



ΣΧΟΛΗ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΟΣ

Ειρήνη Τίλαβερίδου

Αξιοποίηση υπολειμμάτων καφέ

ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2024

Περίληψη

Η αξιοποίηση των υπολειμμάτων καφέ αποτελεί μια κρίσιμη πτυχή της προώθησης της βιωσιμότητας στη βιομηχανία καφέ. Η παρούσα μελέτη παρέχει μια επισκόπηση των ποικίλων μεθόδων και εφαρμογών για τη διαχείριση και επαναχρησιμοποίηση των υποπροϊόντων του καφέ που παράγονται σε όλα τα στάδια παραγωγής και επεξεργασίας. Τα απόβλητα του καφέ, συμπεριλαμβανομένων των φλοιών, των περγαμινών, των χρησιμοποιημένων κατακάθων και του παρεγχύματος, προσφέρουν σημαντικές δυνατότητες για περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη όταν αξιοποιούνται αποτελεσματικά.

Σε γεωργικά πλαίσια, τα απόβλητα καφέ μπορούν να μετατραπούν σε πολύτιμο κομπόστι, λιπάσματα και ζωοτροφές, ενισχύοντας την υγεία του εδάφους και μειώνοντας την εξάρτηση από συνθετικές εισροές. Ο ενεργειακός τομέας επωφελείται επίσης από τα απόβλητα καφέ, με την έρευνα και τις εφαρμογές να διερευνούν τις δυνατότητές τους στην παραγωγή βιοκαυσίμων και βιοαερίου, συμβάλλοντας έτσι σε λύσεις ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και μειώνοντας τις εκπομπές αερίων του θερμοκηπίου.

Στις βιομηχανικές εφαρμογές έχουν παρατηρηθεί καινοτόμες χρήσεις των υπολειμμάτων καφέ στην ανάπτυξη βιοπλαστικών, προσροφητικών και άλλων υλικών μέσω διαδικασιών όπως η πυρόλυση και η καύση. Οι εφαρμογές αυτές συμβάλλουν στον μετριασμό των περιβαλλοντικών επιπτώσεων και προωθούν τη δημιουργία νέων, βιώσιμων προϊόντων. Οι αναδυόμενες χρήσεις, συμπεριλαμβανομένης της ζύμωσης στερεάς κατάστασης, της παραγωγής ενζύμων και της ανάπτυξης χρωστικών ουσιών, αναδεικνύουν τη συνεχιζόμενη έρευνα και το διεκρινόμενο πεδίο χρήσης των υπολειμμάτων καφέ.

Η αποτελεσματική αξιοποίηση των αποβλήτων καφέ προσφέρει σημαντικές ευκαιρίες για να κλείσει ο κύκλος της παραγωγής καφέ, να προωθηθεί η βιωσιμότητα και να προωθηθεί η οικονομική ανάπτυξη. Η συνεχής διερεύνηση και εφαρμογή αυτών των μεθόδων θα είναι απαραίτητη για τη βελτιστοποίηση της ανάκτησης των πόρων και την υποστήριξη μιας πιο βιώσιμης βιομηχανίας καφέ.

Λέξεις κλειδιά

Υπολείμματα καφέ, επεξεργασία καφέ Υποπροϊόντα καφέ, αξιοποίηση υπολειμμάτων.

Abstract

The utilisation of coffee residues is a crucial aspect of promoting sustainability in the coffee industry. This study provides an overview of the various methods and applications for the management and reuse of coffee by-products produced at all stages of production and processing. Coffee wastes, including husks, parchment, spent grounds and parchment, offer significant potential for environmental and economic benefits when effectively utilized.

In an agricultural context, coffee waste can be transformed into valuable compost, fertiliser and animal feed, enhancing soil health and reducing reliance on synthetic inputs. The energy sector also benefits from coffee waste, with research and applications exploring its potential in biofuel and biogas production, contributing to renewable energy solutions and reducing greenhouse gas emissions.

In industrial applications, innovative uses of coffee residues have been observed in the development of bioplastics, adsorbents and other materials through processes such as pyrolysis and combustion. These applications help to mitigate environmental impacts and promote the creation of new, sustainable products. Emerging uses, including solid-state fermentation, enzyme production and pigment development, highlight the ongoing research and expanding scope for the use of coffee residues.

Effective utilization of coffee waste offers significant opportunities to close the coffee production cycle, promote sustainability and foster economic growth. Continued exploration and implementation of these methods will be essential to optimise resource recovery and support a more sustainable coffee industry.

Keywords

Coffee waste, coffee processing Coffee by-products, residue utilization.

ΠΙΝΑΚΑΣ ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΩΝ

Περίληψη	3
Abstract	4
Πίνακας εικόνων	6
Εισαγωγή	7
1. Η παραγωγή και επεξεργασία του καφέ	9
1.1. Η ανατομία του καρπού του καφέ	9
1.2. Παραγωγή του καφέ	9
1.3. Επεξεργασία καφέ.....	10
1.4. Ελαττωματικοί κόκκοι καφέ	12
1.5. Ψήσιμο του καφέ	13
1.5.1. Παραπροϊόντα της διαδικασίας ψησίματος	14
1.6. Παρασκευή ροφημάτων.....	14
2. Παραπροϊόντα επεξεργασίας καφέ	16
2.1. Οι φλοιοί (CH) του καφέ	16
2.2. Η πούλπα (CP) και το παρέγχυμα.....	16
2.3. Η Περγαμινή (CPm) και το σπερμόδερμα (CS) του καφέ.....	17
2.4. Οι χρησιμοποιημένοι κόκκοι του καφέ (SCG)	17
2.5. Συστάσεις χρησιμοποιημένων κόκκων καφέ (SCG)	19
2.5.1. Υδατάνθρακες.....	19
2.5.2. Πρωτεΐνες, αμινοξέα και αζωτούχες ενώσεις	21
2.5.3. Λιπίδια	21
2.5.4. Μελανοϊδίνες	22
2.5.5. Φαινολικές ενώσεις, καφεΐνη και ανόργανα στοιχεία	23
2.6. Αξιοποίηση των χρησιμοποιημένων κόκκων καφέ	24
3. Υπάρχουσες μέθοδοι αξιοποίησης των υπολειμμάτων του καφέ.....	26
3.1. Γεωργία.....	27
3.1.1 Κομποστοποίηση	29
3.1.2 Λίπασμα.....	31
3.1.3. Διατροφή των ζώων	32
3.2 Παραγωγή ενέργειας.....	34
3.2.1 Βιοκαύσιμα	34

3.2.2 Βιοαέριο	36
3.3 Βιομηχανικές εφαρμογές	37
3.3.1 Βιοπλαστικά.....	37
3.3.2 Προσροφητικά	39
3.3.3. Πυρόλυση και καύση	41
3.4. Άλλες χρήσεις	42
3.4.1. Ζύμωση στερεάς κατάστασης και παραγωγή ενζύμων	42
3.4.2. Χρωστικές ουσίες	44
3.4.3. Δομικά υλικά.....	44
3.5. Αναδυόμενες και καινοτόμες χρήσεις	45
Συμπέρασμα.....	48
Βιβλιογραφία	50

Πίνακας εικόνων

Εικόνα 2 Ανατομία του καφέ.....	9
Εικόνα 1 Παγκόσμια κατανάλωση καφέ	10

Εισαγωγή

Η διαχείριση των αποβλήτων που σχετίζονται με την παραγωγή τροφίμων δεν ενσωματώθηκε στις βιομηχανικές διαδικασίες μέχρι τα τέλη του 20ού αιώνα, καθώς οι πολιτικές των εταιρειών επικεντρώνονταν κυρίως στη μεγιστοποίηση της παραγωγής χωρίς να λαμβάνονται υπόψη οι περιβαλλοντικές συνέπειες. Εφαρμόζοντας αυτό το σκεπτικό, η ποσότητα των αποβλήτων κατά τη διαδικασία παραγωγής τροφίμων αυξήθηκε σημαντικά, με αποτέλεσμα αρνητικές συνέπειες τόσο για το περιβάλλον όσο και για την οικονομία (Socas-Rodríguez et al., 2021). Στις αρχές του 21ου αιώνα, λόγω της αυξανόμενης παραγωγής μεταποιημένων τροφίμων, κατέστη ζωτικής σημασίας η εφαρμογή πιο αποτελεσματικών στρατηγικών διαχείρισης και η ελαχιστοποίηση των αποβλήτων. Με την πάροδο των ετών έχει γίνει εμφανές ότι η συνεχιζόμενη πρακτική της απόρριψης των αποβλήτων της βιομηχανίας τροφίμων, τα οποία περιέχουν πολύτιμες πρωτεΐνες, αντιοξειδωτικά και άλλες βρώσιμες ουσίες, δεν είναι πλέον εφικτή για τις επιχειρήσεις. Ταυτόχρονα, η εξάντληση των αποθεμάτων τροφίμων, η εκθετική αύξηση του πληθυσμού και η ανάγκη ικανοποίησης των σύγχρονων διατροφικών απαιτήσεων ώθησαν την επιστημονική κοινότητα να δώσει προτεραιότητα σε εναλλακτικές λύσεις. Κατά συνέπεια, η έρευνα έχει στρέψει το ενδιαφέρον της στη βιοοικονομία και την αξιοποίηση των υποπροϊόντων με κυκλικό τρόπο, όπως δείχνει η πληθώρα των επιστημονικών άρθρων που έχουν δημοσιευτεί για το θέμα αυτό. Η κυκλική αξιοποίηση αναφέρεται στην αξιοποίηση των απορριπτόμενων υλικών τροφίμων με τη χρήση σύγχρονης τεχνολογίας, με στόχο την ανακύκλωση και την προώθηση της βιωσιμότητας των συστατικών αυτών (Zabaniotou & Kamaterou, 2019).

Η μελέτη των Socas-Rodríguez και συν. (2021) κατέδειξε ότι τα απόβλητα από τις επιχειρήσεις τροφίμων περιέχουν σημαντικά στοιχεία που μπορούν να χρησιμοποιηθούν για επεξεργασία και χρήση, όχι μόνο εντός του τομέα των τροφίμων αλλά και ως πρώτες ύλες σε άλλες βιομηχανίες. Σε περιοχές που χαρακτηρίζονται από τροπικό περιβάλλον, όπου συνηθίζεται η άφθονη καλλιέργεια κόκκων καφέ και κακάο, η παραγωγή υπολειμματικών υλικών που προκύπτουν από την επεξεργασία αυτών των κόκκων είναι επίσης συγκρίσιμη. Τα κελύφη των κόκκων κακάο, ένα κύριο υποπροϊόν της επεξεργασίας των κόκκων κακάο, έχουν πολλαπλές εφαρμογές. Μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως υποκατάστατο του κακάο και είναι επίσης χρήσιμα για τη δημιουργία μοναδικών λειτουργικών τροφίμων ως συστατικό ή συμπλήρωμα. Για παράδειγμα, ορισμένοι ερευνητές έχουν χρησιμοποιήσει τα αντιοξειδωτικά

χαρακτηριστικά ορισμένων ουσιών για τη διαφύλαξη των αντικειμένων από την οξείδωση (Rojo-poveda et al., 2020).

Ταυτόχρονα, διάφορα υποπροϊόντα της επεξεργασίας του καφέ έχουν επίσης αξιοποιηθεί για την ανάκτηση συστατικών. Οι ουσίες αυτές, συμπεριλαμβανομένων των υδατανθράκων, των φυσικών αντιοξειδωτικών, των βιταμινών, των ενζύμων, της κυτταρίνης, του αμύλου, των λιπιδίων, των πρωτεϊνών και των χρωστικών ουσιών, είναι ζωτικής σημασίας για τους τομείς των φαρμάκων, των καλλυντικών και των τροφίμων για τη δημιουργία πολύτιμων προϊόντων. Μια ενδεικτική περίπτωση αφορά την εκχύλιση φαινολικών ενώσεων και καφεΐνης, οι οποίες χρησιμοποιούνται στην κοσμετολογία και στην ανάπτυξη συνθέσεων κατά της κυτταρίτιδας. Έχει επίσης διεξαχθεί έρευνα για την παραγωγή βιοκαυσίμων, συμπεριλαμβανομένης της βιοαιθανόλης και του βιοντίζελ. Η έρευνα έχει επικεντρωθεί κυρίως στην αξιοποίηση των κόκκων καφέ για την παραγωγή βιοντίζελ (Franca and Oliveira, 2016).

Μια άλλη χρήση αξιοποίησης αφορά τη δημιουργία ποτών, όπως το ποτό Cascara, που παρασκευάζεται από πολτό καφέ, ο οποίος περιέχει αξιοσημείωτες ποσότητες καφεΐνης και χλωρογενικού οξέος. Υπήρξε μια πρόταση για τη χρησιμοποίηση του σπέρματος του καφέ λόγω της ξεχωριστής σύνθεσής του. Επιπλέον, τα υποπροϊόντα του καφέ έχουν χρησιμοποιηθεί σε διάφορες άλλες εφαρμογές, όπως η καλλιέργεια μικροβίων. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι αυτά τα υποπροϊόντα περιέχουν υδατάνθρακες και σάκχαρα, τα οποία χρησιμεύουν ως θρεπτικό υπόστρωμα για την ανάπτυξη μικροοργανισμών (Murthy et al., 2012). Λόγω των πολλών σταδίων που εμπλέκονται στην επεξεργασία του καφέ και της επακόλουθης παραγωγής σημαντικής ποσότητας υποπροϊόντων και αποβλήτων, έχει διεξαχθεί εκτεταμένη έρευνα για τη διερεύνηση των πιθανών εφαρμογών τους. Οι χρησιμοποιημένοι κόκκοι καφέ έχουν λάβει σημαντική προσοχή λόγω της ευελιξίας τους ως πόρος που μπορεί να αξιοποιηθεί με διάφορους τρόπους (Toschi et al., 2014).

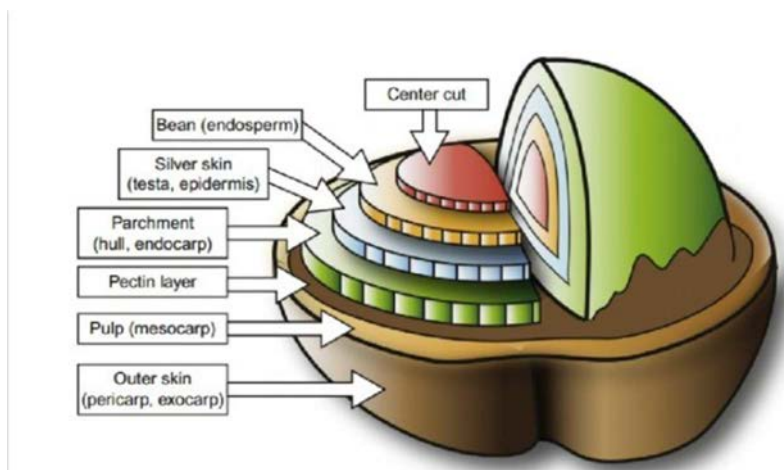
1. Η παραγωγή και επεξεργασία του καφέ

1.1. Η ανατομία του καρπού του καφέ

Ο καρπός(ή κεράσι) του καφέ αποτελείται από (Campos-Vega et al., 2015):

- Το περικάρπιο, το οποίο αποτελείται από το εξωκάρπιο, το μεσοκάρπιο (πούλπα)-βλεννώδες υλικό πεκτίνης, και το ενδοκάρπιο.
- Τον σπόρο, ο οποίος αποτελείται από, το έμβρυο ή φυτάριο, σπερμόδεσμα(silverskin) ή περίσπερμα, και το ενδόσπερμα (ή κόκκος του καφέ)

Κάθε κεράσι του καφέ περιέχει τυπικά 2 σπόρους. Ο ανεπεξέργαστος καρπός καφέ χαρακτηρίζεται συνήθως ως πράσινος.



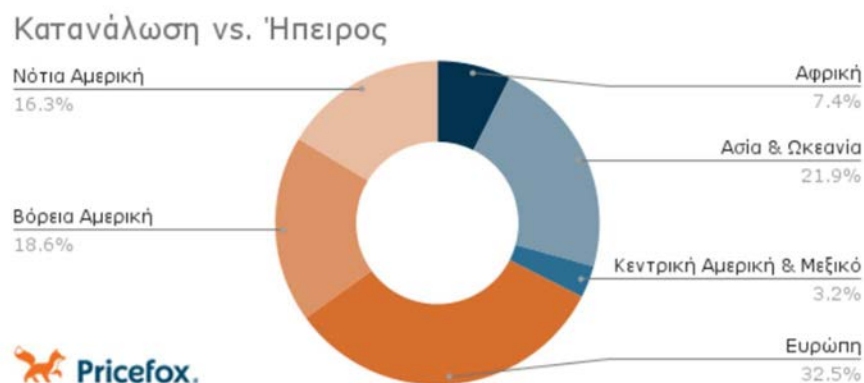
Εικόνα 1 Ανατομία του καφέ Πηγή: Rosmery Cruz-O'Byrne

1.2. Παραγωγή του καφέ

Το φυτό του καφέ κατατάσσεται στο γένος *Coffea* της οικογένειας Rubiaceae. Υπάρχουν πάνω από 70 είδη καφέ, αλλά μόνο δύο είναι ιδιαίτερα σημαντικά και διαδεδομένα: ο *Coffea canephora* (κοινώς αναφερόμενος ως *robusta*), ο οποίος αντιπροσωπεύει περίπου το 30% της παγκόσμιας κατανάλωσης, και ο *Coffea arabica* (κοινώς γνωστός ως *απλός arabica*), ο οποίος αντιπροσωπεύει περίπου το 70% της κατανάλωσης. Τα τελευταία χρόνια, η χρήση της ποικιλίας *arabica* έχει γίνει ακόμη πιο διαδεδομένη (Eira et al.). Η σύνθεση των διαφόρων

ειδών καφέ ποικίλλει. Οι ποικιλίες ρομπούστα περιλαμβάνουν υψηλότερη συγκέντρωση καφεΐνης, με περιεκτικότητα σε καφεΐνη άνω του 2,5% επί ξηρού βάρους. Αντίθετα, οι κόκκοι Arabica έχουν περιεκτικότητα σε καφεΐνη περίπου 1,5% (Henrique, 2004).

Η πλειονότητα του καφέ που παράγεται υφίσταται επεξεργασία και στη συνέχεια διατίθεται στην αγορά για κατανάλωση, συνήθως ως συνδυασμός των δύο ποικιλιών καφέ. Αυτό γίνεται για να τροποποιηθεί η γεύση, η οξύτητα και το επίπεδο καφεΐνης του καφέ. Επιπλέον, τα τελευταία χρόνια παρατηρείται αύξηση της παραγωγής Arabica και μείωση της παραγωγής robusta (Farah, 2012). Καλλιεργείται σε περίπου 80 χώρες, ο καφές είναι το δεύτερο πιο ανταλλάξιμο εμπόρευμα παγκοσμίως, μετά το πετρέλαιο. Επιπλέον, κατέχει τη διάκριση ότι είναι το πιο διαδεδομένο ποτό παγκοσμίως. Τα παρακάτω στοιχεία παρουσιάζουν στατιστικά στοιχεία σχετικά με την παραγωγή και την κατανάλωση καφέ, όπως αναφέρονται από τον Διεθνή Οργανισμό Καφέ (ICO). Το παραπάνω γράφημα απεικονίζει την παγκόσμια παραγωγή καφέ από το 1990 έως το 2020, υποδεικνύοντας σημαντική αύξηση 77% σε αυτό το χρονικό διάστημα (Rodrigues da Silva et al., 2022).



Εικόνα 2 Παγκόσμια κατανάλωση καφέ Πηγή: <https://www.newmoney.gr/roh/palmos-oikonomias/oikonomia/pies-chores-pinoun-ton-perissotero-kafe-pagkosmios-se-pia-thesi-vriskete-i-ellada-pinakes/>

1.3. Επεξεργασία καφέ

Μετά τη συγκομιδή και τη διαλογή των κόκκων καφέ, πρέπει να διαχωριστούν από τους καρπούς του καφέ. Στη συνέχεια, αποξηραίνονται και καβουρδίζονται για να παραχθεί το τελικό προϊόν καφέ. Το προϊόν αυτό χρησιμοποιείται για την παρασκευή ροφημάτων καφέ με διάφορους τρόπους, με τελικό αποτέλεσμα να προκύπτουν στερεά υπολείμματα καφέ ως

τελικό υποπροϊόν. Υπάρχουν τρεις τεχνικές επεξεργασίας του πράσινου καφέ: υγρές, μικτές ημίξηρες και ξηρές διαδικασίες. Η επιλογή της μεθόδου εξαρτάται από τον τύπο του καφέ και τη χώρα στην οποία παράγεται (Murthy & Madhava Naidu, 2012).

Η ξηρή μέθοδος επεξεργασίας, που χρησιμοποιείται για την πλειονότητα των καφέδων robusta παγκοσμίως και το 80% των καφέδων Arabica της Βραζιλίας και της Αιθιοπίας, περιλαμβάνει την ξήρανση ολόκληρου του καρπού μέσω ηλιακής έκθεσης ή ξήρανσης στον αέρα. Στη συνέχεια, το μεσοκάρπιο και το ενδοκάρπιο διαχωρίζονται με το χέρι. Κατά τη διαδικασία της ξήρανσης, το επίπεδο υγρασίας εντός του καρπού μειώνεται στο 12%. Στη συνέχεια, μετά από λίγες ημέρες, ο φλοιός, ο οποίος αποτελεί υποπροϊόν της επεξεργασίας, απομακρύνεται. Ο φλοιός αυτός αποτελείται από τα τρία εξωτερικά στρώματα του καρπού. Οι συνθήκες ξήρανσης λαμβάνονται ιδιαίτερα υπόψη, καθώς αποτελούν το κύριο συστατικό που θα επηρεάσει το άρωμα, την απόχρωση και την οπτική ελκυστικότητα του φρούτου (Henrique, 2004).

