακας 106: Συγκριτική ανάλυση της απόστασης μεταφοράς Alcohol Wipes - Test, Σύνθεση, 150 km Energy (MJ)

Test	Σύνθεση	150 km Energy (MJ)	330 km Energy (MJ)	2.395 km Energy (MJ)	150 km CO ₂ (kg)	330 km CO ₂ (kg)	2.395 km CO ₂ (kg)
Test 1	Banana / B / B	0,623	0,676	1,08	0,0486	0,0525	0,0814
Test 2	Flax / F / F	3,19	3,23	3,63	0,132	0,135	0,164
Test 3	Sugarcane / SC / SC	1,94	1,98	2,38	0,189	0,192	0,221
Test 4	Banana / SC / SC	0,717	0,752	1,15	0,0581	0,0606	0,0895
Test 5	SC / B / B	1,87	1,90	2,30	0,181	0,184	0,213

Η αύξηση της απόστασης από 150 km σε 2.395 km αυξάνει αισθητά τόσο την κατανάλωση ενέργειας όσο και τις εκπομπές CO₂ σε όλα τα tests. Η επίδραση αυτή είναι πιο έντονη αναλογικά στα

Tests με χαμηλό αρχικό αποτύπωμα, όπως τα Test 1 και Test 4, όπου η μεταφορά φτάνει να αποτελεί πολύ σημαντικό ποσοστό του συνολικού αποτελέσματος στα 2.395 km. Αντίθετα, στο Test 2 η επίδραση της μεταφοράς είναι μικρότερη σε σχετικούς όρους, επειδή το αποτύπωμα του υλικού είναι ήδη υψηλό. Συνεπώς, τα αποτελέσματα δείχνουν ότι για τη μείωση του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος είναι σημαντικοί τόσο η σωστή επιλογή υλικού όσο και ο περιορισμός των αποστάσεων μεταφοράς.

7 Συζήτηση-Συμπέρασμα

7.1 Συμπεράσματα για τη μάσκα FFP2

Η συνολική αξιολόγηση των διαφορετικών σεναρίων της μάσκας FFP2 αποδεικνύει ότι η επιλογή και η ποσότητα των πρώτων υλών αποτελούν τους σημαντικότερους παράγοντες που καθορίζουν την ενεργειακή κατανάλωση και το ανθρακικό αποτύπωμα του προϊόντος. Στα σενάρια που εξετάστηκαν, η φάση των υλικών αποτελεί στις περισσότερες περιπτώσεις την κυρίαρχη περιβαλλοντική συνιστώσα, γεγονός που υποδεικνύει ότι η βελτιστοποίηση της σύνθεσης της μάσκας μπορεί να επιφέρει μεγαλύτερη περιβαλλοντική βελτίωση από μεταβολές σε δευτερεύοντα στάδια του κύκλου ζωής.

Από τη σύγκριση των φυσικών ινών προκύπτει ότι το Banana fiber παρουσιάζει στα συγκεκριμένα μοντέλα τις χαμηλότερες τιμές τόσο ως προς την κατανάλωση ενέργειας όσο και ως προς τις εκπομπές CO₂, ενώ η ενσωμάτωση Kenaf αυξάνει σημαντικά το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Σχετικά με το Test 1 προκύπτει ότι η σύνθεση των κύριων στρώσεων επηρεάζει σημαντικά το περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Η σύνθεση με Banana παρουσιάζει τις χαμηλότερες τιμές Energy και CO₂, ενώ η παρουσία Kenaf αυξάνει σημαντικά την επιβάρυνση. Η FFP2-BFK, η οποία περιλαμβάνει Banana, Flax και Kenaf, παρουσίασε τη μεγαλύτερη περιβαλλοντική επιβάρυνση, με συνολική Energy 0,268 MJ και εκπομπές 0,00339 kg CO₂. Ιδιαίτερα σημαντική ήταν η συμμετοχή του Kenaf, το οποίο, παρότι αντιστοιχούσε μόλις σε 0,98 g ή περίπου 17,5% της συνολικής μάζας, ευθυνόταν για περίπου 64,3% της ενεργειακής επιβάρυνσης και 41,9% των εκπομπών CO₂ του material stage. Το αποτέλεσμα αυτό καταδεικνύει ότι η επίδραση ενός υλικού δεν είναι απαραίτητα ανάλογη της μάζας του.

Χαρακτηριστικά, στο Test 2 η σύνθεση FFP2-B-SC παρουσιάζει συνολική ενεργειακή κατανάλωση 0,082 MJ και ανθρακικό αποτύπωμα 0,00169 kg CO₂, έναντι 0,269 MJ και 0,00346 kg CO₂ για την FFP2-BFK-SC. Η μετάβαση από BFK-SC σε B-SC μειώνει την Energy κατά περίπου 69,5% και το CO₂ κατά περίπου 51,2%. Στο Test 2, η προσθήκη συσκευασίας από Sugarcane προκαλεί μόνο μικρή αύξηση στο συνολικό αποτύπωμα και δεν αλλάζει την κατάταξη των συνθέσεων. Επομένως, η συσκευασία έχει μικρότερη επίδραση από τα κύρια υλικά της μάσκας.