Αντίθετα, η υγρή τεχνική απαιτεί την παρουσία νερού. Η απομάκρυνση του εξωκαρπίου και του πολτού επιτυγχάνεται με τη χρήση πολτοποιητή. Στη συνέχεια, το παρέγχυμα απομακρύνεται είτε με μηχανικά μέσα είτε με τη διαδικασία της ζύμωσης. Για να διευκολυνθεί η διάσπαση του στρώματος πηκτικής μέσω της ζύμωσης, το σύστημα αφήνεται να παραμείνει αδιατάρακτο σε δεξαμενές, επιτρέποντας τη λειτουργία των ενζύμων που είναι υπεύθυνα για τη διαδικασία αυτή. Στη συνέχεια, η διαδικασία περιλαμβάνει την πράξη του καθαρισμού και στη συνέχεια την απομάκρυνση τυχόν υπολειμμάτων με εμβάπτιση του αντικειμένου σε μη μολυσμένο νερό. Ταυτόχρονα, η διαδικασία της εμβάπτισης βοηθά στην εξάλειψη των διτερπενίων και των πολυφαινολικών χημικών ουσιών, οι οποίες συμβάλλουν σε μια δυσάρεστη γεύση στο ποτό. Στη συνέχεια, οι κόκκοι αφυδατώνονται μέχρι το τελικό επίπεδο υγρασίας να φτάσει το 10%. Στη συνέχεια, η περγαμηνή εξαλείφεται με τη χρήση αποφλοιωτή, με αποτέλεσμα την απελευθέρωση του πράσινου κόκκου καφέ (Oliveira et al., 2021). Η μέθοδος υγρής επεξεργασίας, που χρησιμοποιείται σε ορισμένα κράτη παραγωγής καφέ για ένα μικρό μέρος της παραγωγής Robusta και το μεγαλύτερο μέρος της παραγωγής Arabica, περιλαμβάνει τη μηχανική αφαίρεση του μεσοκαρπίου. Η εναπομένουσα βλεννώδης ουσία εξαλείφεται στη συνέχεια μέσω μιας διαδικασίας ζύμωσης, έκπλυσης και ξήρανσης, με αποτέλεσμα την αφαίρεση του κελύφους (εξωκάρπιο) και την παραγωγή πράσινων κόκκων καφέ κατάλληλων για καβούρδισμα (Henrique, 2004).

Η ημίξηρη διαδικασία, που χρησιμοποιείται κυρίως στη Βραζιλία, ενσωματώνει ένα συνδυασμό ξηρών και υγρών μεθόδων επεξεργασίας. Η χημική σύσταση των κόκκων καφέ επηρεάζεται από διάφορους παράγοντες, όπως οι μέθοδοι επεξεργασίας που χρησιμοποιούνται, η εποχή συγκομιδής, οι τοπικές καιρικές συνθήκες και οι συνθήκες αποθήκευσης (Jenkins et al., 2014). Συγκεκριμένα, η αποθήκευση του προϊόντος για μεγάλο χρονικό διάστημα οδηγεί στην οξείδωση των λιπιδίων και στην αύξηση της ποσότητας των ελεύθερων λιπαρών οξέων. Επιπλέον, ο τρόπος επεξεργασίας του προϊόντος επηρεάζει τα επίπεδα των αμινοξέων, των χλωρογενικών οξέων και των υδατανθράκων. Οι διαφοροποιήσεις στις τεχνικές ξήρανσης που χρησιμοποιούνται κατά την επεξεργασία των καρπών του καφέ μπορούν να επηρεάσουν τη σύνθεση των λιπιδίων τροποποιώντας τις αναλογίες των διγλυκεριδίων και των τριγλυκεριδίων. Επιπλέον, κατά τη διαδικασία υγρής επεξεργασίας, τα λιπίδια μπορούν να αυξηθούν σε σχέση με το ξηρό βάρος του καφέ (Joët et al., 2010).

1.4. Ελαττωματικοί κόκκοι καφέ

Περίπου το 20% της συνολικής παραγωγής κατά βάρος αποτελείται από ελαττωματικούς πράσινους κόκκους καφέ, οι οποίοι συνήθως αναφέρονται ως ανώριμοι. Οι πράσινοι κόκκοι καφέ που παρουσιάζουν ελαττώματα χαρακτηρίζονται συχνά από μικρότερο μέγεθος, μικρότερο βάρος, χαμηλότερη περιεκτικότητα σε υγρασία (7,9 έως 8,7% κ.β. υγρασία), μειωμένα επίπεδα πρωτεϊνών και λιπαρών οξέων και ποικίλες ποσότητες κυτταρίνης, λιγνίνης και ημικυτταρίνης σε σύγκριση με τους μη ελαττωματικούς κόκκους (Oliveira et al., 2006). Συνήθως, οι πράσινοι κόκκοι καφέ που είναι ελαττωματικοί απορρίπτονται στην τοπική αγορά της χώρας όπου παράγονται. Αυτοί οι ελαττωματικοί κόκκοι αναμειγνύονται με υγιείς και καβουρδίζονται μαζί για να αυξηθεί η συνολική προσφορά καφέ. Η πρακτική αυτή οδηγεί στην παραγωγή καβουρδισμένου καφέ χαμηλής ποιότητας. Ωστόσο, οι ερευνητές έχουν επίσης διερευνήσει τη χρήση ελαττωματικών πράσινων κόκκων καφέ ως πρώτη ύλη για την παραγωγή ενεργού άνθρακα (Oliveira et al., 2008). Οι ελαττωματικοί κόκκοι καφέ υφίστανται χαμηλότερο βαθμό καβουρδίσματος σε σύγκριση με τους κανονικούς κόκκους όταν υποβάλλονται στις ίδιες συνθήκες καβουρδίσματος. Παρουσιάζουν διαφορετική πτητική σύνθεση αλλά διαθέτουν την ίδια περιεκτικότητα σε λιπαρά οξέα. Ωστόσο, ακόμη και αν οι κόκκοι καφέ θεωρηθούν ελαττωματικοί και αποσυρθούν από τη γραμμή παραγωγής με βάση τα κριτήρια διαλογής, μπορούν ακόμη να χρησιμοποιηθούν με εναλλακτικούς τρόπους.

Για παράδειγμα, τα λιπίδια τους μπορούν να χρησιμοποιηθούν στον τομέα των τροφίμων και των φαρμάκων ή ως πηγή λιπιδίων για τη δημιουργία βιοντίζελ (Franca et al., 2009).

1.5. Ψήσιμο του καφέ

Μετά την παρασκευή του πράσινου καφέ, το μεγαλύτερο μέρος του καβουρδίζεται για να αποκτήσει το επιθυμητό χρώμα και άρωμα για την παρασκευή ροφημάτων. Ωστόσο, μια μικρή ποσότητα του πράσινου καφέ αποκαφεϊνοποιείται πριν από τη διαδικασία καβουρδίσματος. Το καβούρδισμα μπορεί να κατηγοριοποιηθεί σε τρία διακριτά στάδια, όπως περιγράφεται από τον Farah το 2012:

- η ξήρανση είναι μια διαδικασία κατά την οποία εξατμίζεται το νερό και απελευθερώνονται σταδιακά αρωματικά πτητικά συστατικά.
- η πυρόλυση λαμβάνει χώρα σε ένα εύρος θερμοκρασιών από 210°C έως 240°C, ανάλογα με το επιθυμητό επίπεδο μαγειρέματος.
- και στη συνέχεια ψύξη με τη χρήση είτε αέρα είτε νερού.

Η διαδικασία πυρόλυσης προκαλεί σημαντικές μεταβολές στον καρπό, που περιλαμβάνουν αξιοσημείωτη αύξηση του όγκου, μετάβαση του χρώματος από πράσινο σε ανοιχτό καφέ, σκούρο καφέ ή μαύρο, αποσύνθεση των πρωτεϊνών και των υδατανθράκων και μετατροπή των πολυφαινολικών ενώσεων σε ένα ποικίλο αμάλγαμα προϊόντων της αντίδρασης Maillard (Mussatto et al., 2011).

Επιπλέον, έχει τεκμηριωθεί ότι το καβούρδισμα οδηγεί σε μέτρια μείωση των φαινολών και των τοκοφερολών, με αποτέλεσμα τη μείωση της περιεκτικότητας σε χλωρογενικό οξύ κατά 50% και την αύξηση της περιεκτικότητας σε καφεΐνη κατά 30% κατά βάρος. Το καβούρδισμα των κόκκων καφέ σε θερμοκρασίες άνω των 200 °C προκαλεί απώλεια νερού, πτητικών ενώσεων και οργανικής ύλης. Αυτό οδηγεί σε συγκέντρωση ατμών, η οποία δημιουργεί υψηλή εσωτερική πίεση στον κόκκο καφέ. Ως αποτέλεσμα, ο κόκκος καφέ διογκώνεται και η πυκνότητά του μειώνεται. Αυτή η αλλαγή στην πυκνότητα μεταβάλλει τη δομή και το πορώδες του κυτταρικού τοιχώματος, δημιουργώντας μικρούς πόρους που επιτρέπουν στο καυτό λάδι να κινηθεί προς την επιφάνεια του κόκκου (Farah, 2012).

Η δομή του κυτταρικού τοιχώματος του καφέ υφίσταται χαλάρωση κατά το ψήσιμο, η οποία οδηγεί σε αύξηση της διαλυτότητας των συστατικών του κυτταρικού τοιχώματος (Schenker et al., 2000). Οι υψηλότερες θερμοκρασίες καβουρδίσματος οδηγούν σε μεγαλύτερους όγκους καρπών και πόρων, καθώς και μικροπόρους μεγαλύτερης διαμέτρου στα κυτταρικά τοιχώματα, σε σύγκριση με τους καρπούς που εκτίθενται σε χαμηλότερες θερμοκρασίες καβουρδίσματος. Αφού καβουρδιστούν οι κόκκοι καφέ που δεν είναι ελαττωματικοί, αλέθονται σε μέγεθος κατάλληλο για τη συγκεκριμένη μέθοδο με την οποία θα χρησιμοποιηθούν για την παρασκευή ροφημάτων καφέ. Αυτοί οι αλεσμένοι κόκκοι καφέ μπορούν να χρησιμοποιηθούν οικιακά ή εμπορικά, ή μπορούν να χρησιμοποιηθούν βιομηχανικά για την παραγωγή στιγμιαίου καφέ (Farah, 2012).

1.5.1. Παραπροϊόντα της διαδικασίας ψήσιματος

Το κύριο υπόλειμμα της διαδικασίας καβουρδίσματος του καφέ στα κράτη-καταναλωτές είναι η φλούδα ή ασημόδερμα, που αποτελεί περίπου το 4,2% του βάρους του καρπού (Ballesteros et al., 2014). Λόγω της παρουσίας φαινολικών ενώσεων και μελανοϊδινών, έχει υψηλή αντιοξειδωτική ικανότητα και είναι πλούσιο σε διαλυτές φυτικές ίνες. Το γεγονός αυτό το καθιστά δυνητική πηγή αυτών των πολύτιμων συστατικών. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως υπόστρωμα για ζύμωση στερεάς κατάστασης για καύσιμα βιομάζας ή ως φυσικό λίπασμα. Επιπλέον, διαθέτει λιπίδια με συγκέντρωση που κυμαίνεται από 1,9 έως 5,2% κ.β., τα οποία έχουν σύνθεση παρόμοια με εκείνη των πράσινων και καβουρδισμένων κόκκων καφέ. Η περιεκτικότητα σε υγρασία, από την άλλη πλευρά, κυμαίνεται μεταξύ 2,6 και 8,2% κ.β., ανάλογα με τη διάρκεια και τις συνθήκες αποθήκευσης (Toschi et al., 2014).

1.6. Παρασκευή ροφημάτων

Για την παρασκευή ροφημάτων καφέ μπορούν να χρησιμοποιηθούν διάφορες τεχνικές, όπως μηχανικό ή μη μηχανικό φιλτράρισμα, βράσιμο, γαλλικός τύπος ή εσπρέσο. Ανεξάρτητα από τη μέθοδο που χρησιμοποιείται, η θεμελιώδης αρχή παραμένει η ίδια: ζεστό νερό σε θερμοκρασίες 90-95°C ή βραστό νερό στους 100°C χρησιμοποιείται για την εκχύλιση των βασικών αρωματικών ελαίων από τους κόκκους καφέ. Η διαδικασία αυτή έχει ως

αποτέλεσμα περίπου το 30% της μάζας του καφέ να διαλύεται στο νερό (Farah, 2012). Η παρασκευή καφέ με φίλτρο είναι ο πιο διαδεδομένος τρόπος παρασκευής καφέ, ωστόσο η κατανάλωση καφέ εσπρέσο έχει γνωρίσει σημαντική αύξηση τις τελευταίες δεκαετίες (Mussatto et al., 2011). Τόσο η διαδικασία παρασκευής φίλτρου όσο και η διαδικασία παρασκευής εσπρέσο παράγουν ροφήματα καφέ με σωματίδια SCG συγκρίσιμου μεγέθους. Οι ποικίλες μεταβλητές που χρησιμοποιούνται στις διάφορες τεχνικές παρασκευής καφέ, όπως η πίεση και η θερμοκρασία, επηρεάζουν τη χημική σύνθεση και τη συγκέντρωση των αιθέριων ελαίων στο ρόφημα (Farah, 2012). Η χρήση υψηλών θερμοκρασιών κατά τη διαδικασία παρασκευής καφέ εξάγει θερμόφιλες ενώσεις όπως τα χλωρογενικά οξέα. Επιπλέον, το ζεστό νερό εξαλείφει υδατοδιαλυτά συστατικά όπως οι πολυσακχαρίτες, οι μελανοϊδίνες και η καφεΐνη, με αποτέλεσμα την αύξηση της περιεκτικότητας σε υγρασία στα στερεά υπολείμματα που απομένουν μετά την παρασκευή του ροφήματος. Η πλειονότητα των λιπιδίων διατηρείται στα κατακάθια του καφέ μετά τη διαδικασία παρασκευής (Campos-Vega et al., 2015).

Επιπλέον, έχει ανακαλυφθεί ότι τα στερεά υπολείμματα καφέ που λαμβάνονται μέσω της μεθόδου φιλτραρίσματος χωρίς φίλτρο (με χρήση καφετιέρας) ή από την παρασκευή στιγμιαίου καφέ περιέχουν μεγαλύτερη ποσότητα λιπιδίων σε σύγκριση με εκείνα που λαμβάνονται από την παρασκευή με καφετιέρα φίλτρου, μηχανή εσπρέσο ή πρέσα. Αυτό πιθανώς οφείλεται στην αυξημένη πίεση που εφαρμόζεται κατά τη διάρκεια αυτών των μεθόδων, η οποία οδηγεί στην εκχύλιση των λιπιδίων. Η χρησιμοποιούμενη μεθοδολογία ευθύνεται επίσης για τα διαφορετικά επίπεδα διτερπενίων που βρίσκονται στα στερεά υπολείμματα του καφέ, με τον αφιλτράριστο καφέ βρασμού να παρουσιάζει την υψηλότερη συγκέντρωση (Gross et al., 1997).

2. Παραπροϊόντα επεξεργασίας καφέ

2.1. Οι φλοιοί (CH) του καφέ

Οι φλοιοί του καφέ (CH) είναι το μοναδικό υποπροϊόν που προέρχεται από την αποξήρανση και την αποφλοιώση των καρπών του καφέ με τη μέθοδο της ξηρής επεξεργασίας. Αποτελούν περίπου το 45% του συνολικού όγκου των φρεσκοσυλλεγμένων κόκκων καφέ. Οι φλοιοί έχουν υγρασία που κυμαίνεται από 13-15%, η οποία ποικίλλει ανάλογα με τη διάρκεια της διαδικασίας ξήρανσης. Σε βάρος χωρίς υγρασία, αποτελούνται από λιγνίνη (38%), κυτταρίνη (28%) και ένα τμήμα ημικυτταρινών (25%) που είναι άφθονο σε υπολείμματα ξυλόξης. Επιπλέον, περιλαμβάνουν πρωτεΐνες (8-11%), λίπη (13%) και καφεΐνη (1%). Η τέφρα περιλαμβάνει 3-7%. Τέλος, οι φλοιός περιέχει σημαντική ποσότητα φαινολικών χημικών ουσιών, συγκεκριμένα καφεϊκό και χλωρογενικό οξύ, με συγκέντρωση 13 mg ανά γραμμάριο φλοιού (εκφρασμένη σε ισοδύναμα γαλλικού οξέος) (Oliveira et al., 2021).

2.2. Η πούλπα (CP) και το παρέγχυμα

Ο πούλπα (CP) είναι το αρχικό υπολειμματικό υλικό που παράγεται κατά την υγρή επεξεργασία του καφέ και αντιπροσωπεύει το 39% του βάρους των νωπών κόκκων καφέ. Ο πολτός περιέχει σημαντική ποσότητα υγρασίας (78-81% κ.β.) ως αποτέλεσμα της προσθήκης νερού κατά το στάδιο πλύσης των κόκκων καφέ πριν από την πολτοποίηση. Η παρουσία σημαντικής ποσότητας νερού σε αυτή τη διαδικασία διευκολύνει την ανάπτυξη μικροοργανισμών, η οποία αποτελεί κοινό πρόβλημα σε όλα τα υποπροϊόντα που δεν έχουν υποστεί επαρκή μείωση του νερού. Η σύνθεση του πολτού του καφέ αποτελείται κυρίως από άφθονους υδατάνθρακες, πρωτεΐνες και ανόργανα άλατα, ιδίως κάλιο. Επιπλέον, περιέχει σημαντικές ποσότητες τανινών, πολυφαινόλων και καφεΐνης. Η σύνθεση των φλοιών είναι παρόμοια με αυτή της σύνθεσής του. Ο πολτός του καφέ περιέχει πολλά οργανικά συστατικά, εκφρασμένα ως ποσοστό του ξηρού βάρους του. Τα συστατικά αυτά περιλαμβάνουν τανίνες (1,80-8,56%), ολικές πηκτικές ουσίες (6,5%), αναγωγικά σάκχαρα (12,4%), μη αναγωγικά σάκχαρα (2,0%), καφεΐνη (1,3%), χλωρογενικό οξύ (2,6%) και ολικό καφεϊκό οξύ (1,6%) (Alves et al., 2017). Το παρέγχυμα, επίσης γνωστό ως βλεννώδης ουσία του καφέ (CM), έχει

επίπεδο υγρασίας 84% κ.β., το οποίο είναι παρόμοιο με αυτό του πολτού. Το ξηρό βάρος αυτής της ουσίας αποτελείται κυρίως από πηκτικούς πολυσακχαρίτες (30%), ημικυτταρίνες (18%), πρωτεΐνες (17%) και κυτταρίνη (8%) (Janissen & Huynh, 2018).

2.3. Η Περγαμινή (CPm) και το σπερμόδερμα (CS) του καφέ

Η περγαμνή του καφέ, επίσης γνωστή ως CPm, αναφέρεται στο ινώδες ενδοκάρπιο που περιβάλλει το εξωτερικό στρώμα του μούρου του καφέ. Μετά την ξήρανση και την αφαίρεση του φλοιού, το υποπροϊόν αυτό έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε υγρασία 9% κ.β. Η περγαμνή αποτελείται από ξυλάνη (35%), λιγνίνη (32%) και κυτταρίνη (12%) επί ξηρού βάρους. Η τέφρα περιλαμβάνει 1%. Η περγαμνή περιέχει καφεΐνη σε συγκέντρωση 0,13% και φαινολικές ενώσεις σε συγκέντρωση 2 mg g⁻¹ GAE. Αυτές οι χημικές ουσίες συμβάλλουν στην αντιοξειδωτική δράση της περγαμνής (Janissen & Huynh, 2018).

Το σπερμόδερμα του καφέ (CS) αναφέρεται σε ένα λεπτό κομμάτι του εξωτερικού στρώματος των κόκκων καφέ. Είναι το πιο διαδεδομένο υποπροϊόν που παράγεται κατά τη διαδικασία του καβουρδίσματος του καφέ. Το επίπεδο υγρασίας της ουσίας είναι αρκετά χαμηλό και κυμαίνεται από 4-7% κ.β. Αυτό το χαρακτηριστικό διευκολύνει την αποθήκευση και την άμεση χρήση της ουσίας όταν χρειάζεται (Benitez et al., 2019). Το περίβλημα του σπόρου μοιάζει πολύ με περγαμνή στη σύνθεσή του, λόγω της εγγύτητάς του στον πυρήνα του καρπού. Η σπερματοθήκη αποτελείται κυρίως από πολυσακχαρίτες, με την κυτταρίνη να αποτελεί το μεγαλύτερο συστατικό, αντιπροσωπεύοντας το 59% του ξηρού βάρους της. Οι υπόλοιποι πολυσακχαρίτες περιλαμβάνουν ξυλόζη (19%), αραβινόζη (9%), γαλακτόζη (9%) και μαννόζη (4%). Η σπερματοθήκη περιέχει επίσης λιγνίνη (29%), πρωτεΐνες (19%), λιπίδια (2-5%) και τέφρα (5-7%). Επιπλέον, περιλαμβάνει καφεΐνη σε συγκέντρωση 1% και φαινολικές ενώσεις σε συγκέντρωση 2% κ.β. GAE, οι οποίες αποτελούνται κυρίως από χλωρογενικά οξέα. Το σπέρμα που λαμβάνεται από τη διαδικασία καβουρδίσματος περιέχει μελανοειδίνες (5%), οι οποίες είναι σύνθετα αζωτούχα πολυμερή με υψηλό μοριακό βάρος που παράγονται μέσω αντιδράσεων Maillard κατά το καβούρδισμα (Toschi et al., 2021).