Ενώ στο Test 3, η χρήση Sugarcane στις κύριες στρώσεις δείχνει ότι Energy και CO₂ δεν οδηγούν πάντα στην ίδια κατάταξη. Η BSC έχει τη χαμηλότερη Energy, ενώ η BFSC το χαμηλότερο CO₂, γεγονός που δείχνει ότι απαιτείται αξιολόγηση με περισσότερους από έναν περιβαλλοντικούς δείκτες. Η σύνθεση BFSC-BagSC παρουσίασε Energy 0,100 MJ και CO₂ 2,98 g, η BSC-BagSC 0,0959 MJ και 3,19 g CO₂, ενώ η SC-BagSC παρουσίασε 0,105 MJ και 4,18 g CO₂. Συγκεκριμένα, το SC παρουσιάζει περίπου 40,3% υψηλότερες εκπομπές CO₂ από το BFSC, παρότι η Energy είναι μόνο

περίπου 5,0% υψηλότερη. Το αποτέλεσμα αυτό δείχνει ότι η αύξηση της συμμετοχής του Sugarcane επηρεάζει περισσότερο το ανθρακικό αποτύπωμα παρά την ενεργειακή κατανάλωση.

Στο Test 4, όλα τα στοιχεία της μάσκας αποτελούνται από ένα μόνο υλικό, το Banana εμφανίζει τις χαμηλότερες τιμές τόσο σε Energy όσο και σε CO₂. Το Flax παρουσιάζει υψηλότερη ενεργειακή απαίτηση, ενώ το Sugarcane υψηλότερες εκπομπές CO₂. Το Banana παρουσίασε συνολική Energy μόλις 0,0133 MJ και συνολικό CO₂ 1,04 g. Αντίθετα, το Flax παρουσίασε 0,0664 MJ και 2,74 g CO₂, ενώ το Sugarcane 0,0404 MJ και 3,94 g CO₂. Παράλληλα, αναδεικνύει ότι η Energy και το CO₂ δεν ακολουθούν πάντοτε την ίδια τάση. Το Flax εμφανίζει μεγαλύτερη ενεργειακή κατανάλωση από το Sugarcane, αλλά το Sugarcane παρουσιάζει μεγαλύτερες εκπομπές CO₂. Ως εκ τούτου, η περιβαλλοντική αξιολόγηση δεν πρέπει να στηρίζεται αποκλειστικά σε έναν δείκτη, αλλά να λαμβάνει υπόψη ταυτόχρονα τόσο την ενεργειακή απαίτηση όσο και το ανθρακικό αποτύπωμα.

Ιδιαίτερα σημαντικό είναι επίσης το στάδιο του End-of-Life. Στα σενάρια PET, η επιλογή διαφορετικής στρατηγικής διαχείρισης μετά τη χρήση προκαλεί σημαντικά μεγαλύτερες μεταβολές από εκείνες που προκαλεί η μεταφορά. Για την ίδια περίπου ποσότητα PET, η καθαρή ενεργειακή απαίτηση κυμαίνεται από 0,114 MJ στην περίπτωση Reuse έως 0,528 MJ στην περίπτωση Landfill, ενώ οι αντίστοιχες εκπομπές κυμαίνονται από 8,50 g έως 23,8 g CO₂. Επομένως, στρατηγικές όπως η επαναχρησιμοποίηση και το re-manufacturing μπορούν, στο συγκεκριμένο μοντέλο, να μειώσουν σημαντικά το καθαρό περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σχέση με τη διάθεση σε landfill.

Η αύξηση της μεταφορικής απόστασης από 150 km σε 2.395 km επιβαρύνει το αποτέλεσμα, ιδιαίτερα ως προς τις εκπομπές CO₂, χωρίς όμως στις περισσότερες περιπτώσεις να μεταβάλλει την περιβαλλοντική κατάταξη των υλικών. Η μεταβολή από 150 km σε 330 km είναι σχετικά περιορισμένη, ενώ η μεγαλύτερη απόσταση οδηγεί σε σαφέστερη αύξηση της επιβάρυνσης. Συνεπώς, για τη μάσκα FFP2 η περιβαλλοντική βελτιστοποίηση πρέπει να εστιάζει πρωτίστως στην επιλογή υλικού και στη στρατηγική End-of-Life και, συμπληρωματικά, στη μείωση περιττών υλικών, συσκευασιών και μεταφορικών αποστάσεων.

7.2 Συμπεράσματα για τη χειρουργική μάσκα

Αντίστοιχη εικόνα προκύπτει από την ανάλυση της χειρουργικής μάσκας. Η σύγκριση των διαφορετικών συνθέσεων καταδεικνύει ότι το συνολικό βάρος του προϊόντος από μόνο του δεν αποτελεί επαρκή παράγοντα για την εκτίμηση της περιβαλλοντικής επίδοσης, καθώς μάσκες παρόμοιας μάζας εμφανίζουν σημαντικά διαφορετικά αποτελέσματα ανάλογα με τη σύνθεση των υλικών. Στο Test 1, η SFM-B παρουσιάζει συνολική ενεργειακή κατανάλωση 0,0763 MJ και 0,00124

kg CO₂, ενώ η SFM-BFK φτάνει τα 0,245 MJ και 0,00264 kg CO₂. Η αντικατάσταση επομένως των στρώσεων Flax και κυρίως Kenaf από Banana μειώνει αισθητά και τους δύο περιβαλλοντικούς δείκτες.

Η επίδραση της πρόσθετης συσκευασίας είναι και εδώ περιορισμένη. Η προσθήκη Sugarcane bag μάζας 0,10 g αυξάνει ελαφρά το συνολικό αποτέλεσμα, χωρίς όμως να μεταβάλλει τη βασική περιβαλλοντική κατάταξη των κύριων συνθέσεων. Το γεγονός αυτό επιβεβαιώνει ότι οι κύριες στρώσεις της μάσκας έχουν μεγαλύτερη σημασία από τη συσκευασία, λόγω τόσο της μεγαλύτερης μάζας τους όσο και των διαφορετικών επιβαρύνσεων που συνδέονται με κάθε πρώτη ύλη.

Η σύγκριση των Sugarcane σεναρίων αναδεικνύει ένα ακόμη σημαντικό συμπέρασμα: η ενεργειακή κατανάλωση και οι εκπομπές CO₂ δεν οδηγούν πάντοτε στην ίδια κατάταξη. Στο Test 3 η SFM-BSC-BagSC παρουσιάζει τη χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση, ενώ η SFM-BFSC-BagSC εμφανίζει χαμηλότερες εκπομπές CO₂. Επομένως, η περιβαλλοντική αξιολόγηση δεν πρέπει να πραγματοποιείται με βάση έναν μόνο δείκτη, αλλά να λαμβάνει ταυτόχρονα υπόψη τόσο την Energy όσο και το CO₂.

Το Test 4 ενισχύει ακόμη περισσότερο τη θετική εικόνα του Banana fiber στα συγκεκριμένα δεδομένα. Όταν όλα τα στοιχεία της χειρουργικής μάσκας κατασκευάζονται από Banana, η συνολική ενεργειακή κατανάλωση περιορίζεται σε μόλις 0,00840 MJ και το ανθρακικό αποτύπωμα σε 0,000654 kg CO₂, χαμηλότερα από τις αντίστοιχες περιπτώσεις Flax και Sugarcane.

Τέλος, η μελέτη της PET χειρουργικής μάσκας επιβεβαιώνει τη μεγάλη σημασία του End-of-Life. Με σχεδόν σταθερή σύνθεση και μάζα, το Reuse οδηγεί σε καθαρό αποτέλεσμα περίπου 0,071 MJ και 0,00539 kg CO₂, το Re-manufacture σε 0,082 MJ και 0,00615 kg CO₂, ενώ το Landfill οδηγεί σε 0,332 MJ και 0,0150 kg CO₂. Η διαφορά αυτή καταδεικνύει ότι η στρατηγική διαχείρισης μετά τη χρήση μπορεί να επηρεάσει το τελικό αποτέλεσμα πολύ περισσότερο από μικρές αλλαγές στη μάζα της συσκευασίας.

Η συνολική σύγκριση των Tests δείχνει ότι η υλική σύνθεση αποτελεί τον κυριότερο παράγοντα διαφοροποίησης του περιβαλλοντικού αποτυπώματος των Surgical Face Masks. Στα Tests 1 και 2, η σταδιακή μετάβαση από τη σύνθετη δομή BFK προς απλούστερες συνθέσεις BF και Banana οδηγεί σε σημαντική μείωση τόσο της Energy όσο και του CO₂. Το Banana παρουσιάζει γενικά τις χαμηλότερες τιμές, γεγονός που επιβεβαιώνεται και από την απομονωμένη αξιολόγηση του Test 4.

Το Test 3 δείχνει ότι η αυξανόμενη συμμετοχή Sugarcane μπορεί να έχει σχετικά μικρή επίδραση στην Energy αλλά σαφώς μεγαλύτερη επίδραση στις εκπομπές CO₂. Το ίδιο συμπέρασμα ενισχύεται

από το Test 4, όπου το Sugarcane παρουσιάζει χαμηλότερη ενεργειακή απαίτηση από το Flax, αλλά υψηλότερες εκπομπές CO₂.

Συνεπώς, η Energy και το CO₂ δεν παρουσιάζουν πάντοτε την ίδια τάση, και για τον λόγο αυτό η αξιολόγηση των υλικών πρέπει να πραγματοποιείται ξεχωριστά για κάθε περιβαλλοντικό δείκτη. Η σύγκριση με το Test 5 αναδεικνύει επίσης ότι τα σενάρια PET εμφανίζουν σημαντικά μεγαλύτερο περιβαλλοντικό φορτίο κατά τον πρώτο κύκλο ζωής σε σχέση με τις περισσότερες εξεταζόμενες συνθέσεις φυσικών υλικών.

Συνολικά, τα αποτελέσματα καταδεικνύουν ότι η επιλογή των πρώτων υλών μπορεί να επηρεάσει σημαντικά περισσότερο το περιβαλλοντικό αποτύπωμα από άλλες παραμέτρους του συστήματος. Η απλούστευση της σύνθεσης και η αυξημένη χρήση υλικών με χαμηλότερο ενεργειακό και ανθρακικό φορτίο μπορούν συνεπώς να αποτελέσουν βασικούς άξονες για τη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων των Surgical Face Masks.

7.3 Συμπεράσματα για τα Alcohol Wipes

Στην περίπτωση των αντισηπτικών μαντηλιών, τα αποτελέσματα παρουσιάζουν ακόμη πιο έντονα τη σημασία της πρώτης ύλης, κυρίως λόγω της σημαντικά μεγαλύτερης συνολικής μάζας των wipes σε σχέση με τη συσκευασία και το cap. Στα εξεταζόμενα σενάρια, τα 60 wipes αντιστοιχούν σε περίπου 0,26 kg από τη συνολική μάζα των περίπου 0,27 kg. Ως αποτέλεσμα, το υλικό των ίδιων των wipes καθορίζει σε πολύ μεγαλύτερο βαθμό το τελικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα σε σχέση με το υλικό της συσκευασίας.