2.4. Οι χρησιμοποιημένοι κόκκοι του καφέ (SCG)

Περίπου το ήμισυ του καρπού του καφέ αποτελείται από έτοιμους προς κατανάλωση κόκκους καφέ, οι οποίοι τελικά καταλήγουν σε χρησιμοποιημένους κόκκους καφέ ως το τελικό υποπροϊόν της επιχείρησης καφέ. Οι χρησιμοποιημένοι κόκκοι καφέ (SCG) παράγονται ως υποπροϊόν κατά την παρασκευή στιγμιαίου καφέ. Αυτό συμβαίνει όταν οι καβουρδισμένοι και αλεσμένοι κόκκοι καφέ υποβάλλονται σε επεξεργασία με ζεστό νερό ή ατμό για την εξαγωγή καφέ προς κατανάλωση. Η υπολειμματική ουσία που μένει πίσω μετά τη διαδικασία εκχύλισης είναι κοινώς γνωστή ως SCG. Κάθε χρόνο κατασκευάζονται παγκοσμίως περίπου έξι εκατομμύρια τόνοι χρησιμοποιημένων κατακάθων καφέ (SCG) και κάθε τόνος πράσινου καφέ αποδίδει 650 kg SCG (Ballesteros et al., 2014).

Οι χρησιμοποιημένοι κόκκοι καφέ, γνωστοί και ως SCG, είναι στερεά υπολείμματα που περιέχουν 61% υγρασία. Η εξαιρετική προσβασιμότητα του υλικού απλοποιεί σημαντικά τη διερεύνηση του χημικού χαρακτηρισμού του και τις επακόλουθες χρήσεις του. Το SCG αποτελείται κυρίως από πολυσακχαρίτες, με τις γαλακτομαννάνες να αντιπροσωπεύουν το 50%, τις αραβινογαλακτάνες το 25% και την κυτταρίνη ένα άλλο 25%, όλα μετρημένα σε βάση ξηρού βάρους. Οι γαλακτομαννάνες του καφέ είναι πολυσακχαρίτες με υψηλό μοριακό βάρος και ελάχιστη διακλάδωση. Οι ουσίες αυτές είναι διαλυτές στο νερό και μπορούν να δημιουργήσουν πυκνά και σταθερά διαλύματα όταν αναμιγνύονται με νερό. Τα διαλύματα αυτά έχουν τη δυνατότητα να σχηματίζουν φιλμ και είναι εξαιρετικά για την κατασκευή βρώσιμων και βιοδιασπώμενων φιλμ ή επικαλύψεων για εφαρμογές τροφίμων (Oliveira et al., 2021).

Η περιεκτικότητα του SCG σε μελανοειδή είναι περίπου 16%, αποτελούμενη από 5% πρωτεΐνες, 13-15% λιπίδια, 0,01-0,5% καφεΐνη και 1-2% κ.β. GAE φαινολικών ενώσεων. Οι κύριες φαινολικές ενώσεις που βρίσκονται στο SCG είναι κυρίως χλωρογενικά οξέα, συγκεκριμένα το 3-O-καφεϊκό οξύ, το 4-O-καφεϊκό οξύ και το 5-O-καφεϊκό οξύ, τα οποία αποτελούν το 85% της σύνθεσης. Επιπλέον, το καφεϊκό οξύ αντιπροσωπεύει το 6% της σύνθεσης. Το αναμενόμενο ποσοστό τέφρας είναι 2%. Το έλαιο που λαμβάνεται από το SCG περιέχει κυρίως 45% λινολεϊκό οξύ και 38% παλμιτικό οξύ, μαζί με 15% διτερπένια, συγκεκριμένα καβεόλη, καφεστόλη και 16-O-μεθυλοκαφεστόλη. Μικρές διακυμάνσεις στη χημική σύσταση του SCG μπορεί να προκύψουν λόγω των διαφοροποιήσεων στις μεθόδους εκχύλισης του καφέ και στη σύνθεση των καβουρδισμένων κόκκων καφέ. Οι διακυμάνσεις αυτές επηρεάζονται από παράγοντες όπως ο τύπος του καφέ και οι συνθήκες κατά τη μετασυλλεκτική επεξεργασία. Η συνολική δομή του SCG φαίνεται να είναι γενικά σταθερή (Coelho et al., 2021).

2.5. Συστάσεις χρησιμοποιημένων κόκκων καφέ (SCG)

Δεδομένης της σημαντικής ποσότητας των χρησιμοποιημένων κόκκων καφέ που παράγονται κατά την επεξεργασία του καφέ, της εύκολης διαθεσιμότητας αυτού του αποβλήτου και της μεγάλης αφθονίας του, υπάρχει μεγάλη ανάγκη να κατανοηθεί η σύνθεση και οι πιθανές χρήσεις αυτής της ουσίας. Η έρευνα σχετικά με τους χρησιμοποιημένους κόκκους καφέ ήταν σπάνια μέχρι τις αρχές αυτής της δεκαετίας, με μόνο τις μισές από τις δημοσιευμένες δημοσιεύσεις να επικεντρώνονται στην τελευταία τετραετία. Στόχος των διαφόρων ερευνητικών προσπαθειών είναι να αξιοποιηθεί η τρέχουσα κατανόηση του χρησιμοποιημένου καφέ προκειμένου να δημιουργηθεί μια πλατφόρμα βιοδιύλισης που θα ενισχύει την αξία αυτού του φθηνού αποβλήτου (McNutt & He, 2019).

2.5.1. Υδατάνθρακες

Ο κόκκος του καφέ περιέχει σημαντική ποσότητα πολυσακχαριτών, αποτελώντας περίπου το 50% του βάρους του πράσινου καρπού όταν αποξηραίνεται. Αυτοί οι πολυσακχαρίτες αποτελούνται κυρίως από ημικυτταρίνες, συμπεριλαμβανομένων των γαλακτομαννάνων και των αραβινογαλακτανών τύπου II, καθώς και από κυτταρίνη. Ο κύριος πολυσακχαρίτης που βρίσκεται στο εκχύλισμα καφέ είναι οι γαλακτομαννάνες. Είναι υπεύθυνος για το υψηλό ιξώδες του καφέ, το οποίο επηρεάζει αρνητικά τις τεχνολογικές διαδικασίες που χρησιμοποιούνται στην παρασκευή στιγμιαίου καφέ. Οι γαλακτομαννάνες του καφέ είναι πολυσακχαρίτες με υψηλό μοριακό βάρος. Αποτελούνται από έναν γραμμικό κορμό μορίων μαννόζης που συνδέονται με β-δεσμούς. Περίπου κάθε 100 κατάλοιπα, ένα μόνο συνδεδεμένο μόριο γαλακτόζης υποκαθίσταται στη θέση O-6 (McNutt & He, 2019).

Οι αραβινογαλακτάνες διαθέτουν αναλογία αραβινόζης προς γαλακτόζη 0,4 προς 1. Αποτελούνται από ένα πλαίσιο γαλακτόζης που συνδέεται με β-δεσμούς και τροποποιείται στη θέση O-6 με μονάδες αραβινόζης ή/και γαλακτόζης. Οι πλευρικές αλυσίδες αποτελούνται από κατάλοιπα αραβινόζης και γαλακτόζης, με την αραβινόζη να είναι το τελευταίο κατάλοιπο. Οι αραβινογαλακτάνες τύπου II είναι συνήθως ομοιοπολικά συνδεδεμένες με την πρωτεΐνη και οι δεσμοί αυτοί αποτελούν χαρακτηριστικό γνώρισμα αυτού του πολυμερούς. Το ψήσιμο

ενισχύει τη διαλυτότητα της αραβινογαλακτάνης και της γαλακτομαννάνης, προκαλώντας τη χαλάρωση της δομής του κυτταρικού τοιχώματος καθώς διαστέλλεται παράλληλα με τον αποπολυμερισμό του πολυσακχαρίτη. Οι υδατοδιαλυτοί πολυσακχαρίτες που σχηματίζονται κατά τη διαδικασία του καβουρδίσματος είναι ζωτικής σημασίας για τη διατήρηση των πτητικών ενώσεων και την ενίσχυση του ιξώδους του καφέ, με αποτέλεσμα την επιθυμητή κρεμώδη αίσθηση του στόματος που αναφέρεται ως "σώμα". Κατά την παραγωγή του καφέ, ορισμένες ενώσεις γνωστές ως γαλακτομαννάνες και αραβινογαλακτάνες απομακρύνονται από τους κόκκους καφέ με τη χρήση ζεστού νερού υπό πίεση. Ωστόσο, η πλειονότητα αυτών των πολυσακχαριτών παραμένει ως αδιάλυτες ουσίες προσκολλημένες στη μήτρα SCG (Gu et al., 2010).

Οι μαννοολιγοσακχαρίτες (MOS) είναι μη πεπτόμενοι ολιγοσακχαρίτες που αποτελούνται κυρίως από μαννόζη. Βρίσκονται στο SCG, καθώς προέρχονται από τη διάσπαση της μαννάνης στο SCG σε υψηλές θερμοκρασίες. Τα κύρια συστατικά των μαννοολιγοσακχαριτών αποτελούνται από μαννοβιόζη, μαννοτριόζη και μαννοτετραόζη. Η βιβλιογραφική έρευνα έχει αποδείξει ότι τα MOS έχουν την ικανότητα να ενισχύουν τον πολλαπλασιασμό των *bifidobacteria* στον εντερικό σωλήνα. Επιπλέον, όταν καταναλώνεται συστηματικά, ένα ρόφημα που περιέχει MOS (σε συγκέντρωση 1 ή 2 g/100 ml) φαίνεται να μειώνει την ποσότητα του κοιλιακού και υποδόριου λίπους στους ανθρώπους. Το MOS, το οποίο παράγεται από τη μαννάνη του καφέ, έχει δημιουργηθεί ως αποτελεσματικό πρεβιοτικό συστατικό στην Ιαπωνία και έχει λάβει έγκριση ως λειτουργικό συστατικό τροφίμων (Campos-vega & Oomah, 2015).

Οι κόκκοι καφέ που έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν περιλαμβάνουν σημαντική ποσότητα σακχάρων, κυτταρίνης και ημικυτταρίνης. Οι ουσίες αυτές υπάρχουν με τη μορφή πολυμερισμένων δομών και αποτελούν περίπου το 45,3% του ξηρού βάρους των κόκκων καφέ. Η σύνθεση του SCG αποτελείται από 46,8% μαννόζη, 30,4% γαλακτόζη, 19% γλυκόζη και 3,8% αραβινόζη. Οι πρωταρχικοί πολυσακχαρίτες που περιλαμβάνονται στο SCG είναι οι μαννάνες (Mussatto et al., 2011).

Οι SCG αποτελούνται από διαιτητικές ίνες (45,2%) που έχουν ουδέτερη σύσταση και φαίνεται να είναι συνδεδεμένες με λιγνίνη. Οι κόκκοι καφέ που έχουν χρησιμοποιηθεί στο παρελθόν περιλαμβάνουν 35% διαλυτές ίνες και 8% αδιάλυτες ίνες. Οι φυτικές ίνες επιδεικνύουν αντιοξειδωτικές ικανότητες συγκρίσιμες με εκείνες που βρίσκονται σε γνωστά αντιοξειδωτικά τρόφιμα όπως τα προϊόντα κόκκινου κρασιού και τα ροδάκινα. Έτσι, οι ίνες

που προέρχονται από το SCG μπορούν να ταξινομηθούν ως αντιοξειδωτικές διαιτητικές ίνες, καθιστώντας τις πολύτιμες ως πιθανό συμπλήρωμα διατροφής. Η λιγνίνη είναι ένα πολυμερές που συνδέεται με την κυτταρίνη και την ημικυτταρίνη. Χρησιμεύει ως σταθεροποιητής, προστατεύοντας από μηχανικές και άλλες βιολογικές καταπονήσεις τόσο από εσωτερικές όσο και από εξωτερικές πηγές. Οι SCG αποτελούνται από μονάδες φαινυλοπροπανίου με υποκαταστάσεις καρβονυλίου, υδροξυλίου και μεθοξυλίου, σχηματίζοντας ένα τρισδιάστατο άμορφο φυσικό πολυμερές. Αυτό το πολυμερές είναι υπεύθυνο για την υψηλή θερμογόνο δύναμη των SCGs. Ορισμένες μελέτες εκτιμούν ότι η περιεκτικότητα σε λιγνίνη στους πράσινους κόκκους καφέ είναι περίπου 19.829,8% (Murthy & Naidu, 2012).

2.5.2. Πρωτεΐνες, αμινοξέα και αζωτούχες ενώσεις

Η πρωτεΐνη είναι το δεύτερο επικρατέστερο συστατικό στο SCG, αποτελώντας περίπου το 15% της ξηρής μάζας. Η περιεκτικότητα του καβουρδισμένου καφέ σε πρωτεΐνες είναι περίπου 3,1% (w/w). Σύμφωνα με τους Arya & Rao (2007), η περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες στο χρησιμοποιημένο κατακάθι καφέ (SCG) είναι μεγαλύτερη από ό,τι στον κόκκο καφέ, λόγω της συσσώρευσης μη εκχυλισμένων συστατικών κατά τη διαδικασία παρασκευής στιγμιαίου καφέ. Η περιεκτικότητα σε πρωτεΐνες στο SCG μπορεί να υπολογιστεί ανακριβώς λόγω της παρουσίας άλλων αζωτούχων ενώσεων, όπως η καφεΐνη, τριγωνελίνη, ελεύθερες αμίνες και αμινοξέα. Παρόλα αυτά, πολλοί συγγραφείς καταγράφουν συγκρίσιμα επίπεδα πρωτεϊνών, που κυμαίνονται από 6,7% έως 9,9% και φτάνουν ακόμη και το 14%. Η πρωτεΐνη SCG περιέχει σημαντικές ποσότητες των κρίσιμων αμινοξέων λευκίνη, βαλίνη, φαινυλαλανίνη και ισολευκίνη. Οι ποσότητες ισολευκίνης, λευκίνης και βαλίνης στο SCG είναι υπερδιπλάσιες από εκείνες που περιέχονται στο αλεύρι σόγιας, το οποίο είναι ένα υποπροϊόν που χρησιμοποιείται συνήθως στις ζωοτροφές. Ωστόσο, η ποσότητα λυσίνης στο SCG είναι ανεπαρκής. Σχεδόν το 50% του συνόλου των αμινοξέων στο SCG αποτελείται από τα απαραίτητα αμινοξέα, με τη λευκίνη συγκεκριμένα να συνεισφέρει το 13-21% της συνολικής σύνθεσης (Campos-vega & Oomah, 2015).

2.5.3. Λιπίδια

Οι αναφορές δείχνουν ότι οι χρησιμοποιημένοι κόκκοι καφέ συχνά περιέχουν περιεκτικότητα σε λιπίδια 10-15%, και περιστασιακά ακόμη υψηλότερη, κατά μέσο όρο 20% (με εύρος 19,9-27,8%) επί ξηρού βάρους. Το έλαιο που λαμβάνεται από το SCG παρουσιάζει λίγο άρωμα καφέ και διαθέτει πορτοκαλί ή σοκολατί καφέ απόχρωση. Η ποσότητα των λιπιδίων που λαμβάνονται από το SCG ποικίλλει ανάλογα με την ειδική διαδικασία που χρησιμοποιείται για την προετοιμασία και την εκχύλιση. Τόσο κατά την παρασκευή του καφέ φίλτρου όσο και του στιγμιαίου καφέ, τα λιπίδια που υπάρχουν στους κόκκους καφέ δεν φιλτράρονται και παραμένουν προσκολλημένα στους χρησιμοποιημένους κόκκους. Τα τριγλυκερίδια στο SCG αποτελούνται από λινολεϊκό, παλμιτικό, στεατικό και ελαϊκό οξύ. Το αραχιδονικό οξύ, το οποίο αποτελεί περίπου το 7% των ελαίων SCG, και το λινολενικό οξύ, το οποίο αποτελεί λιγότερο από 5%, βρίσκονται συνήθως στα περισσότερα έλαια SCG. Ωστόσο, η παρουσία λαουρικού και μυριστικού οξέος στα έλαια SCG είναι ασυνήθιστη και εξαρτάται από παράγοντες όπως οι συνθήκες εκχύλισης, οι μέθοδοι επεξεργασίας και η προέλευση των κόκκων καφέ (Karmee, 2018).

2.5.4. Μελανοΐδινες

Το SCG είναι πηγή μελανοΐδινών, οι οποίες είναι σημαντικές ενώσεις με περίπλοκη δομή. Οι μελανοΐδινες επηρεάζουν τόσο τη χημική δομή όσο και την οργανοληπτική πλευρά. Οι μελανοΐδινες είναι σύνθετες σκούρες χρωστικές ουσίες με υψηλό μοριακό βάρος που παράγονται μέσω της μη ενζυμικής αντίδρασης Maillard όταν τα τρόφιμα ψήνονται. Όταν αναγωγικά σάκχαρα και μόρια με ελεύθερη αμινομάδα αντιδρούν, παράγεται μια σειρά χημικών ουσιών, συμπεριλαμβανομένων των μελανοΐδινών (Bernardes et al., 2012). Οι μελανοΐδινες είναι ενώσεις που περιέχουν άζωτο και σχηματίζονται ως αποτέλεσμα της αντίδρασης Maillard. Περιέχουν επίσης μικρές ποσότητες (<6%) αμινοξέων, με κυριότερα το γλουταμινικό οξύ και τη γλυκίνη. Οι μελανοΐδινες είναι υπεύθυνες για τις αντιοξειδωτικές, αντιβακτηριακές, αντιδιουρητικές, αντιφλεγμονώδεις, αντιδιαβητικές και αντιυπερτασικές επιδράσεις που παρατηρούνται στον παρασκευασμένο καφέ. Σύμφωνα με την έρευνα, έχει τεκμηριωθεί ότι οι μελανοΐδινες διαθέτουν την ικανότητα να παρεμποδίζουν τις μεταλλοπρωτεάσες και να ασκούν έλεγχο στον βακτηριακό πληθυσμό του παχέος εντέρου. Τα προϊόντα της αντίδρασης Maillard έχουν πιθανές λειτουργικές εφαρμογές στα τρόφιμα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως συντηρητικά τροφίμων λόγω της αντιοξειδωτικής τους

ικανότητας και της ικανότητάς τους να καταστέλλουν την οξείδωση των λιπιδίων (Simões et al., 2013).

2.5.5. Φαινολικές ενώσεις, καφεΐνη και ανόργανα στοιχεία

Το SCG έχει και άλλα πρόσθετα συστατικά σε μικρότερες αναλογίες, όπως φαινολικές ενώσεις, μέταλλα (κάλιο, μαγνήσιο, ασβέστιο, φώσφορο, νάτριο, σίδηρο, χαλκό, μαγγάνιο), καφεΐνη και τανίνες (McNutt & He, 2019). Το κάλιο είναι το στοιχείο με τη μεγαλύτερη αφθονία, ακολουθούμενο από τον φώσφορο και το μαγνήσιο. Το SCG περιέχει επίσης τέφρα (1,6%), η οποία αποτελείται από διάφορα μέταλλα. Η αναφορά είναι από τους Mussatto και συν. (2011).

Τα τελευταία χρόνια έχει γίνει εκτεταμένη έρευνα σχετικά με την εξαγωγή φαινολικών ενώσεων από υποπροϊόντα του καφέ και τις αντιοξειδωτικές τους ιδιότητες. Οι φαινολικές χημικές ενώσεις που προέρχονται από υποπροϊόντα του καφέ, συμπεριλαμβανομένου του πολτού του φλοιού, του περιβλήματος των σπόρων και του χρησιμοποιημένου κατακάθια καφέ (SCG), έχουν εξαχθεί με τη χρήση διαφορετικών διαλυτών. Οι Murthy & Naidu, 2012 χρησιμοποίησαν ένα μείγμα διαλυτών ισοπροπανόλης και νερού. Σύμφωνα με τα ευρήματά τους, τα υποπροϊόντα του καφέ έχουν περίπου 1-1,5% συνολικές πολυφαινόλες. Η υψηλότερη ποσότητα πολυφαινολών βρίσκεται στο σπέρμα (25%), ακολουθούμενη από το SCG (19%) και το φλοιό (17%). Το χλωρογενικό οξύ (CGA) ταυτοποιήθηκε ως η κύρια φαινολική ένωση με ανάλυση υγρής χρωματογραφίας υψηλής απόδοσης. Οι φαινολικές χημικές ενώσεις, και συγκεκριμένα το χλωρογενικό οξύ (CGA), υπάρχουν κυρίως στους πράσινους κόκκους καφέ, αποτελώντας έως και το 12% των στερεών. Τα CGA αναφέρονται σε υδατοδιαλυτούς εστέρες που δημιουργούνται από τον συνδυασμό κινικού οξέος με μία ή δύο μονάδες καφεϊκού οξέος, το οποίο είναι ένα trans-κιναμωμικό οξύ (Murthy & Madhava Naidu, 2012). Τα SCG περιέχουν φαινολικές ενώσεις όπως το καφεϊκό οξύ, το φερουλικό οξύ, το p-κουμαρικό οξύ και το χλωρογενικό οξύ. Αυτές οι χημικές ουσίες παρουσιάζουν αντιοξειδωτικές, αντιβακτηριακές, ηπατοπροστατευτικές, υπογλυκαιμικές, αντικαρκινικές και αντιιικές ιδιότητες. Επιπλέον, οι δραστικές πολυφαινόλες που βρίσκονται στο SCG είναι συγκεκριμένα οι συμπυκνωμένες και υδρολύσιμες ταννίνες (Kovalcik et al., 2018).

2.6. Αξιοποίηση των χρησιμοποιημένων κόκκων καφέ

Ο καφές είναι ένα ιδιαίτερα διαδεδομένο ρόφημα που απολαμβάνεται ευρέως σε παγκόσμιο επίπεδο. Καλλιεργείται σε περίπου 80 χώρες και αποτελεί το δεύτερο πιο διαδεδομένο εμπόρευμα παγκοσμίως, μετά το πετρέλαιο. Οι χώρες που παράγουν καφέ παράγουν υπολείμματα καρπών καφέ που αποτελούν περισσότερο από το 50% της συνολικής μάζας του καρπού. Σύμφωνα με τους Battista και συν. (2020), έχει υπολογιστεί κατά προσέγγιση ότι 1 kg καφέ αποδίδει περίπου 2 kg υγρών απορριπτόμενων κόκκων καφέ. Ως εκ τούτου, η σημαντική ποσότητα υποπροϊόντων που παράγεται σε ετήσια βάση κατά τη διαδικασία παρασκευής ροφημάτων καφέ απαιτεί κατάλληλο χειρισμό και διάθεση. Επί του παρόντος, οι επικρατούσες μέθοδοι για τη διάθεση των παλαιών κόκκων καφέ περιλαμβάνουν την αποτέφρωση, την υγειονομική ταφή ή τη συλλογή τους και τη μετέπειτα ανακύκλωσή τους μέσω αναερόβιας χώνευσης/κομποστοποίησης (Blinová et al., 2017).