Το σενάριο στο οποίο wipes, package και cap κατασκευάζονται από Banana εμφανίζει τη χαμηλότερη συνολική κατανάλωση ενέργειας, ίση με 0,623 MJ, και το χαμηλότερο ανθρακικό αποτύπωμα, ίσο με 0,0486 kg CO₂. Αντίθετα, το Flax παρουσιάζει τη μεγαλύτερη ενεργειακή απαίτηση, με 3,19 MJ, δηλαδή περίπου 5,1 φορές μεγαλύτερη από την περίπτωση Banana. Το Sugarcane παρουσιάζει χαμηλότερη ενεργειακή κατανάλωση από το Flax, αλλά υψηλότερες εκπομπές CO₂, επιβεβαιώνοντας και σε αυτή την κατηγορία προϊόντος ότι Energy και CO₂ πρέπει να αξιολογούνται παράλληλα.

Ιδιαίτερα χαρακτηριστική είναι η σύγκριση των Tests 4 και 5. Όταν τα wipes είναι Banana και μόνο το package και το cap κατασκευάζονται από Sugarcane, η συνολική Energy είναι 0,717 MJ και το CO₂ 0,0581 kg. Όταν πραγματοποιείται η αντίστροφη αλλαγή, με Sugarcane στα wipes και Banana σε package και cap, οι τιμές αυξάνονται σε 1,87 MJ και 0,181 kg CO₂. Συνεπώς επιβεβαιώνουν ότι η

αλλαγή του υλικού της συσκευασίας έχει σαφώς μικρότερη επίδραση από την αλλαγή του υλικού των wipes. Επομένως, εφόσον στόχος είναι η μείωση του συνολικού περιβαλλοντικού αποτυπώματος, η μεγαλύτερη επίδραση επιτυγχάνεται μέσω της επιλογής του κυρίως υλικού των wipes, και δευτερευόντως μέσω package και cap.

Στα σενάρια Flax και Sugarcane, το Material stage αντιπροσωπεύει πάνω από το 90% της ενεργειακής ή/και ανθρακικής επιβάρυνσης. Στα Banana-based σενάρια, επειδή το αρχικό αποτύπωμα του υλικού είναι σημαντικά χαμηλότερο, το Disposal αποκτά μεγαλύτερη σχετική συμμετοχή και μπορεί να φτάσει περίπου το 19–21% του συνολικού αποτελέσματος. Το συγκεκριμένο εύρημα δείχνει ότι όσο περισσότερο βελτιστοποιείται η πρώτη ύλη, τόσο μεγαλύτερη σχετική σημασία αποκτούν τα υπόλοιπα στάδια του κύκλου ζωής.

Τα βασικά αποτελέσματα δείχνουν ότι η επιλογή της πρώτης ύλης των wipes είναι ο σημαντικότερος παράγοντας για το συνολικό περιβαλλοντικό αποτύπωμα. Το Banana fiber παρουσιάζει τις χαμηλότερες τιμές τόσο σε Energy όσο και σε CO₂, ενώ το Flax χαρακτηρίζεται από πολύ υψηλή ενεργειακή απαίτηση. Το Sugarcane βρίσκεται ενδιάμεσα ως προς την Energy, αλλά παρουσιάζει τις υψηλότερες εκπομπές CO₂.

7.4 Συνολικό συμπέρασμα

Συνολικά, η συγκριτική αξιολόγηση των FFP2, Surgical Face Masks και Alcohol Wipes οδηγεί σε ένα κοινό συμπέρασμα: η περιβαλλοντική επίδοση των προϊόντων δεν εξαρτάται μόνο από το αν ένα υλικό χαρακτηρίζεται ως φυσικό, βιοαποικοδομήσιμο ή ανακυκλώσιμο, αλλά από το αποτύπωμα που δημιουργεί στο εξεταζόμενο σύστημα κύκλου ζωής. Με βάση τις συγκεκριμένες παραδοχές του Eco Audit, το Banana παρουσιάζει την ευνοϊκότερη περιβαλλοντική επίδοση μεταξύ των φυσικών υλικών που συγκρίθηκαν, καθώς εμφανίζει τις χαμηλότερες τιμές Energy και CO₂ στα αντίστοιχα σενάρια. Το εύρημα αυτό δεν πρέπει να γενικεύεται ως απόδειξη ότι το Banana είναι συνολικά το «καλύτερο» υλικό για πραγματική μάσκα ή υγειονομικό προϊόν: απαιτείται παράλληλη αξιολόγηση της απόδοσης διήθησης, της αναπνευστικής αντίστασης, της μηχανικής αντοχής, της ασφάλειας, της διάρκειας ζωής και της συμμόρφωσης με τα σχετικά πρότυπα.

Εξίσου σημαντική είναι η επιλογή της στρατηγικής τέλους ζωής. Τα αποτελέσματα των PET σεναρίων τόσο για την FFP2 όσο και για τη χειρουργική μάσκα δείχνουν ότι η Reuse και η Re-manufacture μπορούν να περιορίσουν σημαντικά το καθαρό περιβαλλοντικό αποτέλεσμα σε σύγκριση με το Landfill. Κατά συνέπεια, η αποτελεσματικότερη προσέγγιση δεν βασίζεται σε μία μεμονωμένη αλλαγή, αλλά στον συνδυασμό κατάλληλης επιλογής πρώτων υλών, περιορισμού της περιττής

συσκευασίας, βελτιστοποίησης των μεταφορών και εφαρμογής στρατηγικών κυκλικής οικονομίας στο τέλος ζωής του προϊόντος.