Παρ' όλα αυτά, η μη επεξεργασμένη απόρριψη των υπολειμμάτων καφέ στο περιβάλλον έχει ως αποτέλεσμα σημαντικά περιβαλλοντικά ζητήματα. Τα υποπροϊόντα που παράγονται από την επιχείρηση καφέ καθίστανται περιβαλλοντικά επιβλαβή όταν απελευθερώνονται στο περιβάλλον λόγω της σύνθεσής τους από οργανική ύλη, καφεΐνη, τανίνες και πολυφαινόλες. Επιπλέον, η ύπαρξη οργανικού περιεχομένου στα SCG απαιτεί σημαντική ποσότητα οξυγόνου για την αποσύνθεσή τους στους χώρους υγειονομικής ταφής. Ταυτόχρονα, οι χώροι υγειονομικής ταφής παράγουν μεθάνιο, ένα αέριο του θερμοκηπίου που είναι πιο επιβλαβές από το διοξείδιο του άνθρακα, επιδεινώνοντας την υπερθέρμανση του πλανήτη. Η καφεΐνη, οι τανίνες και οι πολυφαινόλες έχουν βρεθεί ότι είναι επικίνδυνες για το περιβάλλον όταν υπάρχουν σε σημαντικές ποσότητες (Camposvega & Oomah, 2015).

Κατά συνέπεια, οι συμβατικές μέθοδοι διάθεσης πρέπει να αντικατασταθούν με πιο φιλικές προς το περιβάλλον προσεγγίσεις για τη χρήση τους. Υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη χρήση αυτών των αποβλήτων για την ανάκτηση υλικών και ενέργειας αντί για τη διάθεσή τους. Τα απόβλητα παράγονται συνήθως από δύο κύριες πηγές: τις εγκαταστάσεις εστίασης, όπως οι καφετέριες, και τα εργοστάσια επεξεργασίας κόκκων καφέ. Συλλογικά, οι πηγές αυτές παράγουν περίπου 6 εκατομμύρια μετρικούς τόνους απορριμμάτων κάθε χρόνο σε παγκόσμια κλίμακα. Η τυπική παραγωγή στιγμιαίου καφέ παράγει περίπου 650 κιλά σκουπίδια από κάθε μετρικό τόνο πράσινων κόκκων καφέ (Campos-Vega et al., 2015).

Δεδομένης της ποικιλόμορφης σύνθεσής τους, μπορεί να προκύψει πλήθος πολύτιμων αγαθών από αυτά. Οι SCG περιέχουν σημαντικές ποσότητες οργανικών ουσιών, συμπεριλαμβανομένων λιπαρών οξέων, αμινοξέων, πολυφαινολών, ανόργανων συστατικών και πολυσακχαριτών. Ο καφές θεωρείται σημαντικός προμηθευτής πρωτεϊνών και λιπιδίων. Το SCG περιέχει πρόσθετες ενώσεις που περιέχουν άζωτο, όπως καφεΐνη, τριγωνελίνη, ελεύθερες αμίνες και αμινοξέα, οι οποίες μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν (Mussato et al., 2011). Ευτυχώς, τα τελευταία χρόνια, έχει υπάρξει μια αλλαγή στην αντίληψη αυτού του υπολείμματος, το οποίο δεν θεωρείται πλέον εξ ολοκλήρου ως "απόβλητο". Αντίθετα, αναγνωρίζεται η δυνατότητά του να παράγει βιοενέργεια ή να δημιουργεί αγαθά προστιθέμενης αξίας από τις ενώσεις που περιέχει. Η έννοια της κυκλικής οικονομίας έχει αποκτήσει ιδιαίτερη σημασία την τελευταία δεκαετία, οδηγώντας σε μεγαλύτερη διερεύνηση από την επιστημονική κοινότητα των εναλλακτικών εφαρμογών του SCG (Zabaniotou and Kamaterou 2019).

3. Υπάρχουσες μέθοδοι αξιοποίησης των υπολειμμάτων του καφέ

Ο καφές είναι το δεύτερο μεγαλύτερο εμπόρευμα στον κόσμο, που ξεπερνά μόνο το αργό πετρέλαιο, και η επεξεργασία του παράγει σημαντικά υποπροϊόντα και υπολείμματα από τον καρπό μέχρι το φλιτζάνι. Σημαντικά υποπροϊόντα της βιομηχανίας καφέ, όπως φλοιός, φλούδες και πολτός, αποτελούν σχεδόν το 45% του κερασιού του καφέ. Αυτά τα υποπροϊόντα είναι πλούσια σε οργανικές ενώσεις, όπως κυτταρίνη, ημικυτταρίνη, πρωτεΐνες, σάκχαρα, χλωρογενικό οξύ και πολυφαινόλες. Οι πρόσφατες εξελίξεις έχουν επικεντρωθεί στη βιώσιμη διαχείριση των αποβλήτων του καφέ και στην ανάπτυξη εναλλακτικών προϊόντων με προστιθέμενη αξία. Ένα αξιοσημείωτο παραπροϊόν της διαδικασίας παρασκευής καφέ είναι τα χρησιμοποιημένα υπολείμματα καφέ (SCG), τα οποία είναι από τα πλέον απορριπτόμενα απόβλητα παγκοσμίως. Η επαναχρησιμοποίηση των SCG έχει τη δυνατότητα παραγωγής υψηλής ποιότητας κομπόστ και διάφορες μελέτες έχουν διερευνήσει τη μετατροπή τους σε προϊόντα προστιθέμενης αξίας, όπως ένζυμα, οργανικά οξέα, ενώσεις γεύσης και αρώματος και μανιτάρια (Emmanuel et al., 2017).

Τα υπολείμματα του καφέ, που αποτελούνται κυρίως από χρησιμοποιημένο κατακάθι καφέ και φλοιούς καφέ, είναι ένα άφθονο υποπροϊόν της παραγωγής και της κατανάλωσης καφέ. Αυτά τα υπολείμματα παραδοσιακά θεωρούνταν απόβλητα, αλλά οι πρόσφατες εξελίξεις στην έρευνα και την τεχνολογία έχουν αποκαλύψει πολυάριθμες εφαρμογές σε διάφορους τομείς. Η παρούσα ενότητα διερευνά τις τρέχουσες χρήσεις των υπολειμμάτων καφέ στη γεωργία, την παραγωγή ενέργειας και τις βιομηχανικές εφαρμογές.

Η αξιοποίηση των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας είναι ζωτικής σημασίας για την επίτευξη καθολικής βιωσιμότητας και τη μείωση της περιβαλλοντικής ρύπανσης. Από αυτή την άποψη, διάφορες βιομηχανίες, συμπεριλαμβανομένων των κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων, των βιοπολυμερών, των βιοκαυσίμων, των τροφίμων (όπως αντιοξειδωτικά, διαιτητικές ίνες, πηκτωματοποιητές, ολιγοσακχαρίτες, πηκτίνη, χρωστικές ουσίες, βιταμίνες κ.λπ.) και των φαρμακευτικών προϊόντων, έχουν στραφεί όλο και περισσότερο προς τους βιώσιμους, ανανεώσιμους, φιλικούς προς το περιβάλλον και οικονομικά αποδοτικούς πόρους που προέρχονται από τα χρησιμοποιημένα κατακάθια καφέ (SCG) και τα υποπροϊόντα τους (Karmee, 2018 - Nguyen et al., 2019).

Ο καφές είναι ένα από τα πιο ευρέως καταναλισκόμενα μη αλκοολούχα ποτά παγκοσμίως, με δύο κύριες ποικιλίες: *Coffea robusta* ή *Coffea canephora* (που αποτελεί το

25% της παγκόσμιας παραγωγής) και *Coffea arabica* (που αποτελεί το 75% της παγκόσμιας παραγωγής). Οι ποικιλίες αυτές επεξεργάζονται με ξηρές ή υγρές μεθόδους. Η *Coffea arabica* θεωρείται συνήθως ανώτερη λόγω του λεπτού αρώματος, της υψηλής οξύτητας και της γεύσης που μοιάζει με κρασί. Καλλιεργείται σε τροπικές περιοχές σε μεγάλα υψόμετρα (>1500 m πάνω από το επίπεδο της θάλασσας). Ωστόσο, η καλλιέργειά του είναι πιο δύσκολη, αποδίδει λιγότερους κόκκους και είναι πιο ακριβή. Αντίθετα, η *Coffea robusta*, γνωστή για την έντονη, κοκκώδη γεύση της που μοιάζει με τα φιστίκια, καλλιεργείται ευκολότερα σε χαμηλότερα υψόμετρα (0-800 m πάνω από το επίπεδο της θάλασσας), σε θερμότερα κλίματα και σε συνθήκες χαμηλής υγρασίας, γεγονός που την καθιστά φθηνότερη από την *Coffea arabica*. Και οι δύο ποικιλίες περιέχουν υψηλά επίπεδα πτητικών οργανικών ενώσεων (VOC), με σχεδόν 20 διαφορετικά χημικά συστατικά (Dattatraya Saratale et al., 2020).

3.1. Γεωργία

Μια από τις πιο σημαντικές χρήσεις των υπολειμμάτων καφέ είναι στη γεωργία, όπου χρησιμοποιούνται ως κομπόστ και λίπασμα. Τα υπολείμματα καφέ είναι πλούσια σε οργανική ύλη και βασικά θρεπτικά συστατικά όπως άζωτο, φώσφορο και κάλιο, καθιστώντας τα ένα εξαιρετικό πρόσθετο για τη βελτίωση της υγείας και της γονιμότητας του εδάφους.

Η επεξεργασία του καφέ σε διάφορα στάδια παράγει διάφορα κατάλοιπα, συμπεριλαμβανομένων των χρησιμοποιημένων καταλοίπων καφέ (SCG) (Mata et al., 2018). Παραδοσιακά, τα υποπροϊόντα του καφέ, όπως ο πολτός και ο φλοιός, παράγονται σε μεγάλες ποσότητες, ενώ μόνο ένα μικρό μέρος χρησιμοποιείται για κομπόστ, λιπάσματα, ζωοτροφές και άλλες εφαρμογές (Murthy & Naidu, 2012). Οι φλοιοί του καφέ είναι ιδιαίτερα κατάλληλοι για βερμικό-κομποστοποίηση λόγω της εξαιρετικής ικανότητας συγκράτησης υγρασίας, η οποία ενισχύει τη γονιμότητα του εδάφους (Sanchez-Hernandez & Domínguez, 2017- Zhang & Sun, 2017). Σύμφωνα με τους Murthy και Naidu (2012), από 350.000 τόνους πολτού καφέ μπορούν να ληφθούν περίπου 87.000 τόνοι οργανικής κοπριάς, οι οποίοι μπορούν να χρησιμοποιηθούν σε φυτώρια καφέ για την προώθηση της περιβαλλοντικής βιωσιμότητας και τη δημιουργία εισοδήματος.

Οι Leifa et al. (2001) πρωτοστάτησαν στη χρήση των υπολειμμάτων της βιομηχανίας καφέ για την καλλιέργεια μανιταριών, καλλιεργώντας με επιτυχία διάφορα είδη μανιταριών. Οι Murthy και Manonmani (2008) κατέδειξαν περαιτέρω την καλλιέργεια των *Flammulina velutipes*, *Lentinula edodes* και *Pleurotus florida* χρησιμοποιώντας υπολείμματα καφέ μέσω

ζύμωσης στερεάς κατάστασης (solid-state fermentation - SSF) σε θερμοκρασία περιβάλλοντος δωματίου (25-27°C).

Πρόσφατες μελέτες έχουν καταδείξει τις εξαιρετικές δυνατότητες των χρησιμοποιημένων κατακάθια καφέ (SCG) για χρήση στη γεωργία, λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε θρεπτικά συστατικά και του χαμηλού κινδύνου μόλυνσης από βαρέα μέταλλα. Κατά συνέπεια, τα SCGs έχουν αναφερθεί ως αποτελεσματικές εδαφοβελτιωτικές ουσίες και επιφανειακά σκευάσματα που βελτιώνουν την ποιότητα του εδάφους και ελέγχουν τα ζιζάνια. Επιπλέον, η κομποστοποίηση των SCGs με ζωική κοπριά και άλλα απόβλητα μπορεί να βελτιώσει την ποιότητα του εδάφους, να προωθήσει την ανάπτυξη των φυτών και να αποτρέψει τη δηλητηρίαση του εδάφους (Bomfim et al., 2022).

Ενώ τα κατακάθια καφέ παρέχουν μικρές ποσότητες καλίου, φωσφόρου, ασβεστίου, μαγνησίου και ίχνη σιδήρου, χαλκού, μαγγανίου και ψευδαργύρου, τα θρεπτικά αυτά συστατικά δεν είναι πάντα διαθέσιμα σε επαρκείς ποσότητες για να καλύψουν τις θρεπτικές ανάγκες των φυτών. Το πρωταρχικό όφελος από το κατακάθι του καφέ έγκειται στην ικανότητά του να ενισχύει τη δομή του εδάφους. Καθώς οι κατακάθια καφέ τρέφουν τα μικρόβια του εδάφους, απελευθερώνονται μικροβιακές κόλλες, που προάγουν την καλή δομή του εδάφους και βελτιώνουν την αποστράγγιση. Για την τροποποίηση του εδάφους, συνίσταται η ενσωμάτωση ενός στρώματος μισής ίντσας κατακάθια καφέ σε βάθος τεσσάρων ιντσών. Όταν χρησιμοποιείται ως εδαφοκάλυψη στην επιφάνεια του εδάφους, η κάλυψη των κατακάθων με ένα στρώμα φύλλων ή φλοιού βοηθά στην αποτροπή της ξήρανσης και της υδροφοβίας τους (Pokorny, 2023).

Μία από τις βασικές δομικές βελτιώσεις που επιφέρει ο κατακάθι του καφέ είναι ο ενισχυμένος αερισμός του εδάφους. Η μικρή, κοκκώδης φύση του κατακάθιου καφέ βοηθά στη δημιουργία μικροσκοπικών θυλάκων αέρα μέσα στο έδαφος. Αυτοί οι θύλακες είναι απαραίτητοι για την αναπνοή των ριζών, επιτρέποντας στις ρίζες να αναπνέουν, να αναπτύσσονται και να απορροφούν αποτελεσματικότερα τα θρεπτικά συστατικά. Ο σωστός αερισμός είναι ζωτικής σημασίας για την πρόληψη της συμπίεσης του εδάφους, ένα κοινό πρόβλημα σε αγροτικές εκτάσεις που χρησιμοποιούνται σε μεγάλο βαθμό. Το συμπίεσμένο έδαφος μπορεί να εμποδίσει την ανάπτυξη των ριζών και να μειώσει την αποτελεσματικότητα της απορρόφησης νερού και θρεπτικών στοιχείων. Βελτιώνοντας τον αερισμό του εδάφους, το κατακάθι του καφέ συμβάλλει στη δημιουργία ενός περιβάλλοντος όπου οι ρίζες μπορούν να ευδοκιμήσουν, οδηγώντας σε πιο υγιή και εύρωστα φυτά. Εκτός από τον αερισμό, το κατακάθι

του καφέ συμβάλλει επίσης στη βελτίωση της αποστράγγισης του εδάφους. Βοηθούν στη διάσπαση των πυκνών δομών του εδάφους, επιτρέποντας στο νερό να διηθείται πιο αποτελεσματικά μέσα στο έδαφος. Αυτή η βελτιωμένη αποστράγγιση αποτρέπει την υφαλμύρωση, μια κατάσταση που μπορεί να οδηγήσει σε σήψη των ριζών και άλλες ασθένειες των φυτών. Εξασφαλίζοντας την αποτελεσματική αποστράγγιση της περίσσειας του νερού, ο κατακάθι του καφέ συμβάλλει στη διατήρηση της ισορροπίας στα επίπεδα υγρασίας του εδάφους, που είναι ζωτικής σημασίας για την υγεία των φυτών (Brennan, 2024).

Ενώ βελτιώνει την αποστράγγιση, το κατακάθι του καφέ παίζει επίσης έναν παράδοξο ρόλο στην ενίσχυση της συγκράτησης του νερού στο έδαφος. Αυτή η διπλή ικανότητα είναι ευεργετική, ιδίως κατά τη διάρκεια ξηρών περιόδων. Η οργανική ύλη του καφέ έχει εξαιρετική ικανότητα να συγκρατεί την υγρασία, απελευθερώνοντάς την αργά με την πάροδο του χρόνου. Αυτή η ιδιότητα εξασφαλίζει ότι τα φυτά έχουν πρόσβαση σε νερό μεταξύ των κύκλων ποτίσματος ή βροχόπτωσης, καθιστώντας τα πιο ανθεκτικά σε συνθήκες ξηρασίας. Η ικανότητα συγκράτησης του νερού είναι ιδιαίτερα επωφελής στα συστήματα αναγεννητικής γεωργίας, όπου η διατήρηση και η αποδοτική χρήση του νερού αποτελούν βασικές αρχές. Οι δομικές βελτιώσεις στο έδαφος που επιφέρει η προσθήκη κατακάθων καφέ είναι μια ουσιαστική πτυχή της αξίας τους στο κομπόστ. Ενισχύοντας τον αερισμό, την αποστράγγιση και τη συγκράτηση νερού, οι κατακάθια καφέ συμβάλλουν στη δημιουργία ενός εδαφικού περιβάλλοντος που είναι υγιές, ανθεκτικό και ευνοεί τις αρχές της βιώσιμης και αναγεννητικής γεωργίας. Αυτό, με τη σειρά του, οδηγεί σε υγιέστερα φυτά και σε ένα πιο παραγωγικό και βιώσιμο οικοσύστημα αγροκτήματος (Brennan, 2024).

3.1.1 Κομποστοποίηση

Η ενσωμάτωση των κατακάθων του καφέ στο κομπόστ είναι κάτι περισσότερο από μια απλή προσπάθεια ανακύκλωσης. Είναι μια συνειδητή και στρατηγική επιλογή για τον εμπλουτισμό του εδάφους με μια φυσική, βιώσιμη και ισχυρή πηγή θρεπτικών συστατικών. Τα κατακάθια καφέ μπορούν να κομποστοποιηθούν μαζί με άλλα οργανικά απόβλητα. Η διαδικασία της κομποστοποίησης περιλαμβάνει την αποσύνθεση της οργανικής ύλης από μικροοργανισμούς, με αποτέλεσμα την παραγωγή πλούσιου σε θρεπτικά συστατικά κομπόστ. Η προσθήκη κατακάθων καφέ στους σωρούς κομποστοποίησης συμβάλλει στην επιτάχυνση της διαδικασίας αποσύνθεσης λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε άζωτο, η οποία

αποτελεί πηγή τροφής για τα μικρόβια κομποστοποίησης. Το κομπόστ που προκύπτει μπορεί να βελτιώσει σημαντικά τη δομή του εδάφους, τη συγκράτηση νερού και τη διαθεσιμότητα θρεπτικών συστατικών, προωθώντας την υγιέστερη ανάπτυξη των φυτών. Για τον μετριασμό των τοξικών συστατικών στα χρησιμοποιημένα κατακάθια καφέ (SCG), η κομποστοποίηση είναι απαραίτητη. Η κομποστοποίηση αποτελεί μια απλή και αποτελεσματική μέθοδο για τη μετατροπή των αποβλήτων σε σταθερό, μη τοξικό υλικό που εμπλουτίζει το έδαφος και υποστηρίζει τη θρέψη των φυτών. Συνήθως, οι εγκαταστάσεις κομποστοποίησης είναι εξοπλισμένες με μηχανισμούς θέρμανσης και ανάδευσης που διευκολύνουν τη βιοαποικοδόμηση της οργανικής ύλης από μικροοργανισμούς. Η διαδικασία αυτή λαμβάνει χώρα υπό ουδέτερες έως αλκαλικές συνθήκες σε μέτριες έως υψηλές θερμοκρασίες (40°C - 60°C) (Afriliana et al., 2021).

Πρωτίστως, το κατακάθι του καφέ είναι μια εξαιρετική πηγή αζώτου, ένα κρίσιμο στοιχείο για την ανάπτυξη και την υγεία των φυτών. Το άζωτο αποτελεί βασικό συστατικό της χλωροφύλλης, του μορίου που δίνει στα φυτά το πράσινο χρώμα τους και είναι απαραίτητο για τη φωτοσύνθεση. Διαδραματίζει επίσης ζωτικό ρόλο στη σύνθεση πρωτεϊνών, μια σημαντική διαδικασία για την ανάπτυξη και την αύξηση των φυτών. Στο κομπόστ, το άζωτο των κατακάθων καφέ γίνεται διαθέσιμο στα φυτά, παρέχοντάς τους το απαραίτητο θρεπτικό συστατικό για να αναπτυχθούν εύρωστα και υγιή. Αυτό είναι ιδιαίτερα ευεργετικό στις πρακτικές αναγεννητικής γεωργίας, όπου η διατήρηση της γονιμότητας του εδάφους χωρίς συνθετικά λιπάσματα είναι υψίστης σημασίας (Brennan, 2024).