8 Βιβλιογραφία

- U.S. Energy Information Administration (EIA). (2013, July 25). World energy use to rise by 56 percent, driven by growth in the developing world. International Energy Outlook 2013. <https://www.eia.gov/pressroom/releases/press395.php>
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2012). OECD Environmental Outlook to 2050: The Consequences of Inaction. OECD Publishing. <https://doi.org/10.1787/9789264122246-en>
- Ritika Rana, Dr. Ankush Sharma, Dr. Sapna Devi, Dr. Rajesh Kumar and Saryu Sharma Impact of the Municipal Dumping Yard on Soil and Water Quality: A Review, Volume 13, Issue 1, (2025), European Journal of Biotechnology and Bioscience, 13(1), 33–38
- European Commission. (2008). Directive 2008/98/EC on waste.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., & Vigil, S. (1993). Integrated solid waste management. McGraw-Hill.
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2015). Global waste management outlook.
- Wang, L. K., Hung, Y. T., & Shammass, N. K. (2009). Handbook of environmental engineering: Industrial and hazardous wastes treatment. Humana Press.
- Alloway, B. J. (2013). Heavy metals in soils: Trace metals and metalloids in soils and their bioavailability (3rd ed.). Springer.
- Αθανάσιος Βαλαβανίδης, Θωμάς Βλαχογιάννη (2015) Αστικά Στερεά Απόβλητα και Ρύπανση του Περιβάλλοντος Τάσεις στη Διαχείριση των Αστικών Στερεών Αποβλήτων στις Ευρωπαϊκές Χώρες και στην Ελλάδα Τμήμα Χημείας, Πανεπιστήμιο Αθηνών.
- Κούγκολος Α., (2007), «Εισαγωγή στην Περιβαλλοντική Μηχανική», Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη.
- Fu, F., & Wang, Q. (2011). Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. Journal of Environmental Management, 92(3), 407–418.
- Tchounwou, P. B., Yedjou, C. G., Patlolla, A. K., & Sutton, D. J. (2012). Heavy metal toxicity and the environment. EXS, 101, 133–164.
- Frias, J. P. G. L., & Nash, R. (2019). Microplastics: Finding a consensus on the definition. Marine Pollution Bulletin, 138, 145–147. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.022>
- Cole, M., Lindeque, P., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2011). Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. Marine Pollution Bulletin, 62(12), 2588–2597. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>
- Fadare, O. O., & Okoffo, E. D. (2020). Covid-19 face masks: A potential source of microplastic fibers in the environment. Science of the Total Environment, 737, 140279. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140279>

- Aragaw, T. A. (2020). Surgical face masks as a potential source for microplastic pollution in the COVID-19 scenario. *Marine Pollution Bulletin*, 159, 111517. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111517>
- Wang, Z., An, C., Chen, X., Lee, K., Zhang, B., & Feng, Q. (2021). Disposable masks release microplastics to the aqueous environment with exacerbation by natural weathering. *Journal of Hazardous Materials*, 417, 126036. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126036>
- Wang, P. L., Roschli, A., Paranthaman, M. P., Theodore, M., Cramer, C. L., Zangmeister, C., Zhang, Y., Urban, J. J., & Love, L. (2021). Recent developments in filtration media and respirator technology in response to COVID-19. *MRS Bulletin*, 46(9), 822–831. <https://doi.org/10.1557/s43577-021-00173-6>
- Biology Insights. (2025, July 25). Primary and secondary microplastics: What are they? Primary and Secondary Microplastics: What Are They?
- Biology Insights. (2026). How long does polypropylene take to decompose? <https://biologyinsights.com/how-long-does-polypropylene-take-to-decompose/>
- Memon, H., Liao, S., Maryam, R., Patrucco, A., & Riccardi, C. (2024). Development of medical masks: Performance, properties, and prospects. *Materials Advances*, 5, 8333–8350. <https://doi.org/10.1039/D4MA00129J>
- Chen, X., Chen, X., Liu, Q., Zhao, Q., Xiong, X., & Wu, C. (2021). Used disposable face masks are significant sources of microplastics to environment. *Environmental Pollution*, 285, 117485.
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2022). Single-use face masks and their alternatives: Recommendations from life cycle assessments.
- Kaynak, E., Piri, I. S., & Das, O. (2025). Revisiting the basics of life cycle assessment and lifecycle thinking. *Sustainability*, 17(16), 7444. <https://doi.org/10.3390/su17167444>
- TDD Global. (2026). Polypropylene guide: Properties, production, applications & industry trends.
- SpecialChem. (2026). Polypropylene (PP): Structure, types and applications.
- Hossain, M. T., Shahid, M. A., Mahmud, N., Habib, A., Rana, M. M., Khan, S. A., & Hossain, M. D. (2024). Research and application of polypropylene: A review. *Discover Nano*, 19(1), Article 2. <https://doi.org/10.1186/s11671-023-03952-z>
- Business Analytiq. (2026). Polypropylene price index June 2026 and outlook.
- García-López, E. I., Aoun, N., & Marci, G. (2024). An overview of the sustainable depolymerization/degradation of polypropylene microplastics by advanced oxidation technologies. *Molecules*, 29(12), 2816. <https://doi.org/10.3390/molecules29122816>
- Lexie Corner, AZoM. (2025). What are the properties of aluminum? Retrieved from <https://www.azom.com>
- StatRanker. (2025). Top 10 aluminum producing countries in 2025: Global production insights. Retrieved from <https://statranker.org>