Είναι επίσης πλούσια σε βασικά μικροθρεπτικά συστατικά που διαδραματίζουν ζωτικό ρόλο στην υγεία των φυτών. Το κάλιο, που βρίσκεται στο κατακάθι του καφέ, είναι ζωτικής σημασίας για τη συνολική υγεία των φυτών. Βοηθά σε διάφορες φυτικές διεργασίες, συμπεριλαμβανομένης της φωτοσύνθεσης, της απορρόφησης θρεπτικών συστατικών και της ενεργοποίησης ενζύμων. Το μαγνήσιο, ένα άλλο βασικό συστατικό, αποτελεί κεντρικό στοιχείο του μορίου της χλωροφύλλης και επομένως είναι απαραίτητο για τη φωτοσύνθεση. Το ασβέστιο, που επίσης υπάρχει στο κατακάθι του καφέ, είναι ζωτικής σημασίας για τη δομή και τη σταθερότητα του κυτταρικού τοιχώματος, εξασφαλίζοντας ότι τα φυτά διατηρούν τη δομή και τη δύναμή τους. Αυτά τα μικροθρεπτικά συστατικά, που συχνά παραβλέπονται, είναι αναπόσπαστα για την υγιή ανάπτυξη των φυτών και η παρουσία τους στο κατακάθι του καφέ τα καθιστά ανεκτίμητη προσθήκη στο κομπόστ (Brennan, 2024).

Έρευνες έδειξαν ότι οι τροποποιήσεις με κομπόστ με βάση τον κήπο, υπολείμματα αποστακτηρίων και κομπόστ με βάση τα SCG μπορούν να ενισχύσουν την περιεκτικότητα σε αντιοξειδωτικά στο μαρούλι (Nicoletto et al., 2014). Η ενσωμάτωση του βιοάνθρακα στη διαδικασία κομποστοποίησης προσφέρει πολλά οφέλη, όπως μειωμένο χρόνο κομποστοποίησης και μειωμένες εκπομπές δυσοσμίας. Ο βιοάνθρακας μπορεί να απορροφήσει θρεπτικά συστατικά κατά τη διάρκεια της κομποστοποίησης χωρίς να υποστεί σημαντική αποικοδόμηση. Ο βιοάνθρακας αναγνωρίζεται για τη βιωσιμότητά του και την ικανότητά του να ενισχύει τη γονιμότητα του εδάφους λόγω των υψηλών επιπέδων οργανικής ύλης και θρεπτικών συστατικών όπως άζωτο, φώσφορο και ασβέστιο. Παρέχει ενδιαίτημα για τους μικροοργανισμούς του εδάφους, διευκολύνοντας την αποικοδόμηση της ασταθούς οργανικής και ανόργανης εδαφικής ύλης, ενώ παράλληλα διατηρεί την υγρασία και τα θρεπτικά συστατικά που είναι απαραίτητα για την ανάπτυξη των φυτών. Η αυξημένη μικροβιακή δραστηριότητα συμβάλλει επίσης στη σταθεροποίηση και τη γονιμότητα του εδάφους (Birk et al., 2008).

Η έρευνα για την κομποστοποίηση που διευκολύνεται από τη βιοενίσχυση έχει δείξει πολλά υποσχόμενα αποτελέσματα. Για παράδειγμα, αξιολογήθηκε η αποτελεσματικότητα της βιοενίσχυσης των μυκήτων λευκής σήψης στην κομποστοποίηση του εδάφους του φλογοθαλάμου για τον προσδιορισμό των καλύτερων στελεχών και μέσων διόγκωσης. Πρόσφατα, μια μελέτη με στόχο την επιλογή οργανισμών με βάση τις μεταβολικές δραστηριότητες για την αποτελεσματική βιοαύξηση της κομποστοποίησης εντόπισε πολλά εξαιρετικά δραστικά πιθανά είδη, συμπεριλαμβανομένων των *Streptomyces albus*, *Gibellulopsis nigrescens*, *Bacillus licheniformis*, *Bacillus smithii* και *Alternaria tenuissima* (Emmanuel et al., 2017).

3.1.2 Λίπασμα

Η άμεση εφαρμογή κατακάθων καφέ στο έδαφος είναι μια άλλη κοινή πρακτική. Το pH του εδάφους έτεινε να αυξάνεται με την τροποποίηση με SCG, ιδίως σε όξινες συνθήκες, επηρεάζοντας διαφορετικά τις αντιδράσεις των φυτών ανάλογα με τα είδη και τους τύπους εδάφους. Όταν χρησιμοποιείται ως λίπασμα, το κατακάθι του καφέ μπορεί να βελτιώσει την οξύτητα του εδάφους, γεγονός που είναι ευεργετικό για τα φυτά που αγαπούν την οξύτητα, όπως τα βατόμουρα, τα τριαντάφυλλα και οι ντομάτες. Επιπλέον, ο κατακάθι λειτουργεί ως

φυσικό απωθητικό παρασίτων, αποτρέποντας επιβλαβή έντομα όπως γυμνοσάλιαγκες και σαλιγκάρια. Έρευνες έχουν δείξει ότι το κατακάθι του καφέ μπορεί επίσης να ενισχύσει τη μικροβιακή δραστηριότητα στο έδαφος, συμβάλλοντας περαιτέρω στη γονιμότητα του εδάφους και την υγεία των φυτών. Η καταστολή των ζιζανίων ήταν αξιοσημείωτη με την εφαρμογή SCG, δείχνοντας μια θετική σχέση μεταξύ υψηλότερων ποσοτήτων SCG και μειωμένης κάλυψης ζιζανίων (Hardgrove & Livesley, 2016).

Ένα άλλο σημαντικό πλεονέκτημα της χρήσης κατακάθων καφέ στο κομπόστ είναι ο ρόλος τους ως λίπασμα βραδείας αποδέσμευσης. Σε αντίθεση με τα συνθετικά λιπάσματα που απελευθερώνουν τα θρεπτικά συστατικά γρήγορα και μερικές φορές μπορεί να κατακλύσουν και να βλάψουν τα φυτά, το κατακάθι του καφέ αποσυντίθεται σταδιακά. Αυτή η αργή αποσύνθεση εξασφαλίζει σταθερή παροχή θρεπτικών συστατικών με την πάροδο του χρόνου, παρέχοντας στα φυτά μια συνεπή και ισορροπημένη διατροφή. Αυτή η ιδιότητα αργής απελευθέρωσης είναι ιδιαίτερα επωφέλης στην αναγεννητική γεωργία, όπου στόχος είναι η βιώσιμη και μακροπρόθεσμη υγεία του εδάφους. Η συνεχής παροχή θρεπτικών συστατικών συμβάλλει στη διατήρηση της γονιμότητας του εδάφους, μειώνοντας την ανάγκη για εξωτερικές εισροές και προωθώντας ένα πιο αυτοσυντηρούμενο οικοσύστημα (Brennan, 2024).

3.1.3. Διατροφή των ζώων

Η αξιοποίηση των υπολειμματικών ρευμάτων από την αρχική επεξεργασία των καρπών του καφέ ως συμπλήρωμα στη διατροφή των ζώων θα μπορούσε να αποτελέσει μια ελκυστική εναλλακτική λύση λόγω του θρεπτικού τους πλούτου. Ωστόσο, οι εφαρμογές στη διατροφή των ζώων είναι περιορισμένες. Οι Pedraza-Beltrán και συν. (2011) διεξήγαγαν μια μελέτη για την αξιολόγηση των επιπτώσεων της ενσωμάτωσης διαφόρων ποσοστών πολτού καφέ στη διατροφή των αγελάδων γαλακτοπαραγωγής, συγκεκριμένα σε επίπεδα 10%, 15% και 20%. Οι ερευνητές παρατήρησαν και ανέλυσαν τις επιδράσεις στο σωματικό βάρος, την απόδοση και τη σύνθεση του γάλακτος. Διαπίστωσαν ότι ο πολτός του καφέ θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί ως υποκατάστατο του 20% της παραδοσιακής τροφής χωρίς αξιοσημείωτες μεταβολές στους παράγοντες αυτούς, δεδομένων των συνθηκών της μελέτης. Επιπλέον, η Didanna (2014) τεκμηρίωσε τη σκοπιμότητα ενσωμάτωσης πολτού καφέ στις ζωοτροφές των αγελάδων, με συνιστώμενη αναλογία 10-30% κατά βάρος. Ωστόσο, ο συγγραφέας εξήγησε ότι

η ύπαρξη φαινολικών χημικών ουσιών είχε ως αποτέλεσμα την ελάχιστη αύξηση του βάρους στα μηρυκαστικά, υποδεικνύοντας επομένως ότι δεν θα πρέπει να συνιστάται η χρήση υψηλότερων ποσοστών. Όταν τα πτηνά εκτέθηκαν σε απόβλητα καφέ που αποτελούσαν περισσότερο από το 10% της διατροφής τους, παρουσίασαν τοξικά συμπτώματα. Ωστόσο, η προσθήκη 13% αποβλήτων καφέ δεν είχε καμία επίδραση στην ανάπτυξη των ψαριών *Tilapia*. Πιο συγκεκριμένα, τα επίπεδα καφεΐνης που κυμαίνονταν από 2,4 έως 4,6 g/kg οδήγησαν σε μειωμένη πεπτικότητα των θρεπτικών συστατικών κυρίως λόγω της παρουσίας αντιθρεπτικών στοιχείων που μπορούν να επηρεάσουν αρνητικά τη γεύση και την επιθυμητότητα του πολτού. Τα αντιθρεπτικά χημικά στοιχεία, όπως οι τανίνες, άλλες πολυφαινόλες, η καφεΐνη και το κάλιο, μπορούν να είναι θανατηφόρα για τα μικρά είδη ζώων όταν υπάρχουν σε μεγάλες συγκεντρώσεις. Επιπλέον, έχουν την ικανότητα να προκαλούν θάνατο σε μηρυκαστικά ζώα που τρέφονται αποκλειστικά με πολύ καφέ ή όταν αυτός περιλαμβάνεται στη διατροφή τους σε μεγάλες αναλογίες. Πράγματι, έρευνες έχουν δείξει ότι η καφεΐνη μπορεί να ενισχύσει την κινητική δραστηριότητα και να αυξήσει τις ενεργειακές δαπάνες, οδηγώντας σε μείωση της αύξησης του βάρους. Αυτό, με τη σειρά του, έχει άμεσο αντίκτυπο στην παραγωγή κρέατος (Didanna, 2014).

Ωστόσο, οι Rathinavelu και Graziosi (2005) δήλωσαν ότι υπό κατάλληλες συνθήκες, το ενσίρωμα θα μπορούσε ενδεχομένως να χρησιμεύσει ως εναλλακτική λύση για τη μετατροπή χημικών ουσιών που θεωρούνται «αντιθρεπτικές». Το τελικό προϊόν που λαμβάνεται από τη διαδικασία ζύμωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί για ζώα με διαφορετικά γαστρικά χαρακτηριστικά (μονογαστρικά και πολυγαστρικά ζώα), καθώς και στην υδατοκαλλιέργεια. Επιπλέον, μπορεί να χρησιμεύσει ως υπόστρωμα για την ανάπτυξη ορισμένων φυτικών ειδών σε συγκεκριμένες περιπτώσεις. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, λαμβάνοντας υπόψη το πλεονεκτικό στοιχείο του κόστους, δεδομένου ότι η δαπάνη για την ενσίρωση είναι μικρή και τα πλεονεκτήματά της για το τελικό προϊόν είναι δυνητικά ελκυστικά, το καταλληλότερο μείγμα αποβλήτων και υποπροϊόντων καφέ βασίζεται στα μοναδικά χαρακτηριστικά κάθε είδους ζώου. Παρ' όλα αυτά, είναι επιτακτική ανάγκη να διεξαχθούν περαιτέρω *in vitro* και *in vivo* έρευνες για την ενδελεχή αξιολόγηση της γαστρεντερικής δυναμικής και των επιπτώσεων της ελεγχόμενης κατανάλωσης ορισμένων αντιθρεπτικών χημικών ουσιών (όπως ο καφές και οι τανίνες). Επιπλέον, είναι απαραίτητο να δημιουργηθούν διαφορετικές επιλογές στην ανάπτυξη των τροφίμων για να διευκρινιστεί και να διαπιστωθεί εάν μπορούν να επινοηθούν διαδικασίες υδρόλυσης ή επεξεργασίας για τη μείωση των αρνητικών επιπτώσεων των αντιθρεπτικών ουσιών. Αυτό θα επέτρεπε την

ευρύτερη αξιοποίηση των αποβλήτων καφέ και των υποπροϊόντων που προκύπτουν από την αρχική επεξεργασία..

3.2 Παραγωγή ενέργειας

Σε παγκόσμιο επίπεδο, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον μεταξύ των ερευνητών και των βιομηχανιών για τη χρήση ανανεώσιμων πόρων για την παραγωγή χημικών ουσιών και καυσίμων ως εναλλακτικές λύσεις για τα προϊόντα με βάση το πετρέλαιο. Το βιοντίζελ που προέρχεται από SCG έχει πολλά πλεονεκτήματα, συμπεριλαμβανομένης της σταθερότητας, λόγω των φυσικών αντιοξειδωτικών και φαινολικών του, τα οποία αποτρέπουν την οξείδωση κατά την αποθήκευση και τη μεταφορά (Todaka et al., 2018). Οι Kondamudi et al. (2008) υπολόγισαν ότι περίπου 340 εκατομμύρια γαλόνια βιοντίζελ έχουν παραχθεί από SCG παγκοσμίως. Η μετεστεροποίηση είναι μια γνωστή διαδικασία για τη μετατροπή ελαίων που προέρχονται από βιομάζα σε βιοντίζελ. Ωστόσο, η μεγάλης κλίμακας μετατροπή του SCG σε βιοντίζελ αντιμετωπίζει περιορισμούς, όπως η υψηλή περιεκτικότητα σε μη σαπωνοποιήσιμα υλικά (40%), η χαμηλή περιεκτικότητα σε λιπίδια (~7-13 wt%), ο υψηλότερος ρυθμός θέρμανσης (HHT: 19,0-26,9 MJ/kg) και η υψηλή περιεκτικότητα σε υγρασία (~1,18-65,70%). Παράγοντες όπως η επιλογή κατάλληλων μεθοδολογιών εκχύλισης λιπιδίων, η επιλογή κατάλληλων διαλυτών (προτιμάται η μεθανόλη έναντι της αιθανόλης) και η βελτιστοποίηση των διεργασιών μετατροπής (όξινη εστεροποίηση ακολουθούμενη από αλκαλική μετεστεροποίηση, ενζυμικές διεργασίες ή in-situ μετεστεροποίηση) είναι κρίσιμοι για τη βελτίωση της συνολικής απόδοσης της διεργασίας (Mata et al., 2018). Οι Tuntiwattananapun et al. (2017) ανέφεραν παραγωγή βιοντίζελ μεγάλης κλίμακας από SCG (4 kg) μέσω in-situ μετεστεροποίησης σε δύο παρτίδες, επιτυγχάνοντας αποδόσεις 80,7 % και 83,0 % (% μάζας, με βάση το έλαιο SCG) σε διπλές παρτίδες πιλοτικής κλίμακας με τη χρήση βραστήρα με μανδύα 38 L και αναδευτήρα.

Η υψηλή οργανική περιεκτικότητα των υπολειμμάτων καφέ τα καθιστά πολύτιμο πόρο για την παραγωγή ενέργειας, ιδίως για την παραγωγή βιοκαυσίμων και βιοαερίου.

3.2.1 Βιοκαύσιμα

Τα χρησιμοποιημένα υπολείμματα καφέ περιέχουν σημαντικές ποσότητες ελαίου, το οποίο μπορεί να εξαχθεί και να μετατραπεί σε βιοντίζελ. Η διαδικασία περιλαμβάνει μετεστεροποίηση, όπου το λάδι του καφέ αντιδρά με αλκοόλη παρουσία καταλύτη για την παραγωγή βιοντίζελ και γλυκερίνης. Το βιοντίζελ που προέρχεται από κατακάθια καφέ έχει ιδιότητες παρόμοιες με το συμβατικό ντίζελ και μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως ανανεώσιμο εναλλακτικό καύσιμο. Η μέθοδος αυτή όχι μόνο παρέχει μια βιώσιμη πηγή ενέργειας, αλλά συμβάλλει επίσης στη μείωση των περιβαλλοντικών επιπτώσεων από τη διάθεση των αποβλήτων καφέ. Τα τελευταία χρόνια, υπάρχει αυξανόμενο ενδιαφέρον για τη χρήση των χρησιμοποιημένων κατακάθων καφέ (SCG) για την παραγωγή βιοντίζελ, με στόχο τη μείωση των αποβλήτων. Ο καφές, ως το δεύτερο μεγαλύτερο εμπορεύσιμο αγαθό στον κόσμο, είχε μια παραγωγή που εκτιμάται σε 9,34 εκατομμύρια τόνους το 2016/2017. Η εκχύλιση του ελαίου καφέ από το SCG και τους ελαττωματικούς κόκκους καφέ έχει αποδειχθεί ότι είναι μια υψηλής ποιότητας και οικονομικά αποδοτική πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοντίζελ μέσω μετεστεροποίησης, ιδίως σε σύγκριση με άλλες πηγές αποβλήτων. Αυτό το λάδι καφέ είναι λιγότερο ακριβό, παρουσιάζει ανώτερη σταθερότητα λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς του σε αντιοξειδωτικά και έχει ευχάριστο άρωμα. Ωστόσο, το βιοντίζελ που προέρχεται από εστέρες αντιμετωπίζει αρκετές προκλήσεις, όπως η υπερβολική παραγωγή γλυκερόλης, το χαμηλότερο ενεργειακό περιεχόμενο, η μειωμένη οξειδωτική σταθερότητα και τα πιθανά προβλήματα από τη βύθιση της δεξαμενής στον κινητήρα. Επιπλέον, λόγω του μοριακού οξυγόνου που υπάρχει στη δομή του βιοντίζελ, μόνο περίπου 7-10% κατά βάρος μπορεί να αναμιχθεί σε μη τροποποιημένους κινητήρες ντίζελ. Η περιεκτικότητα σε λάδι στις πηγές καφέ ποικίλλει και κυμαίνεται από 11-20% κατά βάρος ανάλογα με τον τύπο. Οι ελαττωματικοί κόκκοι καφέ αποδίδουν περίπου 10-12% έλαιο σε ξηρό βάρος, ενώ τα SCG περιέχουν συνήθως 10-15% έλαιο. Υποθέτοντας μια μέση περιεκτικότητα σε λάδι 16% στα SCG, σημαντικές ποσότητες βιοντίζελ θα μπορούσαν δυνητικά να παραχθούν ετησίως από αυτή την πηγή. Το λάδι καφέ θεωρείται μια πολλά υποσχόμενη, χαμηλού κόστους πρώτη ύλη για την παραγωγή βιοντίζελ (Phimsen et al., 2016).

Η διαδικασία παραγωγής βιοντίζελ από τα απόβλητα του αλεσμένου λαδιού καφέ περιλαμβάνει τη συλλογή και μεταφορά του υπολείμματος καφέ, ακολουθούμενη από ξήρανση, εκχύλιση λαδιού και, τέλος, παραγωγή βιοντίζελ μέσω μετεστεροποίησης. Η μετεστεροποίηση, που περιλαμβάνει την αντίδραση των ελαίων με αλκοόλες, είναι η προτιμώμενη μέθοδος για την παραγωγή βιοντίζελ. Έχουν χρησιμοποιηθεί διάφορες αλκοόλες, όπως μεθανόλη, αιθανόλη, προπανόλη και βουτανόλη. Η αντίδραση αυτή μπορεί να

πραγματοποιηθεί μέσω μη καταλυτικών ή καταλυτικών διεργασιών, με τις καταλυτικές μεθόδους να ενισχύουν σημαντικά τους ρυθμούς αντίδρασης και τις αποδόσεις. Οι καταλύτες που χρησιμοποιούνται για την παραγωγή βιοντίζελ περιλαμβάνουν ομογενείς καταλύτες, ετερογενείς καταλύτες και βιοκαταλύτες (ένζυμα). Αρκετές κρίσιμες παράμετροι, όπως η θερμοκρασία και ο χρόνος αντίδρασης, η περιεκτικότητα του ελαίου σε ελεύθερα λιπαρά οξέα και νερό, ο τύπος και η ποσότητα του καταλύτη, η μοριακή αναλογία αλκοόλης προς το έλαιο, ο τύπος της αλκοόλης, η χρήση συνδιαλυτών και η ένταση της ανάμιξης, επηρεάζουν βαθιά τη μετατροπή και την απόδοση του βιοντίζελ. Η μετεστεροποίηση είναι μια αντιστρεπτή αντίδραση που περιλαμβάνει τρία διαδοχικά στάδια όπου τα τριγλυκερίδια μετατρέπονται σε διγλυκερίδια, στη συνέχεια σε μονογλυκερίδια και τέλος σε εστέρες (βιοντίζελ) και γλυκερόλη ως παραπροϊόν (Blinová et al., 2017).