- Alumeco Group. (2026). Aluminium prices. <https://www.alumeco.com/metal-prices/aluminium/>
- Sun, Y. (2023). The use of aluminum alloys in structures: Review and outlook. *Structures*, 57, 105290.
- Silveira, N. C. G., Martins, M. L. F., Bezerra, A. C. S., & Araújo, F. G. S. (2021). Red Mud from the Aluminium Industry: Production, Characteristics, and Alternative Applications in Construction Materials—A Review. *Sustainability*, 13(22), 12741. <https://doi.org/10.3390/su132212741>
- Zore, L. (2024). Decarbonisation Options for the Aluminium Industry. Joint Research Centre, European Commission. <https://doi.org/10.2760/880>
- European Aluminium. (2018). Aluminium recycling in Europe: The road to high quality products. Brussels, Belgium: European Aluminium.
- Qasim Siddiqui (2026) Banana Fibre Fabrics: Origin, Production & Textile Uses <https://www.naturalfibercompany.com/blogs/banana-fiber-sustainable-textiles/banana-fibre-fabrics-critical-review>
- Fan, Y. (2023). Study on Preparation and Application of Banana Fiber-Based Composites. *Journal of Physics: Conference Series*, 2539, 012093. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2539/1/012093>
- Samanta, K. K., & Chattopadhyay, S. N. (2022). Properties, Processing and Application of Banana Fibre. *International Journal of Bioresource Science*, 9(2), 173–178.
- Akhila, B. S., Manju, P. R., & Simi, S. (2025). A Comprehensive Review on Banana Fibre: Extraction, Degumming and Applications Across Industrial Sectors. *International Journal of Advanced Biochemistry Research*, 9(7), 1359–1367.
- Singh, S., Naik, N., Sooriyaperakasam, N., et al. (2022). A Comprehensive Review of Banana Fiber-Reinforced Composites: Properties, Processing and Applications. *Journal of Computers, Mechanical and Management*, 1(2), 22–33.
- Singh, P., & Bala, Y. G. (2022). Physical and Mechanical Properties of Flax Fiber and its Composites. *Journal of Material Sciences and Engineering*, 11(3). [hilarispublisher.com]
- Carl Johansson (2024) Understanding and Mitigating the Carbon Footprint of Banana Fiber
- Cristobal, J. P. (2024). Development and acceptability of banana (Esp. Damilig–Musa acuminata) fiber as alternative source of natural fabric. *International Journal of Innovative Research in Multidisciplinary Education*, 3(5). <https://doi.org/10.58806/ijirme.2024.v3i5n20>
- Benyathiar, P., Kumar, P., Carpenter, G., Brace, J., & Mishra, D. K. (2022). Polyethylene terephthalate (PET) bottle-to-bottle recycling for the beverage industry: A review. *Polymers*, 14(12), 2366. <https://doi.org/10.3390/polym14122366>
- Sarda, P., Hanan, J. C., Lawrence, J. G., & Allahkarami, M. (2022). Sustainability performance of polyethylene terephthalate: Clarifying challenges and opportunities. *Journal of Polymer Science*, 60(4), 598–614. <https://doi.org/10.1002/pol.20210495>

- Guo, Z., Wu, J., & Wang, J. (2025). Chemical degradation and recycling of polyethylene terephthalate (PET): A review. *RSC Sustainability*, 3, 2111–2133. <https://doi.org/10.1039/D4SU00658E>
- Sousa, A. F., Patrício, R., Terzopoulou, Z., Bikiaris, D. N., Stern, T., Wenger, J., Loos, K., Lotti, N., Siracusa, V., Szymczyk, A., Paszkiewicz, S., Triantafyllidis, K. S., Zamboulis, A., Nikolic, M. S., Spasojevic, P., Thiagarajan, S., van Es, D. S., & Guigo, N. (2021). Recommendations for replacing PET on packaging, fiber, and film materials with biobased counterparts. *Green Chemistry*, 23(22), 8795–8820. <https://doi.org/10.1039/D1GC02082J>
- Wojnowska-Baryła, I., Kulikowska, D., & Bernat, K. (2020). Effect of bio-based products on waste management. *Sustainability*, 12(5), 2088. <https://doi.org/10.3390/su12052088>
- Mahmud, M. A., & Anannya, F. R. (2021). Sugarcane bagasse – A source of cellulosic fiber for diverse applications. *Heliyon*, 7(8), e07771. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07771>
- Sakura, R. R., Sugiharto, B., Sawitri, W. D., et al. (2025). Mechanical and structural properties of biocomposites reinforced with bagasse fibers from sugarcane. *Journal of Composites Science*, 9(9), 503.
- Devadiga, D. G., Bhat, K. S., & Mahesha, G. T. (2020). Sugarcane bagasse fiber reinforced composites: Recent advances and applications. *Cogent Engineering*, 7(1), 1823159. <https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1823159>
- A L Fong, N A N Khandoker and S Debnath (2018) Development and characterization of sugarcane bagasse fiber and nano-silica reinforced epoxy hybrid composites *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 344 01202
- Ndikumana, S., Tanane, O., Aichi, Y., Latifa, E. F., & Goudali, L. (2025). Innovative applications of sugarcane bagasse in the global sugarcane industry. *Processes*, 13(12), 3796.
- Faruk, O., Bledzki, A. K., Fink, H. P., & Sain, M. (2012). Biocomposites reinforced with natural fibers: 2000–2010. *Progress in Polymer Science*, 37(11), 1552–1596. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2012.04.003>
- Pickering, K. L., Aruan Efendy, M. G., & Le, T. M. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 83, 98–112. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.038>
- Goudenhoofft, C., Bourmaud, A., & Baley, C. (2019). Flax (*Linum usitatissimum* L.) Fibers for Composite Reinforcement: Exploring the Link Between Plant Growth, Cell Walls Development and Fiber Properties. *Frontiers in Plant Science*, 10, 411.
- Ricker, M., Kuhn, S., Feiri, T., Zecherle, K., Binde, J., & Winkelmann, J. (2024). Tensile load-bearing behaviour of concrete components reinforced with flax fibre textiles. *Materials*, 17(6), 1313. <https://doi.org/10.3390/ma17061313>
- Upadhyay, S., & Mehta, N. (2019). Flax: Properties and Uses: A Review. *International Journal of Chemical Studies*, 7(3), 1277–1279.