3.2.2 Βιοαέριο

Τα υπολείμματα καφέ μπορούν επίσης να χρησιμοποιηθούν σε αναερόβια χώνευση για την παραγωγή βιοαερίου, ενός μείγματος μεθανίου και διοξειδίου του άνθρακα. Η αναερόβια χώνευση είναι μια διαδικασία κατά την οποία οι μικροοργανισμοί διασπούν την οργανική ύλη απουσία οξυγόνου, με αποτέλεσμα την παραγωγή βιοαερίου. Αυτό το βιοαέριο μπορεί να συλλεχθεί και να χρησιμοποιηθεί για θέρμανση, παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας ή ως καύσιμο οχημάτων. Το στερεό υποπροϊόν της αναερόβιας χώνευσης, γνωστό ως χωνεμένο υπόλειμμα, μπορεί να χρησιμοποιηθεί περαιτέρω ως εδαφοβελτιωτικό πλούσιο σε θρεπτικά συστατικά. Η αξιοποίηση των υπολειμμάτων του καφέ για την παραγωγή βιοαερίου προσφέρει διπλό όφελος: μείωση των αποβλήτων και παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας. Ειδικότερα, τα απόβλητα και τα υποπροϊόντα που σχετίζονται με την παραγωγή και την κατανάλωση καφέ μπορούν να χρησιμεύσουν ως πρώτη ύλη για την παραγωγή αερίων βιοκαυσίμων. Τα κατακάθια του καφέ, πλούσια σε υδατάνθρακες, πρωτεΐνες και λίπη, είναι ιδιαίτερα κατάλληλα για την παραγωγή βιοαερίου. Η κατακερματισμένη φύση τους εξαλείφει την ανάγκη για προεπεξεργασία, μειώνοντας το κόστος και τον χρόνο προετοιμασίας. Επιπλέον, τα κατακάθια καφέ διαχωρίζονται εύκολα από άλλα απόβλητα αμέσως μετά την παρασκευή, εξασφαλίζοντας ένα καθαρότερο υπόστρωμα για τη ζύμωση, γεγονός που απλοποιεί την παρακολούθηση κατά τη διάρκεια της διαδικασίας. Εκτός από την υψηλή περιεκτικότητά τους σε λιγνίνη και οργανικά συστατικά, τα κατακάθια καφέ διαθέτουν βέλτιστη αναλογία άνθρακα

προς άζωτο, η οποία προηγουμένως πλεονεκτούσε για τη χρήση τους ως λίπασμα. Παρά το γεγονός ότι περιέχουν δυνητικά ανασταλτικές ενώσεις όπως η καφεΐνη και οι πολυφαινόλες, αυτές δεν εμποδίζουν τη διαδικασία της αναερόβιας χώνευσης. Το παραγόμενο βιοαέριο χαρακτηρίζεται ως ανανεώσιμη πηγή ενέργειας, καθιστώντας την τεχνολογία παραγωγής μεθανίου βιώσιμη για διάφορα απόβλητα του γεωργικού τομέα και του τομέα των τροφίμων, ιδίως εν μέσω της αύξησης των τιμών του φυσικού αερίου. Επιπλέον, το χωνεμένο υπόλειμμα που παράγεται από την αναερόβια χώνευση μπορεί να υποκαταστήσει αποτελεσματικά τα ορυκτά λιπάσματα, συμβάλλοντας σε βιώσιμες γεωργικές πρακτικές (Czekala et al., 2023).

3.3 Βιομηχανικές εφαρμογές

Πέρα από τη σημαντική συμβολή τους στους τομείς της γεωργίας και της ενέργειας, τα υπολείμματα καφέ κερδίζουν την προσοχή για τις ευέλικτες εφαρμογές τους σε διάφορες βιομηχανικές διεργασίες. Δύο αξιοσημείωτες εφαρμογές περιλαμβάνουν την παραγωγή βιοπλαστικών και προσροφητικών ουσιών, οι οποίες αναδεικνύουν τη δυνατότητα των υπολειμμάτων καφέ να υποστηρίξουν τη βιώσιμη ανάπτυξη και τη διατήρηση του περιβάλλοντος.

3.3.1 Βιοπλαστικά

Η βιομηχανία πλαστικών κινείται ολοένα και περισσότερο προς πιο βιώσιμες πρακτικές, με στόχο τη μείωση της εξάρτησής της από τους ορυκτούς πόρους. Μια προσέγγιση που κερδίζει έδαφος περιλαμβάνει τη χρήση οργανικών γεωργικών αποβλήτων ως πληρωτικών υλικών στα πλαστικά, μειώνοντας έτσι τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις που συνδέονται με την εξόρυξη μη βιώσιμων ανόργανων πληρωτικών υλικών, όπως το τάλκη και το ασβέστιο. Τα οργανικά πληρωτικά μπορούν επίσης να ενσωματωθούν σε βιοδιασπώμενα και κομποστοποιήσιμα πολυμερή για τη δημιουργία σύγχρονων βιοσύνθετων υλικών. Η πρόκληση της περιορισμένης προσφοράς και του υψηλότερου κόστους των βιοπλαστικών μπορεί να αντιμετωπιστεί με την ενσωμάτωση φθηνών πληρωτικών υλικών, όπως τα χρησιμοποιημένα κατακάθια καφέ (SCG). Ωστόσο, η επίτευξη βέλτιστων επιδόσεων με παράλληλη μεγιστοποίηση του ποσοστού των φυσικών πληρωτικών υλικών παραμένει ζωτικής σημασίας.

Μελέτες έχουν δείξει ότι η επεξεργασία των βιοσύνθετων υλικών καθίσταται δύσκολη πέραν των ποσοστών φόρτωσης πληρωτικού υλικού 50-60 κ.β. Τα υψηλά επίπεδα υδρόφιλων πληρωτικών σε μια υδρόφοβη πολυμερική μήτρα μπορεί να οδηγήσουν σε συσσωμάτωση, μειωμένη απόδοση του υλικού και αυξημένη απορρόφηση νερού (Ingrao et al., 2022).

Η αυξανόμενη ζήτηση για βιώσιμα υλικά έχει οδηγήσει στη διερεύνηση των υπολειμμάτων καφέ ως πρώτη ύλη για βιοπλαστικά. Τα βιοπλαστικά που παρασκευάζονται από κατακάθια καφέ είναι βιοδιασπώμενα και μπορούν να χρησιμεύσουν ως φιλική προς το περιβάλλον εναλλακτική λύση στα συμβατικά πλαστικά. Η διαδικασία περιλαμβάνει την ανάμειξη κατακάθων καφέ με βιοδιασπώμενα πολυμερή για τη δημιουργία σύνθετων υλικών που μπορούν να μορφοποιηθούν σε διάφορα σχήματα και προϊόντα. Αυτά τα βιοπλαστικά υλικά είναι κατάλληλα για μια σειρά εφαρμογών, από συσκευασίες έως καταναλωτικά αγαθά, και συμβάλλουν στη μείωση της ρύπανσης από πλαστικά (Ingrao et al., 2022).

Το βιοπλαστικό που προέρχεται από κατακάθια καφέ είναι ένα νέο υλικό που αποτελείται από φυσικά συστατικά, συγκεκριμένα χρησιμοποιημένα κατακάθια καφέ, τα οποία επιλέγονται και επεξεργάζονται σχολαστικά για τη δημιουργία μιας βιώσιμης εναλλακτικής λύσης. Μέσω επιστημονικών μεθόδων και ανάμειξης με άλλα υλικά, οι ερευνητές μετατρέπουν αυτά τα φαινομενικά συνηθισμένα υπολείμματα καφέ σε ανανεώσιμα βιοπολυμερή που είναι ωφέλιμα για τη διατήρηση του περιβάλλοντος. Τα βιοπλαστικά από κατακάθια καφέ παρουσιάζουν βέλτιστη βιοδιασπασιμότητα με την πάροδο του χρόνου, προσφέροντας φιλικότητα προς το περιβάλλον και ελαχιστοποιώντας τις δυσμενείς επιπτώσεις στα φυσικά οικοσυστήματα και την ανθρώπινη υγεία. Η επιλογή των κατακάθων καφέ για την παραγωγή βιοπλαστικών πηγάζει από τη σημαντική παγκόσμια κατανάλωση καφέ, η οποία έχει ως αποτέλεσμα περισσότερους από έξι εκατομμύρια τόνους κατακάθων καφέ ετησίως, με ένα σημαντικό μέρος τους να καταλήγει σήμερα σε χωματερές. Αυτό το άφθονο απόβλητο υλικό όχι μόνο παρουσιάζει μια ευκαιρία για επαναχρησιμοποίηση, αλλά αντιμετωπίζει επίσης το περιβαλλοντικό ζήτημα των εκπομπών μεθανίου από την αποσύνθεση των κατακάθων καφέ στις χωματερές. Παρά τις προσπάθειες για την κομποστοποίηση ορισμένων αποβλήτων καφέ, η πλειονότητα παραμένει ανεκμετάλλευτη, αναδεικνύοντας τις δυνατότητες των κατακάθων καφέ ως πολύτιμου πόρου για τη βιώσιμη παραγωγή υλικών (Huynh, 2023).

Διάφορες πρωτοβουλίες σε όλο τον κόσμο αποτελούν παράδειγμα καινοτόμων χρήσεων των καταλοίπων καφέ στην ανάπτυξη βιοπλαστικών. Για παράδειγμα, ερευνητές του Εθνικού Πανεπιστημίου της Γιοκοχάμα στην Ιαπωνία εξήγαγαν με επιτυχία νανοΐνες

κυτταρίνης από κατακάθια καφέ για τη δημιουργία βιοδιασπώμενων ποτηριών και καλαμακίων καφέ. Ομοίως, μια νεοφυής επιχείρηση στη Γερμανία, η Kaffeeform, συλλέγει χρησιμοποιημένα κατακάθια καφέ από καφετέριες στο Βερολίνο για να κατασκευάσει φιλικά προς το περιβάλλον ποτήρια καφέ, μειώνοντας την εξάρτηση από πλαστικά που βασίζονται σε ορυκτά. Στις Ηνωμένες Πολιτείες, ερευνητές του Πολιτειακού Πανεπιστημίου της Ουάσινγκτον έχουν ενισχύσει την ανθεκτικότητα των βιοδιασπώμενων πλαστικών με την ενσωμάτωση κατακάθων καφέ, ιδίως σε εφαρμογές τρισδιάστατης εκτύπωσης. Επιπλέον, στο Ηνωμένο Βασίλειο, μια μάρκα με την ονομασία That's Caffeine χρησιμοποιεί κατακάθια καφέ για την παραγωγή βιολογικών για εφαρμογές εσωτερικής διακόσμησης, προωθώντας τη βιωσιμότητα στον κατασκευαστικό κλάδο. Επιπλέον, το Βιετνάμ έχει επίσης εισέλθει στον στίβο με το πρώτο βιοπλαστικό από κατακάθι καφέ, συμβάλλοντας σε περιβαλλοντικές λύσεις μέσω της καινοτόμου επιστήμης των υλικών (Huynh, 2023).

3.3.2 Προσροφητικά

Η χρήση των κατακάθων του καφέ ως προσροφητικά παρουσιάζει πολλά σημαντικά πλεονεκτήματα, καθιστώντας τα ελκυστική επιλογή για διάφορες βιομηχανικές εφαρμογές. Ένα από τα πρωταρχικά πλεονεκτήματα είναι η αποδοτικότητά τους. Ως άφθονη και φθηνή πρώτη ύλη, τα κατακάθια καφέ προσφέρουν μια οικονομικά βιώσιμη πηγή για την παραγωγή ενεργού άνθρακα. Αυτή η αποδοτικότητα κόστους είναι ιδιαίτερα ελκυστική για εφαρμογές μεγάλης κλίμακας σε συστήματα καθαρισμού νερού και αέρα, όπου η ανάγκη για προσιτά και αποτελεσματικά προσροφητικά είναι κρίσιμη (Blinová & Sirotiak, 2019).

Τα κατακάθια καφέ έχουν δείξει μεγάλες δυνατότητες ως προσροφητικά για την απομάκρυνση ρύπων από το νερό και τον αέρα. Λόγω της πορώδους δομής τους και της μεγάλης επιφάνειάς τους, τα κατακάθια καφέ μπορούν να προσροφούν αποτελεσματικά βαρέα μέταλλα, χρωστικές ουσίες και άλλους ρύπους. Ο ενεργός άνθρακας που παρασκευάζεται από υπολείμματα καφέ είναι ιδιαίτερα αποτελεσματικός σε συστήματα καθαρισμού νερού και φιλτραρίσματος αέρα. Η εφαρμογή αυτή όχι μόνο βοηθά στη διαχείριση των αποβλήτων καφέ, αλλά αντιμετωπίζει και ζητήματα περιβαλλοντικής ρύπανσης παρέχοντας μια χαμηλού κόστους και βιώσιμη λύση για την απομάκρυνση των ρύπων. Τα SCG μπορούν να χρησιμοποιηθούν αποτελεσματικά ως προσροφητικά για την απομάκρυνση χρωστικών ουσιών είτε στην ανεπεξέργαστη μορφή τους είτε μετά από κατάλληλη επεξεργασία. Η μέγιστη

ικανότητα προσρόφησης (maximum adsorption capacity- MAC) ή η μέγιστη απόδοση απομάκρυνσης χρώματος (maximum efficiency - ME) εξαρτάται από διάφορες παραμέτρους κατά τη διαδικασία της απορρόφησης, συμπεριλαμβανομένου του τύπου της χρωστικής, της αρχικής συγκέντρωσης της χρωστικής, του pH του διαλύματος, της δοσολογίας του προσροφητικού, του χρόνου επαφής και της θερμοκρασίας του διαλύματος (Blinová & Sirotiak, 2019).

Τα απόβλητα της γεωργίας και της βιομηχανίας τροφίμων, συμπεριλαμβανομένων των υπολειμμάτων από την επεξεργασία του καφέ, αναγνωρίζονται όλο και περισσότερο ως βιώσιμα και οικονομικά προσροφητικά μέσα για την απομάκρυνση περιβαλλοντικών ρύπων, ιδίως βαρέων μετάλλων. Οι Gómez-Aguilar et al. (2022) διεξήγαγαν προκαταρκτικές μελέτες για τη χρήση μη τροποποιημένου πολτού καφέ ως προσροφητικού υλικού για ιόντα Cr(III) και Cr(VI) σε συνθετικά υγρά απόβλητα, επιτυγχάνοντας αποδόσεις απομάκρυνσης 93,26% και 74,80%, αντίστοιχα.

Σε μια άλλη μελέτη, οι Gómez-Aguilar et al. (2021) διερεύνησαν το δυναμικό βιοπροσρόφησης του πολτού καφέ για την απομάκρυνση του Pb από συνθετικές πηγές νερού, αναδεικνύοντας σημαντικές ικανότητες προσρόφησης. Επιπλέον, οι Frezzini κ.ά. (2019) διερεύνησαν διάφορα αγροδιατροφικά απόβλητα, συμπεριλαμβανομένων των αποβλήτων καφέ, για την παραγωγή προσροφητικών υλικών χαμηλού κόστους για την απομάκρυνση πτητικών οργανικών ενώσεων από τα υγρά απόβλητα. Τα ευρήματά τους υποδηλώνουν ότι τα απόβλητα καφέ παρουσιάζουν υποσχόμενες δυνατότητες ως αποτελεσματικό προσροφητικό μέσο τόσο για αρωματικές όσο και για αλειφατικές πτητικές οργανικές ενώσεις, υποστηρίζοντας τη χρησιμότητά τους σε εφαρμογές επεξεργασίας υγρών αποβλήτων (Skorupa et al., 2023).

Συμπερασματικά, η αξιοποίηση των υπολειμμάτων καφέ καλύπτει πολλούς τομείς, προσφέροντας πολυάριθμα περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη. Μετατρέποντας τα υπολείμματα καφέ σε πολύτιμους πόρους, οι εφαρμογές αυτές συμβάλλουν στη μείωση των αποβλήτων, στην παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας, στη βιώσιμη γεωργία και στην ανάπτυξη φιλικών προς το περιβάλλον υλικών. Καθώς η έρευνα και η τεχνολογία συνεχίζουν να εξελίσσονται, οι πιθανές χρήσεις των υπολειμμάτων καφέ είναι πιθανό να επεκταθούν, ενισχύοντας περαιτέρω το ρόλο τους στην προώθηση της βιωσιμότητας και των πρακτικών κυκλικής οικονομίας.

3.3.3. Πυρόλυση και καύση

Μια άλλη εναλλακτική λύση για την αξιοποίηση των αποβλήτων και των υποπροϊόντων που προέρχονται από την πρωτογενή επεξεργασία του καφέ είναι η χρήση τους σε διαδικασίες άμεσης θερμοχημικής μετατροπής. Με αυτόν τον τρόπο τα αγροτοβιομηχανικά απόβλητα μπορούν να χρησιμοποιηθούν για την παραγωγή θερμικής ενέργειας, ηλεκτρικής ενέργειας, δευτερογενών καυσίμων ή πορωδών υλικών με προσροφητικές ιδιότητες. Υπό αυτή την έννοια, οι Mendoza και συν. (2019), αξιολόγησαν τη βιωσιμότητα της περγαμινής για την παραγωγή βιοελαίου μέσω πυρόλυσης. Κατά την παραγωγή ξυλάνθρακα, η περγαμινή παρουσίασε υψηλότερη θερμική αποικοδόμηση, οπότε προτάθηκε η άμεση καύση της λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε κυτταρίνη και της θερμαντικής της αξίας (περίπου 18,30 MJ/kg, σε ξηρή βάση). Ωστόσο, η υψηλή περιεκτικότητα σε τέφρα στην περγαμινή δημιουργεί δευτερογενή πυρόλυση με ατμό και μειώνει την απόδοση του βιοελαίου.

Οι Saenger και συν. (2001), αξιολόγησαν τα χαρακτηριστικά της πλήρους καύσης των φλοιών καφέ και την εκπομπή ρυπογόνων αερίων χρησιμοποιώντας έναν συμβατικό κλίβανο καύσης και έναν θάλαμο καύσης ρευστοποιημένης κλίνης σε πιλοτική κλίμακα. Αναφέρθηκε ότι ο περκασμός έχει υψηλή περιεκτικότητα σε πτητική ύλη και χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα και τέφρα. Όσον αφορά τις εκπομπές, δεν ανιχνεύθηκαν εκπομπές διοξειδίου του θείου κατά την καύση. Παρόλο που ανιχνεύθηκε σημαντική συγκέντρωση NO_x στα καυσαέρια (450-525 mg/Nm³), η παραγωγή ενέργειας μέσω άμεσης καύσης υπολειμματικής βιομάζας που προέρχεται από την πρωτογενή επεξεργασία καφέ μπορεί να είναι μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση. Στην πραγματικότητα, η άμεση καύση περγαμινών αποτελεί συχνή πρακτική. Η καύση υπολειμματικής βιομάζας δεν συνεπάγεται μεσοπρόθεσμα καθαρή αύξηση του διοξειδίου του άνθρακα στην ατμόσφαιρα, καθώς το εν λόγω υπόστρωμα προέρχεται από φωτοσυνθετικά φυτά. Ωστόσο, δεν επιτυγχάνεται μεγάλη προστιθέμενη αξία και παραγωγή ενέργειας από την περγαμινή λόγω της ταχείας καύσης και της χαμηλής θερμογόνου δύναμης. Εξ όσων γνωρίζουμε, η άμεση καύση των άλλων υποπροϊόντων και αποβλήτων που προέρχονται από τη διαδικασία του καφέ (π.χ. πολτός ή βλεννώδης ουσία) δεν έχει διερευνηθεί επαρκώς λόγω της υψηλής περιεκτικότητάς τους σε υγρασία (πάνω από 80%), η οποία θα απαιτούσε προηγούμενη ξήρανση που θα μπορούσε να οδηγήσει σε αρνητικό ενεργειακό ισοζύγιο. Ως εκ τούτου, θα ήταν ενδιαφέρον να αξιολογηθεί η καταλληλότητα της εφαρμογής διαφορετικών μεθόδων ξήρανσης ως προεπεξεργασία της υπολειμματικής βιομάζας και, με αυτόν τον τρόπο, να προσδιοριστούν τα χαρακτηριστικά και οι δυνατότητες που μπορεί να έχει

για την επακόλουθη καύση από ενεργειακή άποψη (Serna-Jiménez et al., 2022).

Οι Santana και συν. (2022), χρησιμοποίησαν πρόσφατα ελαττωματικούς κόκκους καφέ σε αντιδραστήρες υψηλής πίεσης (στους 150, 200 και 250 °C, για 40 λεπτά) για την παραγωγή υδροχάρτου. Πραγματοποιήθηκαν δοκιμές προσρόφησης μπλε του μεθυλενίου και αναλύθηκαν με ισοθέρμες προσρόφησης Langmuir και Freundlich. Ανέφεραν ότι ο υδροάνθρακας θα μπορούσε να εφαρμοστεί ως τεχνολογικός πόρος στον αγρονομικό και περιβαλλοντικό τομέα λόγω της ανάπτυξης οξυγονωμένων λειτουργικών ομάδων στην επιφάνειά του. Ο υδροάνθρακας παρουσιάζει επίσης υψηλή περιεκτικότητα σε μαγνήσιο και επαρκή δομικά χαρακτηριστικά όσον αφορά το πορώδες για τον έλεγχο των διεργασιών βιοαποικοδόμησης του εδάφους. Επιπλέον, οι Menéndez και συν. (2007), αξιολόγησαν τη δυνατότητα αξιοποίησης της περγαμηνής και του αργυρούχου δέρματος μέσω πυρόλυσης. Παράλληλα, στην επιστημονική βιβλιογραφία έχουν αναφερθεί και άλλες εναλλακτικές λύσεις, όπως η απόκτηση ξυλάνθρακα ή άλλα συστήματα που θα μπορούσαν να αυξήσουν τη θερμογόνο δύναμη του πολτού και της φλούδας του καφέ.

3.4. Άλλες χρήσεις

Πρόσφατα αναφέρθηκαν και άλλες χρήσεις αποβλήτων και υποπροϊόντων που προέρχονται από την πρωτογενή επεξεργασία του καφέ. Αξίζει να σημειωθεί ότι αυτές οι εναλλακτικές λύσεις θα μπορούσαν να παρουσιάσουν σημαντικό ενδιαφέρον σε διάφορους τομείς, ιδίως σε παραγωγικά συστήματα που τείνουν να είναι βιώσιμα (Serna-Jiménez et al., 2022).

3.4.1. Ζύμωση στερεάς κατάστασης και παραγωγή ενζύμων

Η χρήση των ενζύμων στη βιομηχανία έχει ευρεία χρήση λόγω της ικανότητάς τους να λειτουργούν ως καταλύτες με υψηλή εξειδίκευση και περιβαλλοντική αποδοτικότητα που μπορούν να αυξήσουν την κερδοφορία των παραγωγικών διαδικασιών. Στην πραγματικότητα, τα ένζυμα έχουν πολλαπλές εφαρμογές σε βιομηχανικούς τομείς, όπως αυτοί που είναι

αφιερωμένοι στην παραγωγή ανανεώσιμων πηγών ενέργειας και στην τεχνολογία βιοαποκατάστασης. Συγκεκριμένα, η αγορά ενζύμων βρίσκεται σε άνοδο, με ετήσια αύξηση 6,8% μεταξύ 2020 και 2027. Κατά συνέπεια, η χρήση αποβλήτων και υποπροϊόντων καφέ ως υποστρώματα για διεργασίες ζύμωσης που διεξάγονται από μανιτάρια, μύκητες, ζύμες ή βακτήρια για την παραγωγή ενζύμων αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη εναλλακτική λύση, με τη ζύμωση στερεάς κατάστασης να αποτελεί την πιο συχνή διαδικασία (Haque et al., 2022).