- Vaishnavi, A., & Krishnaveni, V. (2022). A review: Studies on jute properties, characteristics and application in textile industry. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 3(10), 689–692.
- Ashraf, M. A., Zwawi, M., Mehran, M. T., Kanthasamy, R., & Bahadar, A. (2019). Jute based bio and hybrid composites and their applications. *Fibers*, 7(9), 77. <https://doi.org/10.3390/fib7090077>
- Iqbal, R. M., Ahammad, R., Arifuzzaman, M., Islam, M. S., & Islam, M. M. (2025). Manufacturing and properties of jute fiber-reinforced polymer composites—A comprehensive review. *Materials*, 18(5), 1016. <https://doi.org/10.3390/ma18051016>
- Moulya, H. V. (2026). Green revolution in polymer composites: Performance and degradability of natural fiber reinforced biopolymers. *Journal of Engineering and Applied Science*, 73(1). <https://doi.org/10.1186/s44147-026-00917-8>
- Rahman, M. M., Hoque, M. B., Ahmed, F., Ahmed, E., Faisal, M. A. H., Hasan, T., Baria, B., Das, D., Sheikh, M. S., & Khan, R. A. (2025). Unlocking the potential of jute: A comprehensive review of its innovative applications in composite materials. *Journal of Engineering Advancements*, 6(2), 48–67.
- Gil, H., Jaramillo Alvarez, C., & Zuleta, A. A. (2024). Environmental impacts of jute fiber-reinforced mortars. *The Open Civil Engineering Journal*, 18, e18741495347662. <https://doi.org/10.2174/0118741495347662240927104145>
- Shahinur, S., Sayeed, M. M. A., Hasan, M., Sayem, A. S. M., Haider, J., & Ura, S. (2022). Current development and future perspective on natural jute fibers and their biocomposites. *Polymers*, 14(7), 1445. <https://doi.org/10.3390/polym14071445>
- Kreimeyer, M., Stölzle, M. G., & Dausch, V. (2025). Product life cycle. In F. P. García Márquez (Ed.), *Product Lifecycle Management*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1007497>
- International Organization for Standardization (ISO). (2006). ISO 14040: Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework. ISO.
- Yadav, Y. S. (2016). A study of product life cycle. *IOSR Journal of Business and Management*, 18(2), 87–89.
- Braungart, M., McDonough, W., & Bollinger, A. (2007). Cradle-to-cradle design: Creating healthy emissions—A strategy for eco-effective product and system design. *Journal of Cleaner Production*, 15(13–14), 1337–1348. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.08.003>
- Bocken, N. M. P., de Pauw, I., Bakker, C., & van der Grinten, B. (2016). Product design and business model strategies for a circular economy. *Journal of Industrial and Production Engineering*, 33(5), 308–320. <https://doi.org/10.1080/21681015.2016.1172124>
- Jones, R. M., & Rempel, D. (2021). Standards for surgical respirators and masks: Relevance for protecting healthcare workers and the public during pandemics. *Annals of Work Exposures and Health*, 65(5), 495–504. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxab008>

- Xu, J., Xiao, X., Zhang, W., Xu, R., Kim, S. C., Cui, Y., Howard, T. T., Wu, E., & Cui, Y. (2020). Air-filtering masks for respiratory protection from PM2.5 and pandemic pathogens. *One Earth*, 3(5), 574–589. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.10.014>
- Rahman, M. Z., Hoque, M. E., Alam, M. R., Rouf, M. A., Khan, S. I., Xu, H., & Ramakrishna, S. (2022). Face masks to combat coronavirus (COVID-19)—Processing, roles, requirements, efficacy, risk and sustainability. *Polymers*, 14(7), 1296. <https://doi.org/10.3390/polym14071296>
- Maiwald, M., & Chan, E. S. Y. (2012). The forgotten role of alcohol: A systematic review and meta-analysis of the clinical efficacy and perceived role of chlorhexidine in skin antisepsis. *PLoS ONE*, 7(9), e44277. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0044277>
- Song, X., Vossebein, L., & Zille, A. (2019). Efficacy of disinfectant-impregnated wipes used for surface disinfection in hospitals: A review. *Antimicrobial Resistance & Infection Control*, 8, 139. <https://doi.org/10.1186/s13756-019-0595-2>
- Fang, Z., Wang, J., Xie, S., Lian, Z., Luo, Z., Du, Y., & Zhang, X. (2025). Advancements in Research and Applications of PP-Based Materials Utilizing Melt-Blown Nonwoven Technology. *Polymers*, 17(8), 1013. <https://doi.org/10.3390/polym17081013>
- Anenea, D. I., Beltran, M., Tjahjono, B., Schultz, A., McKenzie, M., & Stevanovic, S. (2025). Microplastics and chemical additives from disposable face masks: Environmental, human health and behavioural impacts. *Science of the Total Environment*.
- Bovée, P. (2024, August 28). Why is polypropylene (PP) so difficult to recycle? Cleantech Group. <https://cleantech.com/why-is-polypropylene-pp-so-difficult-to-recycle/>
- Tilcon A.E. (2026). Αλουμίνιο: Από πού προέρχεται και πώς κατασκευάζεται. <https://tilcon.gr>
- Ελληνική Ένωση Αλουμινίου. (2026). Αλουμίνιο & χρήσεις. <https://aluminium.org.gr>
- Nurcahyani, P. R., Sianturi, R., Sutan, S. M., Hawa, L. C. H., Azizatul Karimah, Bakhsi, M. I., Kemala, P., Prianto, A. H., Lee, S. H., Iswanto, A. H., Antov, P., and Fatriasari, W. (2026). "Structural, chemical, and morphological evaluation of banana pseudostem fibers for biobased composite development," *BioResources* 21(1), 2351–2384
- Boyce, J. M. (2019). Best products for skin antisepsis. *American Journal of Infection Control*, 47, A17–A22. <https://doi.org/10.1016/j.ajic.2019.03.012>
- European Committee for Standardization. (2009). EN 149:2001+A1:2009: Respiratory protective devices—Filtering half masks to protect against particles—Requirements, testing, marking. CEN.
- European Committee for Standardization. (2019). EN 14683:2019+AC:2019: Medical face masks—Requirements and test methods. CEN.