Οι Shankar και συν. (2019), πραγματοποίησαν σακχαροποίηση λιγνοκυτταρινούχων γεωργικών υπολειμμάτων: φλοιού καλαμποκιού (CHu), φλοιού φιστικιού (PH) και φλοιού κερασιού καφέ (CCH), χρησιμοποιώντας το ακατέργαστο κονσόρτσιουμ λιγνοκυτταρινολυτικών ενζύμων που παράγεται από το *Sphingobacterium* sp. ksn. σε μέσο ορυκτού άλατος. Έχουν αναφερθεί περαιτέρω διεργασίες ζύμωσης στερεάς κατάστασης αποβλήτων καφέ, με τη χρήση μυκήτων όπως *Rhizopus* spp., *Aspergillus* spp., *Streptomyces* spp. (Orozco et al., 2008), *Lentinula edodes* και *Pleurotus* spp. (Leonor et al., 2016). Οι Murthy και Manonmani (2008), αξιολόγησαν την αποδοτικότητα βιομετατροπής, την περίοδο αποικισμού του μυκηλίου, την πρώτη καρπόδεση, το βάρος του καρπού και τη διακύμανση της καφεΐνης και των τανινών που προέρχονται από την παραγωγή του *Pleurotus florida* σε εργαστηριακή κλίμακα χρησιμοποιώντας αποξηραμένα φύλλα καφέ, φλοιό, περγαμινή, ασημένια φλούδα και χρησιμοποιημένο αλεσμένο καφέ, με ή χωρίς πίτουρο σιταριού, σε τέσσερις συνδυασμούς: 10%, 20%, 25%, 50% (στους 25-27 °C). Στην ίδια γραμμή, οι Sabogal-Otálora και συν (2022), αξιολόγησαν τη βιολογική προεπεξεργασία φλοιού καφέ (ποικιλία Castilla) με τον μύκητα λευκής σήψης *Pleurotus ostreatus* CECT 20.311 (PL), σε συνδυασμό με έκρηξη ατμού. Οι Santos και συν. (2019), εξήγαγαν και σταθεροποίησαν χλωρογενικά οξέα από πολτό καφέ κατά τη διάρκεια ζύμωσης στερεάς κατάστασης με τη χρήση εμπορικών στελεχών ζύμης. Παράλληλα, οι Moreira και συν. (2018), ζύμωσαν φλοιό και πολτό καφέ με *Rhodotorula mucilaginosa* για την εξαγωγή καροτενοειδών.

Μεταξύ άλλων, οι ζυμωτικές διεργασίες που περιγράφονται επιτρέπουν τη μείωση της συγκέντρωσης ορισμένων αντιθρεπτικών συστατικών που περιέχονται στα απόβλητα καφέ, όπως οι τανίνες. Επιπλέον, έχει αναφερθεί ότι τα υποστρώματα που προέρχονται από υποπροϊόντα του καφέ είναι κατάλληλα για την καλλιέργεια φαρμακευτικών μανιταριών, επιτυγχάνοντας βιολογική απόδοση συγκρίσιμη με το ποσοστό που επιτυγχάνεται με τη χρήση τυποποιημένων υποστρωμάτων (Awedem Wobiwo et al., 2018). Κατά συνέπεια, οι εν λόγω διεργασίες μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως προεπεξεργασία για επακόλουθες βιοτεχνολογικές εναλλακτικές λύσεις και, με τη σειρά τους, θα μπορούσαν να αποτελέσουν

μέθοδο για τη λήψη μεταβολιτών με αξιοσημείωτο ενδιαφέρον και αξία σε διάφορες βιομηχανίες τροφίμων και μη τροφίμων (Jayachandra et al., 2011).

3.4.2. Χρωστικές ουσίες

Τα απόβλητα και τα υποπροϊόντα του καφέ περιέχουν χρωστικές ουσίες που ονομάζονται ανθοκυανίνες, όπως αναφέρεται στην ενότητα για τα βιοσυστατικά (Joubert, 2014). Η τρέχουσα ζήτηση στην αγορά για χρωστικές ουσίες επικεντρώνεται κυρίως σε προϊόντα που προέρχονται από φυσικά ή βιολογικά προϊόντα και δεν παρέχουν πιθανούς κινδύνους κατά την κατανάλωσή τους (Echegaray et al., 2023). Οι Prata και συν. (2007) εξέτασαν τη δυνατότητα χρήσης της φλούδας του καφέ ως πηγή ανθοκυανών στη συγκεκριμένη περίπτωση. Οι Parra-Campos και Ordóñez-Santos (2019) βελτίωσαν και αξιολόγησαν τη διαδικασία εξαγωγής χρωστικών ουσιών από το εξωτερικό στρώμα των κόκκων καφέ σε γαλλική μαρέγκα. Συνήθως, οι ιδιότητες των χρωστικών ουσιών καθιστούν εφικτή την εκχύλισή τους από τα απόβλητα και τα υποπροϊόντα του καφέ με τη χρήση διαλυτών όπως το νερό και η αιθανόλη. Ως εκ τούτου, είναι επιτακτική ανάγκη να επιμείνουμε στη διερεύνηση «πράσινων τεχνικών» και στη συνέχεια να επικεντρωθούμε στη συγκέντρωση και σταθεροποίηση των χρωστικών ουσιών. Αυτές οι χρωστικές ουσίες δεν διαθέτουν μόνο χρωματικές ιδιότητες, αλλά και πολύτιμες φαρμακευτικές και λειτουργικές ικανότητες που έχουν μεγάλη σημασία στους τομείς των τροφίμων, των καλλυντικών και των φαρμάκων (Mirón-Mérida et al., 2021).

3.4.3. Δομικά υλικά

Ο φλοιός του καφέ και η περγαμινή μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως βιώσιμοι πόροι για την παραγωγή συσσωματωμάτων που χρησιμοποιούνται στη μόνωση κατασκευών, καλύπτοντας τη σημαντική ζήτηση στον κλάδο αυτό. Οι Bekalo και Reinhardt (2009) διεξήγαγαν αξιολόγηση των μηχανικών και φυσικών ιδιοτήτων μοριοσανίδων που αποτελούνται από φλοιό καφέ και περγαμινή αναμεμειγμένες με πολυμερή. Τα ευρήματα δείχνουν ότι είναι δυνατή η υποκατάσταση έως και 50% του ξύλου με το υπόστρωμα βιομάζας. Επομένως, η αξιοποίηση των φλοιών καφέ και της περγαμινής για τη δημιουργία

κατασκευαστικών σανίδων ή επιστρώσεων αποτελεί μια πολλά υποσχόμενη προσέγγιση αξιοποίησης (Bekalo & Reinhardt, 2009). Επιπλέον, οι Farias και συν. (2022) αξιολόγησαν την κατασκευή υαλοκεραμικών υλικών με τη χρήση της τέφρας φλοιού καφέ ως πρόδρομη ουσία για το K₂O. Τα αποτελέσματα καταδεικνύουν τη βιωσιμότητα της παραγωγής υαλοκεραμικών υλικών με τη χρήση τέφρας φλοιού καφέ ως υποκατάστατο του εμπορικού ανθρακικού καλίου, υιοθετώντας έτσι μια πιο φιλική προς το περιβάλλον προσέγγιση. Η αξιοποίηση των υποπροϊόντων του καφέ για τέτοιους σκοπούς έχει τη δυνατότητα να δημιουργήσει θετικά κοινωνικά αποτελέσματα και να βελτιώσει τις συνθήκες στέγασης μειονεκτουσών ομάδων, ιδίως των παραγωγών καφέ. Αυτό, με τη σειρά του, θα βελτίωνε την ποιότητα ζωής τους και θα τους παρείχε καλύτερους πόρους για τη βελτίωση των μεθόδων παραγωγής τους, με αποτέλεσμα την υψηλότερη αξία του τελικού προϊόντος (Farias et al., 2022).

3.5. Αναδυόμενες και καινοτόμες χρήσεις

Συγκριτικές αξιολογήσεις χρησιμοποιούνται συχνά για την αξιολόγηση της αποδοχής και της αποτελεσματικότητας διαφόρων υλικών σε αναδυόμενες και νέες εφαρμογές σε διάφορους τομείς. Στον τομέα των βιώσιμων υλικών και της ανάκτησης αποβλήτων, η διενέργεια τέτοιων αξιολογήσεων είναι υψίστης σημασίας προκειμένου να προσδιοριστούν οι πιο συμφέρουσες εφαρμογές και να ενισχυθεί η αποδοτικότητα των πόρων στον μέγιστο βαθμό.

Για παράδειγμα, τα απόβλητα καφέ, συμπεριλαμβανομένων των παλαιών καταλοίπων καφέ και του πολτού καφέ, έχουν προσελκύσει το ενδιαφέρον λόγω των πιθανών εφαρμογών τους πέραν των συμβατικών μεθόδων διάθεσης. Συγκριτικές αξιολογήσεις έχουν εξετάσει τις δυνατότητες χρήσης τους ως οικονομικά αποδοτικού προσροφητικού υλικού για την απομάκρυνση ρυπαντών όπως τα βαρέα μέταλλα στην επεξεργασία υγρών αποβλήτων. Οι αναλύσεις αυτές συνέκριναν την αποτελεσματικότητά του με εκείνη των παραδοσιακών προσροφητικών μέσων. Οι έρευνες έχουν δείξει ότι τα απόβλητα καφέ παρουσιάζουν συγκρίσιμες ή και καλύτερες ικανότητες προσέλκυσης και συγκράτησης μετάλλων, συμπεριλαμβανομένου του χρωμίου, του ψευδαργύρου και του μολύβδου, ιδίως σε σύγκριση με τεχνητά προσροφητικά ή άλλα γεωργικά υπολείμματα (Anastopoulos et al., 2017).

Επιπλέον, τα απόβλητα καφέ έχουν αξιολογηθεί σε αναπτυσσόμενες χρήσεις, όπως η ανάπτυξη οικοδομικών υλικών φιλικών προς το περιβάλλον, η παρασκευή βιοκαυσίμων και η δημιουργία βιοάνθρακα. Οι συγκριτικές έρευνες σε αυτούς τους τομείς αξιολογούν συχνά τη μηχανική ανθεκτικότητα, τη θερμική αντοχή και τις οικολογικές συνέπειες των προϊόντων που προέρχονται από απόβλητα καφέ σε σύγκριση με συμβατικά υλικά ή εναλλακτικές λύσεις που βασίζονται σε ορυκτά καύσιμα. Σκοπός αυτών των ερευνών είναι να επιβεβαιωθεί η πρακτικότητα της χρήσης των αποβλήτων καφέ σε αυτές τις νέες εφαρμογές, δίνοντας έμφαση στην ικανότητά τους να υποστηρίζουν τους στόχους της βιώσιμης ανάπτυξης μέσω της μείωσης της παραγωγής αποβλήτων και των εκπομπών διοξειδίου του άνθρακα (Rajesh Banu et al., 2020).

Οι συγκριτικές αξιολογήσεις είναι ζωτικής σημασίας για τη διερεύνηση της νέας και δημιουργικής χρήσης των αποβλήτων καφέ και άλλων βιώσιμων υλικών. Οι αξιολογήσεις αυτές προσφέρουν κρίσιμες γνώσεις σχετικά με τις επιδόσεις, τη σχέση κόστους-αποτελεσματικότητας και τα περιβαλλοντικά πλεονεκτήματα της χρήσης των αποβλήτων καφέ σε διάφορες εφαρμογές. Αυτό βοηθά στη λήψη καλά τεκμηριωμένων αποφάσεων στο πεδίο της βιώσιμης διαχείρισης των πόρων.

Οι ερευνητές βρίσκουν περαιτέρω χρήσεις για τα υπολείμματα καφέ σε βιομηχανικές εφαρμογές, πέρα από τα βιοπλαστικά και τα προσροφητικά υλικά, καθώς διερευνούν νέους τρόπους αξιοποίησης του δυναμικού αυτών των υπολειμμάτων. Μια ενθαρρυντική προσέγγιση είναι η μετατροπή των υπολειμμάτων καφέ σε βιοκαύσιμα. Τα υπολείμματα καφέ μπορούν να μετατραπούν σε βιώσιμες πηγές ενέργειας χρησιμοποιώντας μεθόδους όπως η αναερόβια χώνευση και η μετεστεροποίηση. Η στρατηγική αυτή όχι μόνο βοηθά στην αποτελεσματική διαχείριση των σκουπιδιών, αλλά μειώνει επίσης την εξάρτηση από τα ορυκτά καύσιμα, συμβάλλοντας έτσι σε ένα πιο βιώσιμο ενεργειακό περιβάλλον (Massaya et al., 2019).

Μια άλλη αυξανόμενη αξιοποίηση των υπολειμμάτων καφέ είναι στον τομέα της παρασκευής διατροφής. Τα υπολείμματα καφέ, με τα άφθονα αντιοξειδωτικά και τα ποικίλα βιοδραστικά συστατικά τους, είναι ιδιαίτερα χρήσιμα για τη δημιουργία συμπληρωμάτων υγείας και λειτουργικών τροφίμων. Αυτές οι διατροφικές λύσεις χρησιμοποιούν τις εγγενείς ιδιότητες των υπολειμμάτων καφέ για τη βελτίωση της ευεξίας και την παροχή πλήθους πλεονεκτημάτων για την υγεία. Αυτή η νέα αξιοποίηση των υπολειμμάτων καφέ συνάδει με την αυξανόμενη ζήτηση της αγοράς για φυσικά προϊόντα που προάγουν την υγεία (Saeed et al., 2019).

Τα υπολείμματα του καφέ αξιοποιούνται στον τομέα της κλωστοϋφαντουργίας. Τα υπολείμματα καφέ μπορούν να χρησιμοποιηθούν για τη δημιουργία βιώσιμων υφασμάτων που έχουν την ικανότητα να απορροφούν οσμές και να παρέχουν προστασία από την υπεριώδη ακτινοβολία. Αυτά τα υφάσματα είναι κατάλληλα για ενεργά ρούχα και άλλα είδη ένδυσης. Με την ενσωμάτωση των υπολειμμάτων καφέ στη διαδικασία κατασκευής των κλωστοϋφαντουργικών προϊόντων, οι παραγωγοί μπορούν να παράγουν φιλικά προς το περιβάλλον υφάσματα που όχι μόνο ελαχιστοποιούν τα απόβλητα αλλά και παρέχουν πρακτικά πλεονεκτήματα στους καταναλωτές. Οι εφαρμογές αυτές αναδεικνύουν τις πολύπλευρες δυνατότητες των υπολειμμάτων καφέ, τονίζοντας τη συμβολή τους στην προώθηση βιώσιμων πρακτικών σε διάφορους κλάδους (Rao, 2019).

Συμπέρασμα

Η αξιοποίηση των αποβλήτων καφέ αποτελεί ένα δυναμικό και εξελισσόμενο πεδίο με σημαντικές δυνατότητες για περιβαλλοντικά και οικονομικά οφέλη. Το τεράστιο φάσμα των υποπροϊόντων που παράγονται σε όλη την αλυσίδα παραγωγής και επεξεργασίας του καφέ, από τους φλοιούς του καφέ και το χρησιμοποιημένο κατακάθι του καφέ έως την περγαμινή και το παρέγχυμα, παρουσιάζει πολυάριθμες ευκαιρίες για βιώσιμη διαχείριση και δημιουργία αξίας.

Από γεωργική άποψη, τα απόβλητα καφέ έχουν αποδειχθεί ωφέλιμα ως κομπόστ, λίπασμα και ζωοτροφές, συμβάλλοντας στην υγεία του εδάφους και μειώνοντας την ανάγκη για συνθετικές εισροές. Οι μέθοδοι αυτές όχι μόνο κλείνουν τον κύκλο στην παραγωγή καφέ, αλλά ενισχύουν επίσης τη γονιμότητα του εδάφους και προωθούν κυκλικές γεωργικές πρακτικές.

Στον τομέα της παραγωγής ενέργειας, τα απόβλητα καφέ διερευνώνται για τις δυνατότητές τους στην παραγωγή βιοκαυσίμων και βιοαερίου. Η προσέγγιση αυτή ευθυγραμμίζεται με τους παγκόσμιους στόχους ενεργειακής βιωσιμότητας και παρέχει ένα πρακτικό μέσο μετατροπής των οργανικών αποβλήτων σε πολύτιμους πόρους. Η μετατροπή των υπολειμμάτων καφέ σε βιοκαύσιμα και βιοαέριο προσφέρει μια ανανεώσιμη εναλλακτική λύση στα ορυκτά καύσιμα και συμβάλλει στη μείωση των εκπομπών αερίων του θερμοκηπίου.

Οι βιομηχανικές εφαρμογές των υπολειμμάτων καφέ, συμπεριλαμβανομένης της δημιουργίας βιοπλαστικών, προσροφητικών ουσιών και υλικών μέσω πυρόλυσης και καύσης, αναδεικνύουν την ευελιξία και το δυναμικό καινοτομίας τους. Οι εφαρμογές αυτές όχι μόνο μετριάζουν τις περιβαλλοντικές επιπτώσεις των αποβλήτων, αλλά και προωθούν την ανάπτυξη νέων υλικών και τεχνολογιών με πρακτικές χρήσεις σε διάφορους τομείς.

Οι αναδυόμενες χρήσεις των αποβλήτων καφέ, όπως η ζύμωση στερεάς κατάστασης, η παραγωγή ενζύμων και η ανάπτυξη χρωστικών ουσιών, καταδεικνύουν τη συνεχιζόμενη έρευνα και καινοτομία στον τομέα αυτό. Αυτές οι νέες εφαρμογές υπόσχονται να ενισχύσουν περαιτέρω την αξία που προκύπτει από τα υπολείμματα καφέ και να συμβάλουν στις ευρύτερες προσπάθειες αειφορίας.

Η αποτελεσματική αξιοποίηση των υπολειμμάτων καφέ αποτελεί απόδειξη των δυνατοτήτων ενσωμάτωσης της διαχείρισης των αποβλήτων με την ανάκτηση πόρων και την

καινοτομία. Η συνεχής διερεύνηση και εφαρμογή αυτών των στρατηγικών θα είναι ζωτικής σημασίας για την προώθηση της βιωσιμότητας στον κλάδο του καφέ και πέραν αυτού.

Βιβλιογραφία

- Afriliana, A., Hidayat, E., Mitoma, Y., Masuda, T., & Harada, H. (2021). Studies on Composting Spent Coffee Grounds by *Aspergillus sp* and *Aspergillus sp* in Aerobic Static Batch Temperature Control. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*, 10(01), 91–112. <https://doi.org/10.4236/jacen.2021.101007>
- Alves, R. C., Rodrigues, F., Antónia Nunes, M., Vinha, A. F., & Oliveira, M. B. P. P. (2017, January 1). *Chapter 1 - State of the art in coffee processing by-products* (C. M. Galanakis, Ed.). ScienceDirect; Academic Press.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128112908000013>
- Anastopoulos, I., Karamesouti, M., Mitropoulos, A. C., & Kyzas, G. Z. (2017). A review for coffee adsorbents. *Journal of Molecular Liquids*, 229, 555–565.
<https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.12.096>
- Arya, M., & Rao, L. J. M. (2007). An Impression of Coffee Carbohydrates. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 47(1), 51–67. <https://doi.org/10.1080/10408390600550315>
- Awedem Wobiwo, F., Ercoli Balbuena, J.-L., Nicolay, T., Larondelle, Y., & Gerin, P. A. (2018). Valorization of spent coffee ground with wheat or miscanthus straw: Yield improvement by the combined conversion to mushrooms and biomethane. *Energy for Sustainable Development*, 45, 171–179. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2018.06.012>
- Ballesteros, L. F., Teixeira, J. A., & Mussatto, S. I. (2014). Chemical, Functional, and Structural Properties of Spent Coffee Grounds and Coffee Silverskin. *Food and Bioprocess Technology*, 7(12), 3493–3503. <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1349-z>
- Battista, F., Zanzoni, S., Strazzer, G., Andreolli, M., & Bolzonella, D. (2020). The cascade biorefinery approach for the valorization of the spent coffee grounds. *Renewable Energy*, 157, 1203–1211. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.05.113>
- Bekalo, S. A., & Reinhardt, H.-W. (2009). Fibers of coffee husk and hulls for the production of particleboard. *Materials and Structures*, 43(8), 1049–1060.
<https://doi.org/10.1617/s11527-009-9565-0>
- Benitez, V., Rebollo-Hernanz, M., Hernanz, S., Chantres, S., Aguilera, Y., & Martin-Cabrejas, M. A. (2019). Coffee parchment as a new dietary fiber ingredient:

- Functional and physiological characterization. *Food Research International*, 122, 105–113. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.04.002>
- Bernardes, T., Moreira, M. A., Adami, M., Giarolla, A., & Rudorff, B. F. T. (2012). Monitoring Biennial Bearing Effect on Coffee Yield Using MODIS Remote Sensing Imagery. *Remote Sensing*, 4(9), 2492–2509. <https://doi.org/10.3390/rs4092492>
- Birk, J., Steiner, C., WC Teixeira, Zech, W., & Glaser, B. (2008). Microbial Response to Charcoal Amendments and Fertilization of a Highly Weathered Tropical Soil. *Springer EBooks*, 309–324. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9031-8_16
- Blinová, L., & Sirotiak, M. (2019). Utilization of Spent Coffee Grounds for Removal of Hazardous Substances from Water: A Review. *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology*, 27(44), 145–152. <https://doi.org/10.2478/rput-2019-0015>
- Blinová, L., Bartošová, A., & Sirotiak, M. (2017). Biodiesel Production from Spent Coffee Grounds. *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology*, 25(40), 113–121. <https://doi.org/10.1515/rput-2017-0013>
- Blinová, L., Sirotiak, M., Bartošová, A., & Soldán, M. (2017). Review: Utilization of Waste From Coffee Production. *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology*, 25(40), 91–101. <https://doi.org/10.1515/rput-2017-0011>
- Bomfim, A., De Oliveira, D., Walling, E., & Babin. (2022). Spent Coffee Grounds Characterization and Reuse in Composting and Soil Amendment. *Waste*, 1(1). <https://doi.org/10.3390/waste1010002>
- Brennan, P. (2024, February 15). *Enhancing Soil Health with Coffee Grounds: A Regenerative Farming Appr.* Sacred Plant Co. <https://sacredplantco.com/blogs/growing-guides/enhancing-soil-health-with-coffee-grounds-a-regenerative-farming-approach>
- Campos-Vega, R., Loarca-Piña, G., Vergara-Castañeda, H. A., & Oomah, B. D. (2015). Spent coffee grounds: A review on current research and future prospects. *Trends in Food Science & Technology*, 45(1), 24–36. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.04.012>
- Coelho, G. O., Batista, M. J. A., Ávila, A. F., Franca, A. S., & Oliveira, L. S. (2021). Development and characterization of biopolymeric films of galactomannans

- recovered from spent coffee grounds. *Journal of Food Engineering*, 289, 110083.
<https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110083>
- Czekała, W., Łukomska, A., Pulka, J., Bojarski, W., Pochwatka, P., Kowalczyk-Juśko, A., Oniszczyk, A., & Dach, J. (2023). Waste-to-energy: Biogas potential of waste from coffee production and consumption. *Energy*, 276, 127604.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2023.127604>
- Dattatraya Saratale, G., Bhosale, R., Shobana, S., Banu, J. R., Pugazhendhi, A., Mahmoud, E., Sirohi, R., Kant Bhatia, S., Atabani, A. E., Mulone, V., Yoon, J.-J., Seung Shin, H., & Kumar, G. (2020). A review on valorization of spent coffee grounds (SCG) towards biopolymers and biocatalysts production. *Bioresource Technology*, 314, 123800. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123800>
- Didanna, H. L. (2014). A critical review on feed value of coffee waste for livestock feeding. *World J. Biol. Biol. Sci*, 2(5), 72-86.
- Echegaray, N., Guzel, N., Kumar, M., Guzel, M., Hassoun, A., & Lorenzo, J. M. (2023). Recent advancements in natural colorants and their application as coloring in food and in intelligent food packaging. *Food Chemistry*, 404, 134453.
<https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.134453>
- Eira, M. T. S., Silva, E. A. A. da, De Castro, R. D., Dussert, S., Walters, C., Bewley, J. D., & Hilhorst, H. W. M. (2006). Coffee seed physiology. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 18(1), 149–163. <https://doi.org/10.1590/S1677-04202006000100011>
- Emmanuel, S. A., Yoo, J., Kim, E.-J., Chang, J.-S., Park, Y.-I., & Koh, S.-C. (2017). Development of functional composts using spent coffee grounds, poultry manure and biochar through microbial bioaugmentation. *Journal of Environmental Science and Health. Part. B, Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes*, 52(11), 802–811. <https://doi.org/10.1080/03601234.2017.1356165>
- Farah, A. (2012). Coffee Constituents. *Coffee*, 21–58.
<https://doi.org/10.1002/9781119949893.ch2>
- Farias, M. B., Allan J.M. Araújo, Medeiros, V. S., Macedo, D. A., Auristela De Miranda, Paskocimas, C. A., & Nascimento, R. M. (2022). Use of coffee husk ash for preparation of glass-ceramics as potential sealants for solid oxide cells. *Ceramics International*, 48(16), 23145–23150. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.04.295>

- Franca, A. S., & Oliveira, L. S. (2009). Coffee processing solid wastes: current uses and future perspectives. *Agricultural wastes*, 9, 155-189.
- Franca, A. S., Oliveira, L. S., & Ferreira, M. E. (2009). Kinetics and equilibrium studies of methylene blue adsorption by spent coffee grounds. *Desalination*, 249(1), 267–272. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.11.017>
- Frezzi, M. A., Massimi, L., Astolfi, M. L., Canepari, S., & Giuliano, A. (2019). Food Waste Materials as Low-Cost Adsorbents for the Removal of Volatile Organic Compounds from Wastewater. *Materials*, 12(24), 4242. <https://doi.org/10.3390/ma12244242>
- Gómez-Aguilar, D. L., Esteban-Muñoz, J. A., Rodríguez-Miranda, J. P., Baracaldo-Guzmán, D., & Salcedo-Parra, O. J. (2022). Desorption of Coffee Pulp Used as an Adsorbent Material for Cr(III and VI) Ions in Synthetic Wastewater: A Preliminary Study. *Molecules/Molecules Online/Molecules Annual*, 27(7), 2170–2170. <https://doi.org/10.3390/molecules27072170>
- Gómez-Aguilar, D. L., Rodríguez-Miranda, J. P., Baracaldo-Guzmán, D., Salcedo-Parra, O. J., & Esteban-Muñoz, J. A. (2021). Biosorption of Pb(II) Using Coffee Pulp as a Sustainable Alternative for Wastewater Treatment. *Applied Sciences*, 11(13), 6066–6066. <https://doi.org/10.3390/app11136066>
- Gross, G., Jaccaud, E., & Huggett, A. C. (1997). Analysis of the content of the diterpenes cafestol and kahweol in coffee brews. *Food and Chemical Toxicology: An International Journal Published for the British Industrial Biological Research Association*, 35(6), 547–554. [https://doi.org/10.1016/s0278-6915\(96\)00123-8](https://doi.org/10.1016/s0278-6915(96)00123-8)
- Gu, F.-L., Kim, J. M., Abbas, S., Zhang, X.-M., Xia, S.-Q., & Chen, Z.-X. (2010). Structure and antioxidant activity of high molecular weight Maillard reaction products from casein–glucose. *Food Chemistry*, 120(2), 505–511. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.10.044>
- Haque, S., Singh, R., Harakeh, S., Addisu Demeke Teklemariam, Alharthy, S. A., Tripathi, S. C., Ravindra Pratap Singh, Ashraf Aly Hassan, Srivastava, N., & Vijai Kumar Gupta. (2022). Enzyme-based biocatalysis for the treatment of organic pollutants and bioenergy production. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 38, 100709–100709. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2022.100709>

- Hardgrove, S. J., & Livesley, S. J. (2016). Applying spent coffee grounds directly to urban agriculture soils greatly reduces plant growth. *Urban Forestry & Urban Greening*, 18(18), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2016.02.015>
- Henrique, C. (2004). *Harvesting and Green Coffee Processing*. 604–715.
<https://doi.org/10.1002/9783527619627.ch24>
- Huynh, D. (2023, January 5). *5 ECO-FRIENDLY BIOPLASTIC MADE FROM COFFEE GROUNDS*. <https://Biopolymer.vn/>. <https://biopolymer.vn/en/biodegradable-plastics-market/bioplastic-made-from-coffee-grounds/>
- Ingrao, C., Platnieks, O., Siracusa, V., Gaidukova, G., Paiano, A., & Gaidukovs, S. (2022). Spent-coffee grounds as a zero-burden material blended with bio-based poly(butylene succinate) for production of bio-composites: Findings from a Life Cycle Assessment application experience. *Environmental Impact Assessment Review*, 97, 106919.
<https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106919>
- Janissen, B., & Huynh, T. (2018). Chemical composition and value-adding applications of coffee industry by-products: A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 128, 110–117. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.001>
- Jayachandra, T., Venugopal, C., & Anu Appaiah, K. A. (2011). Utilization of phytotoxic agro waste— Coffee cherry husk through pretreatment by the ascomycetes fungi *Mycotypha* for biomethanation. *Energy for Sustainable Development*, 15(1), 104–108.
<https://doi.org/10.1016/j.esd.2011.01.001>
- Jenkins, R. W., Stageman, N. E., Fortune, C. M., & Chuck, C. J. (2014). Effect of the Type of Bean, Processing, and Geographical Location on the Biodiesel Produced from Waste Coffee Grounds. *Energy & Fuels*, 28(2), 1166–1174.
<https://doi.org/10.1021/ef4022976>
- Joët, T., Laffargue, A., Descroix, F., Doubeau, S., Bertrand, B., Kochko, A. de, & Dussert, S. (2010). Influence of environmental factors, wet processing and their interactions on the biochemical composition of green Arabica coffee beans. *Food Chemistry*, 118(3), 693–701. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.05.048>
- Joubert, E. (2014). *Antioxidants of Rooibos Beverages*. 131–144.
<https://doi.org/10.1016/b978-0-12-404738-9.00014-3>

- Karmee, S. K. (2018). A spent coffee grounds based biorefinery for the production of biofuels, biopolymers, antioxidants and biocomposites. *Waste Management*, 72, 240–254. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.10.042>
- Kondamudi, N., Mohapatra, S. K., & Misra, M. (2008). Spent Coffee Grounds as a Versatile Source of Green Energy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 56(24), 11757–11760. <https://doi.org/10.1021/jf802487s>
- Kovalcik, A., Obruca, S., & Marova, I. (2018). Valorization of spent coffee grounds: A review. *Food and Bioproducts Processing*, 110, 104–119. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2018.05.002>
- Leifa, F., Pandey, A., & Soccol, C. R. (2001). Production of *Flammulina velutipes* on coffee husk and coffee spent-ground. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 44(2), 205–212. <https://doi.org/10.1590/s1516-89132001000200015>
- LEONOR, R., AUGUSTO, C., & VELASCO, M. (2016). EVALUACIÓN DE RESIDUOS AGRÍCOLAS COMO SUSTRATO PARA LA PRODUCCIÓN DE *Pleurotus ostreatus*. *Luna Azul*, 37, 89–100. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1909-24742013000200008&script=sci_arttext
- Massaya, J., Prates Pereira, A., Mills-Lamptey, B., Benjamin, J., & Chuck, C. J. (2019). Conceptualization of a spent coffee grounds biorefinery: A review of existing valorisation approaches. *Food and Bioproducts Processing*, 118, 149–166. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.08.010>
- Mata, T. M., Martins, A. A., & Caetano, N. S. (2018). Bio-refinery approach for spent coffee grounds valorization. *Bioresource Technology*, 247, 1077–1084. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.106>
- McNutt, J., & He, Q. (Sophia). (2019). Spent coffee grounds: A review on current utilization. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 71, 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.11.054>
- Mendoza Martinez, C. L., Alves Rocha, E. P., Oliveira Carneiro, A. de C., Borges Gomes, F. J., Ribas Batalha, L. A., Vakkilainen, E., & Cardoso, M. (2019). Characterization of residual biomasses from the coffee production chain and assessment the potential for energy purposes. *Biomass and Bioenergy*, 120, 68–76. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.11.003>

- Menéndez, J. A., Domínguez, A., Fernández, Y., & Pis, J. J. (2007). Evidence of Self-Gasification during the Microwave-Induced Pyrolysis of Coffee Hulls. *Energy & Fuels*, 21(1), 373–378. <https://doi.org/10.1021/ef060331i>
- Mirón-Mérida, V. A., Barragán-Huerta, B. E., & Gutiérrez-Macías, P. (2021, January 1). *Chapter 9 - Coffee waste: a source of valuable technologies for sustainable development* (R. Bhat, Ed.). ScienceDirect; Academic Press. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B978012824044100009X>
- Moreira, M. D., Melo, M. M., Coimbra, J. M., Reis, K. C. dos, Schwan, R. F., & Silva, C. F. (2018). Solid coffee waste as alternative to produce carotenoids with antioxidant and antimicrobial activities. *Waste Management*, 82, 93–99. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.017>
- Mozarte Santos Santana, Rafael Pereira Alves, Lucas Santos Santana, Mateus Aquino Gonçalves, & Mário César Guerreiro. (2022). Structural, inorganic, and adsorptive properties of hydrochars obtained by hydrothermal carbonization of coffee waste. *Journal of Environmental Management*, 302, 114021–114021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114021>
- Murthy, P. S., & Madhava Naidu, M. (2012). Sustainable management of coffee industry by-products and value addition—A review. *Resources, Conservation and Recycling*, 66, 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2012.06.005>
- Murthy, P. S., & Manonmani, H. K. (2008). Bioconversion of Coffee industry wastes with white rot fungus *Pleurotus florida*.
- Mussatto, S. I., Ballesteros, L. F., Martins, S., & Teixeira, J. A. (2011). Extraction of antioxidant phenolic compounds from spent coffee grounds. *Separation and Purification Technology*, 83, 173–179. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2011.09.036>
- Mussatto, S. I., Machado, E. M. S., Martins, S., & Teixeira, J. A. (2011). Production, Composition, and Application of Coffee and Its Industrial Residues. *Food and Bioprocess Technology*, 4(5), 661–672. <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0565-z>
- Nguyen, H. C., Nguyen, M. L., Wang, F.-M., Liang, S.-H., Bui, T. L., Ha, H. H., & Su, C.-H. (2019). Using switchable solvent as a solvent and catalyst for in situ transesterification of spent coffee grounds for biodiesel synthesis. *Bioresource Technology*, 289, 121770. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121770>

- Nicoletto, C., Santagata, S., Zanin, G., & Sambo, P. (2014). Effect of the anaerobic digestion residues use on lettuce yield and quality. *Scientia Horticulturae*, 180, 207–213. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2014.10.028>
- Oliveira, G., Passos, C. P., Ferreira, P., Coimbra, M. A., & Gonçalves, I. (2021). Coffee By-Products and Their Suitability for Developing Active Food Packaging Materials. *Foods*, 10(3), 683. <https://doi.org/10.3390/foods10030683>
- Oliveira, L. S., Franca, A. S., Camargos, R. R. S., & Ferraz, V. P. (2008). Coffee oil as a potential feedstock for biodiesel production. *Bioresource Technology*, 99(8), 3244–3250. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.05.074>
- Oliveira, L. S., Franca, A. S., Mendonça, J. C. F., & Barros-Júnior, M. C. (2006). Proximate composition and fatty acids profile of green and roasted defective coffee beans. *LWT - Food Science and Technology*, 39(3), 235–239. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.01.011>
- Orozco, A. L., Pérez, M. I., Guevara, O., Rodríguez, J., Hernández, M., González-Vila, F. J., Polvillo, O., & Arias, M. E. (2008). Biotechnological enhancement of coffee pulp residues by solid-state fermentation with *Streptomyces*. Py–GC/MS analysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 81(2), 247–252. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2007.12.002>
- Parra-Campos, A., & Ordóñez-Santos, L. E. (2019). Natural pigment extraction optimization from coffee exocarp and its use as a natural dye in French meringue. *Food Chemistry*, 285, 59–66. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.01.158>
- Pedraza-Beltrán, P. E., Julieta Gertrudis Estrada-Flores, Ángel Roberto Martínez-Campos, Israel Estrada-López, Adolfo Armando Rayas-Amor, Yong-Ángel, G., Figueroa-Medina, M., Francisca Avilés Nova, & Castelán-Ortega, O. A. (2011). On-farm evaluation of the effect of coffee pulp supplementation on milk yield and dry matter intake of dairy cows grazing tropical grasses in central Mexico. *Tropical Animal Health and Production*, 44(2), 329–336. <https://doi.org/10.1007/s11250-011-0025-9>
- Phimsen, S., Kiatkittipong, W., Yamada, H., Tagawa, T., Kiatkittipong, K., Laosiripojana, N., & Assabumrungrat, S. (2016). Oil extracted from spent coffee grounds for bi-hydrotreated diesel production. *Energy Conversion and Management*, 126, 1028–1036. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.08.085>

- Pokorny, K. (2023, June 23). *Used appropriately, coffee grounds improve soil and kill slugs*. Life at OSU. <https://today.oregonstate.edu/news/used-appropriately-coffee-grounds-improve-soil-and-kill-slugs>
- Prata, E. R. B. A., & Oliveira, L. S. (2007). Fresh coffee husks as potential sources of anthocyanins. *LWT - Food Science and Technology*, 40(9), 1555–1560. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2006.10.003>
- Pushpa S. Murthy, & H.K. Manonmani. (2008). Bioconversion of Coffee Industry Wastes with White Rot Fungus *Pleurotus florida*. *Research Journal of Environmental Sciences*, 2(2), 145–150. <https://doi.org/10.3923/rjes.2008.145.150>
- Rajesh Banu, J., Kavitha, S., Yukesh Kannah, R., Dinesh Kumar, M., Preethi, Atabani, A. E., & Kumar, G. (2020). Biorefinery of spent coffee grounds waste: Viable pathway towards circular bioeconomy. *Bioresource Technology*, 302, 122821. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122821>
- Rao, A. S. (2019). A NOVEL APPROACH OF COFFEE GROUND FIBER TOWARDS ENVIRONMENT FRIENDLY TEXTILE. *IMPACT: International Journal of Research in Humanities, Arts and Literatur*, 7(12).
- Rathinavelu, R., & Graziosi, G. (2005). Potential alternative use of coffee wastes and by-products. *Coffee Organization*, 942, 1-4.
- Rodrigues da Silva, M., Sanchez Bragagnolo, F., Lajaram Carneiro, R., de Oliveira Carvalho Pereira, I., Aquino Ribeiro, J. A., Martins Rodrigues, C., Jelley, R. E., Fedrizzi, B., & Soleo Funari, C. (2022). Metabolite characterization of fifteen by-products of the coffee production chain: From farm to factory. *Food Chemistry*, 369, 130753. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2021.130753>
- Rojo-Poveda, O., Barbosa-Pereira, L., Zeppa, G., & Stévigny, C. (2020). Cocoa Bean Shell-A By-Product with Nutritional Properties and Biofunctional Potential. *Nutrients*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/nu12041123>
- Sabogal-Otálora, A. M., Palomo-Hernández, L. F., & Piñeros-Castro, Y. (2022). Sugar production from husk coffee using combined pretreatments. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 176, 108966. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2022.108966>
- Saeed, M., Naveed, M., BiBi, J., Ali Kamboh, A., Phil, L., & Chao, S. (2019). Potential nutraceutical and food additive properties and risks of coffee: a comprehensive

- overview. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 59(20), 3293–3319.
<https://doi.org/10.1080/10408398.2018.1489368>
- Saenger, M., Hartge, E.-U., Werther, J., Ogada, T., & Siagi, Z. (2001). Combustion of coffee husks. *Renewable Energy*, 23(1), 103–121. [https://doi.org/10.1016/s0960-1481\(00\)00106-3](https://doi.org/10.1016/s0960-1481(00)00106-3)
- Sanchez-Hernandez, J. C., & Domínguez, J. (2017). Vermicompost derived from spent coffee grounds: assessing the potential for enzymatic bioremediation. *Elsevier EBooks*, 369–398. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-811290-8.00012-8>
- Santos da Silveira, J., Durand, N., Lacour, S., Belleville, M.-P., Perez, A., Loiseau, G., & Dornier, M. (2019). Solid-state fermentation as a sustainable method for coffee pulp treatment and production of an extract rich in chlorogenic acids. *Food and Bioproducts Processing*, 115, 175–184. <https://doi.org/10.1016/j.fbp.2019.04.001>
- Schenker, S., Handschin, S., Frey, B., Perren, R., & Escher, F. (2000). Pore Structure of Coffee Beans Affected by Roasting Conditions. *Journal of Food Science*, 65(3), 452–457. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2000.tb16026.x>
- Serna-Jiménez, J. A., Siles, J. A., de los Ángeles Martín, M., & Chica, A. F. (2022). A Review on the Applications of Coffee Waste Derived from Primary Processing: Strategies for Revalorization. *Processes*, 10(11), 2436.
<https://doi.org/10.3390/pr10112436>
- Shankar, K., Kulkarni, N. S., Jayalakshmi, S. K., & Sreeramulu, K. (2019). Saccharification of the pretreated husks of corn, peanut and coffee cherry by the lignocellulolytic enzymes secreted by *Sphingobacterium* sp. ksn for the production of bioethanol. *Biomass and Bioenergy*, 127, 105298.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.105298>
- Simões, J., Nunes, F. M., Domingues, M. R., & Coimbra, M. A. (2013). Extractability and structure of spent coffee ground polysaccharides by roasting pre-treatments. *Carbohydrate Polymers*, 97(1), 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2013.04.067>
- Skorupa, A., Worwąg, M., & Kowalczyk, M. (2023). Coffee Industry and Ways of Using By-Products as Bioadsorbents for Removal of Pollutants. *Water*, 15(1), 112.
<https://doi.org/10.3390/w15010112>
- Socas-Rodríguez, B., Álvarez-Rivera, G., Valdés, A., Ibáñez, E., & Cifuentes, A. (2021). Food by-products and food wastes: are they safe enough for their valorization? *Trends*

in *Food Science & Technology*, 114, 133–147.

<https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.05.002>

- Todaka, M., Kowhakul, W., Masamoto, H., & Shigematsu, M. (2018). Improvement of oxidation stability of biodiesel by an antioxidant component contained in spent coffee grounds. *Biofuels*, 1–9. <https://doi.org/10.1080/17597269.2018.1468977>
- Toschi, T. G., Cardenia, V., Bonaga, G., Mandrioli, M., & Rodriguez-Estrada, M. T. (2014). Coffee Silverskin: Characterization, Possible Uses, and Safety Aspects. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 62(44), 10836–10844.
<https://doi.org/10.1021/jf503200z>
- Tuntiwiwattanapun, N., Monono, E., Wiesenborn, D., & Tongcumpou, C. (2017). In-situ transesterification process for biodiesel production using spent coffee grounds from the instant coffee industry. *Industrial Crops and Products*, 102, 23–31.
<https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.03.019>
- Zabaniotou, A., & Kamaterou, P. (2019). Food waste valorization advocating Circular Bioeconomy - A critical review of potentialities and perspectives of spent coffee grounds biorefinery. *Journal of Cleaner Production*, 211, 1553–1566.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.230>
- Zhang, L., & Sun, X. (2017). Using cow dung and spent coffee grounds to enhance the two-stage co-composting of green waste. *Bioresource Technology*, 245, 152–161.
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.147>