- European Parliament & Council of the European Union. (2016). Regulation (EU) 2016/425 of the European Parliament and of the Council of 9 March 2016 on personal protective equipment. Official Journal of the European Union, L 81, 51–98.
- Ó Briain, O., Marques Mendes, A. R., McCarron, S., Healy, M. G., & Morrison, L. (2020). The role of wet wipes and sanitary towels as a source of white microplastic fibres in the marine environment. *Water Research*, 182, 116021. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116021>
- Zhong, W., An, H., Shen, L., Fang, W., Gao, X., & Dong, D. (2017). The roles of countries in the international fossil fuel trade: An energy and network analysis. *Energy Policy*, 100, 365–376. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.07.025>
- Mohr, S. H., Wang, J., Ellem, G., Ward, J., & Giurco, D. (2015). Projection of world fossil fuels by country. *Fuel*, 141, 120–135. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2014.10.030>
- Höök, M., Zittel, W., Schindler, J., & Aleklett, K. (2010). Global coal production outlooks based on a logistic model. *Fuel*, 89(11), 3546–3558. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.06.013>
- WHO & UNICEF. (2017). Progress on drinking water, sanitation and hygiene: 2017 update and SDG baselines. World Health Organization and United Nations Children’s Fund.
- Monfet, E., Aubry, G., & Avalos Ramirez, A. (2017). Nutrient removal and recovery from digestate: A review of the technology. *Biofuels*, 9(2), 247–262. <https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1336348>
- Wilkinson, J., Hooda, P. S., Barker, J., Barton, S., & Swinden, J. (2017). Occurrence, fate and transformation of emerging contaminants in water: An overarching review of the field. *Environmental Pollution*, 231, 954–970. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.032>
- U.S. Environmental Protection Agency. (2015). Advancing Sustainable Materials Management: 2013 Fact Sheet. U.S. EPA.
- Nguyen, T. A. H., Ngo, H. H., Guo, W. S., Zhang, J., Liang, S., Yue, Q. Y., Li, Q., & Nguyen, T. V. (2013). Applicability of agricultural waste and by-products for adsorptive removal of heavy metals from wastewater. *Bioresource Technology*, 148, 574–585. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.08.124>
- Andersone, I., Andersons, B., Cīrule, D., Kuka, E., Kurnosova, N., Errj, S., Šarakovskis, A., Vēvere, L., Vasiljevs, L. O., & Merna, J. (2024). A step to microplastic formation: Microcracking and associated surface transformations of recycled LDPE, LLDPE, HDPE, and PP plastics exposed to UV radiation. *Polymer Degradation and Stability*, 229, 110967. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2024.110967>
- International Aluminium Institute. (2025). Recycling and aluminium circularity resources. International Aluminium Institute.
- Morris, G. (2025). IAI: Renewables and recycling to drive aluminium emissions reduction. *Aluminium Today*. <https://aluminiumtoday.com/news/iai-renewables-and-recycling-to-drive-aluminium-emissions-reduction>

- Ansys. (2022). Granta EduPack 2022 R2: MaterialUniverse and Eco Audit databases. Ansys Materials Education Division.
- Ruangnarong, C., Khojitmate, S., Srivorradatphisan, S., Panyathikun, N., & Chonsakorn, S. (2024). Evaluation of mechanically extracted banana fibers from pseudostem layers: A sustainable textile raw material. *Heliyon*, 10(21), e39880. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e39880>
- Textile Blog. (2025). Flax fiber (linen): Properties, uses and care guide.
- Raman Bharath, V. R., Vijaya Ramnath, B., & Manoharan, N. (2015). Kenaf fibre reinforced composites: A review.
- Austin, C. C., Mondell, C. N., Clark, D. G., & Wilkie, A. C. (2024). Kenaf: Opportunities for an ancient fiber crop. *Agronomy*, 14(7), 1542. <https://doi.org/10.3390/agronomy14071542>
- Peças, P., Carvalho, H., Salman, H., & Leite, M. (2018). Natural Fibre Composites and Their Applications: A Review. *Journal of Composites Science*, 2(4), 66. <https://doi.org/10.3390/jcs2040066>
- Abdul Khalil, H. P. S., Ireana Yusra, A. F., Bhat, A. H., & Jawaid, M. (2010). Cell wall ultrastructure, anatomy, lignin distribution, and chemical composition of Malaysian cultivated kenaf fiber. *Industrial Crops and Products*, 31(1), 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.09.008>
- Mohammed, L., Ansari, M. N. M., Pua, G., Jawaid, M., & Islam, M. S. (2015). A review on natural fiber reinforced polymer composite and its applications. *International Journal of Polymer Science*, 2015, 243947. <https://doi.org/10.1155/2015/243947>